

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

ПЛУГІН Олексій Андрійович

УДК 691.32:620.193.7 (043.3)

**ВПЛИВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ НА БЕТОН ОБВОДНЕНИХ
КОНСТРУКЦІЙ ТА СПОРУД, РОЗТАШОВАНИХ ПОБЛИЗУ
ЕЛЕКТРИФІКОВАНИХ ЗАЛІЗНИЧНИХ КОЛІЙ**

05.23.05 - будівельні матеріали та вироби

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків 2010

Дисертацією є рукопис

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

Науковий керівник $\bar{\kappa}$ кандидат технічних наук, доцент
КАЛІНІН Олег Анатолійович,
Українська державна академія
залізничного транспорту,
доцент кафедри будівельних матеріалів,
конструкцій та споруд

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
ШАБАНОВА Галина Миколаївна,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
головний науковий співробітник кафедри
технології кераміки, вогнетривів, скла та емалі

кандидат технічних наук
МАКАРЕНКО Ольга Валеріївна,
Харківський державний технічний університет
будівництва та архітектури,
доцент кафедри фізико-хімічної механіки
і технології будівельних матеріалів

Захист дисертації відбудеться «23» вересня 2010 р. о 13-00 годині на засіданні
Спеціалізованої вченої ради 64.056.04

Харківського державного технічного університету будівництва та архітектури
за адресою: вул. Сумська, 40, м. Харків 61002

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

Автореферат розісланий « » _____ 2010 р.

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

Т.О. Костюк

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Електрокорозія залізобетонних конструкцій і споруд завдає величезного збитку світовому господарству і є серйозною загрозою для його глобальної інфраструктури.

Захист від електрокорозії для залізобетонних конструкцій у нормальних умовах експлуатації в принципі не є проблемою, оскільки знайдені та успішно впроваджуються, особливо за кордоном, високоефективні способи такого захисту. Проте в умовах обводнення конструкцій більшість таких заходів не дають необхідного ефекту, оскільки дійсний механізм електрокорозії в таких умовах значно відрізняється від механізму, покладеного в основу вказаних способів і прийнятої нормативної літератури.

Ця відмінність полягає у тому, що в умовах обводненості, окрім процесів електрокорозії арматури, протікають також процеси електрокорозії бетону, причому не тільки армованих, а й неармованих конструкцій, зокрема водопропускних труб, опор мостів через водотоки, залізничних пасажирських платформ, пішохідних тунелів, підвальних поверхів будівель і т. п. Характерними пошкодженнями таких конструкцій є вилугування бетону й утворення тріщин.

Це свідчить про те, що довговічність і надійність таких конструкцій та споруд на основі вимог існуючих нормативних документів, застосовуваних матеріалів і технологій не забезпечується, а нормативні вимоги, матеріали і технології не є досконалими.

У зв'язку з цим *тема дисертації*, направлена на вирішення проблеми захисту від електрокорозії і забезпечення довговічності бетону обводнених бетонних і залізобетонних конструкцій будівель та споруд, що експлуатуються поблизу електрифікованих постійним струмом залізничних колій, є актуальною.

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

Мета дослідження – встановлення закономірностей розповсюдження електричного поля від потенціалу на рейках на обводнені конструкції та споруди, розташовані поблизу електрифікованих постійним струмом

залізничних колій, результатів дії електричного поля на цементний камінь і бетон, розробка і впровадження заходів із захисту бетону і конструкцій з нього від електрокорозії.

Наукова гіпотеза: при проходженні поїздів електрифікованими постійним струмом залізничними коліями потенціал на рейках обумовлює розповсюдження електричного поля на розташовані поблизу колій обводнені конструкції та споруди і наведення на них відповідного пульсуючого однонаправленого електричного потенціалу. Такий потенціал обумовлює електрокорозію бетону, що полягає у вилуговуванні цементного каменю і призводить до зниження міцності бетону. Кількість винесеного гідроксиду кальцію залежить від кількості електричного заряду, перенесеного через бетон. Бетон оптимального складу характеризується максимальною електрокорозійною стійкістю.

Завдання досліджень:

- дослідити стан будівель і споруд поблизу електрифікованих постійним струмом залізничних колій, виявити залежність зносу будівель і споруд від електрифікації;

- виконати дослідження в умовах експлуатації і встановити закономірності розповсюдження електричного поля від рейкової колії в ґрунті, конструкціях будівель і споруд; визначити показники небезпеки електрокорозії бетону конструкцій;

- дослідити вплив типу і стану верхньої будови колії на розповсюдження електричного поля в ґрунті, конструкціях будівель і споруд, а також на електрокорозійне пошкодження залізобетонних шпал;

- виконати дослідження впливу пульсуючого однонаправленого електричного поля при різних потенціалах на обводнений бетон різного складу з різними водоцементним відношенням і міцністю; дослідити електрокорозійну стійкість бетону оптимального складу;

- надати опис механізму (у вигляді схем і рівнянь) електрокорозійного вилуговування цементного каменю і бетону під впливом пульсуючого однонаправленого електричного поля, встановити його вплив на довговічність бетону;

- розробити і впровадити ефективні способи захисту бетону конструкцій будівель і споруд, що розташовані поблизу електрифікованих залізничних колій, і відповідні рекомендації.

Об'єкт досліджень – цементний камінь і бетон обводнених бетонних, залізобетонних і кам'яних конструкцій будівель і споруд, що експлуатуються поблизу електрифікованих постійним струмом залізничних колій.

Предмет досліджень – процеси і явища, що визначають електрокорозію цементного каменю і бетону обводнених бетонних, залізобетонних і кам'яних конструкцій будівель і споруд, що експлуатуються поблизу електрифікованих постійним струмом залізничних колій.

Методи досліджень. Зміну властивостей бетону в результаті дії електричного струму досліджували так: фізико-механічні властивості – стандартними методами; фазовий склад цементного каменю – за допомогою фізико-хімічних методів (рентгенофазовий аналіз, інфрачервона спектроскопія, рН-метрія); структуру цементного каменю і бетону – за допомогою світлової і скануючої електронної мікроскопії; електричні характеристики бетону – за оригінальними методиками за допомогою спеціально розроблених і виготовлених лабораторних установок і датчиків. Характеристики розповсюдження електричного поля від струму витoku з рейок на обводнені конструкції і споруди досліджували згідно з оригінальними методиками і схемами вимірювань за допомогою цифрових мультиметрів, які оснащені інтерфейсом з комп'ютером, і спеціально виготовлених датчиків.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Встановлені схеми і механізм розповсюдження електричного потенціалу з електрифікованої постійним струмом залізничної колії в ґрунті, конструкціях будівель і споруд.

2. Встановлено явище наведення поляризаційного поля в земляному полотні під електрифікованими постійним струмом залізничними коліями в результаті багаторічної експлуатації.

3. У результаті експериментальних електрометричних і фізико-хімічних досліджень встановлені кількісні закономірності впливу пульсуючого однонаправленого електричного поля з різною напругою на бетони різних складів, з різними водоцементним відношенням і міцністю, у т.ч. бетонів оптимального складу.

4. Надано опис (у вигляді схем і рівнянь) механізму розчинення і винесення портландиту з цементного каменю під дією пульсуючого однонаправленого електричного поля за рахунок одночасного розчинення відразу всіх блоків портландиту, що визначає кінетику електрокорозійного вилугування бетону і його довговічність.

5. Експериментально встановлена і теоретично обґрунтована висока електрокорозійна стійкість бетону оптимального складу за рахунок практичної нерозчинності одного ряду блоків портландиту між не до кінця гідратованими частинками цементу з відповідними двосторонніми електрогетерогенними контактами.

Практична значущість отриманих результатів. За наслідками теоретичних і експериментальних досліджень розроблені:

- методика визначення шляхів розповсюдження потенціалів з рейок електрифікованих постійним струмом залізничних колій через ґрунт, конструкції будівель і споруд у «землю» та оцінки небезпеки електрокорозії бетону і розчину в конструкціях;

- способи захисту від електрокорозії бетонних, залізобетонних і кам'яних конструкцій: за допомогою металоін'єкційних мембран і обойм з

поляризованим заземленням; заземленої в ґрунт сталобетонної обойми; залізобетонної сорочки з бетону оптимального складу.

Вказані розробки впроваджені і пройшли експлуатаційну перевірку при капітальному ремонті водопропускної труби на 19 км ділянки Харків – Люботин Південної залізниці (ПЗ); зруйнованого електрокорозією залізобетонного поясу опори моста на 284 км ділянки Основа – Букине ПЗ; водопропускної труби на 365 км ділянки Основа – Букине ПЗ.

З урахуванням результатів дисертаційного дослідження і при особистій участі здобувача розроблені інструктивні документи Укрзалізниці: «Технічні вказівки з контролю електричного опору бетону і 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»; «Відомчі будівельні норми України (проект). Споруди транспорту. Захист будівельних конструкцій та споруд залізничного транспорту від агресивних дій».

Матеріали дисертації використовуються в УкрДАЗТі у навчальному процесі при підготовці спеціалістів та магістрів за спеціальностями «Залізничні споруди та колійне господарство» (спеціалізація «Технічна експлуатація споруд залізничного транспорту») і «Промислове та цивільне будівництво» (спеціалізація «Утримання та реконструкція будівель залізничного транспорту»): у лекційних курсах, на лабораторних і практичних заняттях, у дипломному проектуванні.

Економічний ефект від впровадження результатів досліджень обумовлений виконанням капітального ремонту в поєднанні з захистом від електрокорозії пошкоджених конструкцій замість їх повної заміни і складає 188 тис. грн. Соціальний ефект від впровадження полягає у підвищенні безпеки руху поїздів на ділянках з відремонтованими спорудами.

Особистий внесок здобувача. Основні наукові результати отримані автором самостійно, а також у сумісних теоретичних, експериментальних і експлуатаційних дослідженнях. Огляд літературних джерел за темою дослідження, формулювання наукової гіпотези, більшість фізико-механічних випробувань, електрометричних і фізико-хімічних досліджень, обробка та отримання експериментальних залежностей, розрахунки виконані автором особисто. У співавторстві розроблені методика оцінки небезпеки електрокорозії бетону і розчину в конструкціях, теоретичні уявлення про розчинення портландиту під дією постійного електричного поля, спільно виконані частина фізико-хімічних і експлуатаційних досліджень та впровадження. Творчий внесок автора у спільні публікації відбитий у переліку опублікованих робіт.

Апробація результатів дисертації здійснена на міжнародних конференціях: 17 Internationale Baustofftagung (17 Ibausil), 23-26 September 2009,

Weimar, Bundesrepublik Deutschland; 3-й науково-технічній конференції «Математичні моделі процесів у будівництві (Залізобетонні конструкції і матеріали)», 24-25 березня 2010 р., м. Луганськ; 70♦72 Міжнародних науково-технічних конференціях кафедр Української державної академії залізничного транспорту і фахівців залізничного транспорту, 2008♦10 pp.

Публікації. Основні наукові результати дисертаційного дослідження опубліковані у 9 статтях у виданнях, затверджених ВАК України, у 4 додаткових друкованих працях і 2 патентах на винаходи.

Структура і об'єм роботи. Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, загальних висновків, списку літератури з 141 найменування і містить 148 сторінок основного тексту, 208 рисунків, 22 таблиці, 7 додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність теми, сформульовані мета, завдання досліджень, наукова новизна і практичне значення отриманих результатів, надані відомості про апробацію роботи і публікації, структуру та об'єм дисертації.

У **першому розділі** розглянуті схеми виникнення електричних потенціалів на рейковій колії, електрифікованій постійним струмом, а також конструкціях і спорудах, розташованих на ній або поблизу (мостах, водопропускних трубах, будівлях), при русі поїзда з електричною тягою. Максимальний позитивний потенціал переміщується разом із поїздом, максимальний негативний – прилягає до секційних роздільників (місця підключення до рейок відсмоктувальної лінії тягової підстанції). При видаленні електровоза або електропоїзда від конструкції потенціал зникає, тобто струм є не постійним, а пульсуючим однонаправленим. Надані схеми протікання струмів через конструкції.

Струм, що протікає через конструкцію, визначається потенціалом на рейці і опором ділянки ланцюга «рейка – конструкція», при цьому основний внесок до нього вносять опори рейкових скріплень, шпал, баласту, ґрунту між рейкою і конструкцією, а також самої конструкції і бетону. Узагальнені дані про величини цих опорів. Показано, що найбільший вплив на них мають вологість, міцність бетону, кількість циклів заморожування і відтавання. Звернуто увагу на зменшення опору бетону в результаті поперемінного заморожування і відтавання.

Виконаний критичний аналіз існуючих уявлень про механізм електрокорозії бетону показав, що більшість учених не визнають електрокорозію бетону в залізобетонних конструкціях як самостійний процес. На відміну від цієї думки, у роботах ряду авторів показано, що в залізобетоні можуть відбуватися процеси

масоперенесення і зміни хімічного і фазового складу цементних матеріалів. Це роботи С.М. Алексеева, А.Ф. Бернацького, Ф.М. Іванова, А.О. Кудрявцева, Ю.І. Міхельсона, В.М. Москвіна, В.Б. Ратінова, О.О. Старосельського, Ю.В. Целебровського, G.H. Anderson, E. Double, G.W. Mole та інших. З розглянутих в цих роботах процесів впливу на бетон постійного електричного поля найбільш вірогідним є, на наш погляд, винесення з бетону іонів Ca^{2+} і OH^- та гідроксиду кальцію.

Важливим явищем, що підтверджує дію постійного електричного поля, є виявлена А.Д. Курушиним із співавторами вимушена поляризація. У дисертації показано, що в дисперсних капілярно-пористих тілах з довгими капілярами, зокрема у бетоні, виявляється поляризація подвійних електричних шарів (ПЕШ) стінок капілярів, на протилежних кінцях капіляра виникають надмірні заряди протилежно заряджених іонів, а уздовж капіляра – електричне поле поляризації. Описаний механізм вимушеної поляризації, виведено рівняння стаціонарного потоку, який забезпечується рівністю електроміграційної сили переміщення протиіонів (ПРІ) f_{em} і сили тертя по лінії ковзання пристінного шару води в капілярі f_{mp} ($f_{em} = f_{mp}$), а також вираз для швидкості v дифузійного потоку при загасанні вимушеної поляризації:

$$\frac{U_{en} \epsilon e}{l_{kan} a^2} \approx \frac{v}{r_{kan}}; \quad v \approx \frac{U_{en} \epsilon e r_{kan}}{l_{kan} a^2} \quad (1)$$

За виразом $T = l_{kan}/v$ оцінено час загасання вимушеної поляризації, який склав близько 6 хв, що відповідає дійсності.

За літературними даними виконано аналіз характеру руйнування обводнених бетонних, залізобетонних і кам'яних конструкцій від дії на них постійного електричного поля від потенціалів рейок; існуючих методик вимірювання потенціалів на конструкціях, методів їх захисту від блукаючих струмів і струмів витоку. Показано, що способи вимірювання, засновані на вимірюванні активного опору і струму, не відображають головний вид провідності струму в бетоні – перенесення ПРІ Ca^{2+} .

У другому розділі наведені характеристики основних матеріалів і методів досліджень. Матеріали використовували стандартні: портландцемент; пісок кварцевий; щебінь гранітний; воду водопровідну; добавку-суперпластифікатор Поліпласт СП-1.

Для вимірювання потенціалів і струмів застосовували сучасні прилади і засоби: цифровий мультиметр Sanwa PC510 (Японія), ПК і ПЗ PC Link. Для вимірювань на бетонній, залізобетонній або кам'яній поверхні застосовували неполяризовуваний мідно-сульфатний електрод, що складається з мідної пластини і просоченої розчином мідного купоросу губки.

Для моделювання дії електричного поля на бетон були сконструйовані спеціальні лабораторні установки і розроблена оригінальна методика досліджень. Після дії електричного поля визначали безнапірну водопроникність

бетону, відкрити пористість, міцність при стиску. Оцінку винесення продуктів розчинення цементного каменю здійснювали шляхом вимірювання pH водного середовища за допомогою pH -метра-іономера «Експерт-001» і скляного електрода ЭСК-10301/7(К80.7).

Фізико-хімічні дослідження цементного каменю виконували за допомогою інфрачервоної спектроскопії, рентгенофазового аналізу, світової і скануючої електронної мікроскопії. ІЧ-спектри отримували за допомогою ІЧ-Фур'є-спектрометра Bruker Alpha, ПК і ПЗ OPUS, рентгенограми $\bar{\kappa}$ за допомогою модернізованого дифрактометра ДРОН-3, ПК і ПЗ DIFWIN1. ІЧ-спектри і рентгенограми відображалися на екрані монітора і записувались у пам'ять ПК. Світлову мікроскопію проводили на аншлифах у відбитому світлі за допомогою бінокулярного мікроскопа МБС-2. Фотознімки отримували шляхом зйомки зображення в окулярі мікроскопа цифровим фотоапаратом з дозволом не менше 3 мегапікселей. Електронно-мікроскопічні дослідження виконували зі сколу цементного каменю за допомогою скануючого електронного мікроскопа JEOL JSM-840 (Японія) з рентгенолокальним аналізатором.

У третьому розділі виконаний статистичний аналіз зносу будівель і споруд на залізницях за даними паспорта ЦБМЕС станом на 01.01.2007 р. Встановлено, що знос будівель та споруд на ділянках залізниць, електрифікованих постійним струмом, значно (у декілька разів) вище, ніж на електрифікованих змінним струмом або неелектрифікованих ділянках.

Виконані дослідження стану будівель, величин потенціалів на рейках, поверхні ґрунту і конструкціях будівель та споруд поблизу електрифікованих колій. Досліджували найбільш близько розташовані до електрифікованих колій будівлі вокзалів ст. Острякове (у 4 м), Саки (10♦12 м), Чистенька (бл.10 м) Придніпровської залізниці, конструкції яких найбільш пошкоджені.

За результатами досліджень, характерними пошкодженнями цих будівель є вилуговування бетону і розчину в кам'яній кладці, тріщини в конструкціях, вогкість і сильні пошкодження штукатурки і стін підвалів. При русі поїзда між потенціалами на рейці U_p і потенціалами на стінах будівель спостерігається лінійна залежність з високою кореляцією. За відсутності поїзда ($U_p \uparrow 0$ В) на стінах будівлі виявлені постійні потенціали у межах 0,4 ♦ 0,7 В.

У загальне коло «рейка $\bar{\kappa}$ земля» послідовно включені такі опори елементів: рейкового скріплення, шпали, баласту, ґрунту, конструкції до вимірюваного місця, конструкції на кінцевій ділянці до землі, відповідно $R_{скр}$, $R_{ш}$, $R_{б}$, $R_{зр}$, $R_{к1}$ і $R_{к2}$. Струм витоку в такому колі

$$I_0 = U_p / (R_{скр} + R_{ш} + R_{б} + R_{зр} + R_{к1} + R_{к2}). \quad (2)$$

Виходячи з цього, величина потенціалу на поверхні конструкції визначається падінням напруги на ній:

$$U_x \approx I_0 \approx R_{к2} \approx \frac{U_p R_{к2}}{R_{скр} \approx R_{ш} \approx R_{б} \approx R_{зр} \approx R_{к1} \approx R_{к2}}. \quad (3)$$

Потенціал в точці ґрунту, розташованій ближче до рейки, значно перевищує потенціали в більш віддалених точках. Згідно з даними вимірювань потенціал на стінах будівель за відсутності поїздів на ст. Чистенька склав +0,62 В, Острякове +0,55 В, Саки +0,5 В. Величинам цих потенціалів відповідає ступінь пошкодження конструкцій будівель: на ст. Чистенька – максимальна, Саки – мінімальна. Встановлено, що ступінь пошкодження конструкцій будівель залежить від відстані будівлі до найближчої колії, стану верхньої будови колії (скріплення, шпал, баласту), покриття і ґрунту між ними, наявності підвалів і заземлень. Ці фактори впливають на величину струму через конструкції будівлі в землю і, відповідно, на величину електричного потенціалу на цих конструкціях.

Для уточнення закономірностей розповсюдження потенціалів в ґрунті виконані дослідження біля водопропускної труби на 365 км ділянки Основа – Букине Південної залізниці. Було відмічено наявність потенціалу на поверхні ґрунту за відсутності поїздів ($U_p \neq 0$ В). При цьому майже весь укіс насипу завдовжки близько 30 м отримав постійний позитивний потенціал, а його нижня частина і основа насипу – негативний. Потенціал на рейці лише зсуває ці потенціали при проходженні поїзда на деяку незначну величину. Це свідчить про те, що потенціали на поверхні ґрунту є індукованими, наведеними поїздами з електричною тягою протягом багатьох років експлуатації. При проходженні поїзда відбувається переміщення ПРІ (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ та ін.) з дифузної частини ПЕШ частинок ґрунту від рейок і узбіччя до основи насипу і далі – дифузія частини цих катіонів у потік води водовідвідними спорудами, через що, поверхня ґрунту біля рейки на узбіччі набуває деякого позитивного потенціалу (за рахунок надмірної кількості ПРІ – катіонів), а в основі насипу – негативний (за рахунок надмірної кількості потенціалвизначальних іонів ПВІ OH^- на частинках ґрунту). У результаті багаторічної експлуатації поляризація накопичується, величина позитивного потенціалу досягає 0,6–0,7 В, а негативного – приблизно удвічі менше. У дощову погоду величина позитивного потенціалу знижується на 20–30 %, негативний потенціал зникає.

Таким чином, постійні струми витоку з рейок призводять до поляризації ґрунту земляного полотна біля водовідвідних споруд (лотків, канав, труб) за рахунок електроміграційних і дифузійних потоків іонів у водонасичений ґрунт і водоток.

Початковими ділянками кола стікання струмів з рейок є верхня будова колії: ділянка «рейка – закладний болт (або анкер) в залізобетонній шпалі» з опором $R_{p-б}$ (R_{p-a}). Наступна ділянка – «закладний болт (анкер) – робоча арматура шпали» $R_{б-ра}$ ($R_{a-ра}$). Остання ділянка – «робоча арматура – земля» $R_{ра-з}$. За даними вимірювань у заводських і експлуатаційних умовах у суху та дощову погоду побудовані криві розподілу опору шпал з клемно-болтовими (КБ) і анкерними (КПП-5 і УС-1) скріпленнями на цих ділянках. Сумарний середній опір кола «рейка – закладний болт – робоча арматура – земля» у дощову

погоду для шпал зі скріпленнями КБ складає $R_{p-з} = 6$ кОм. Середнє значення опору на ділянці «сталеві підкладка – бетон під гумовою прокладкою» складає 142 кОм, мінімальне ≈ 80 кОм. Вимірний опір гумової прокладки перевищував 200 МОм, отже, при справному скріпленні КБ струм витоку проходить поверхнею деталей ізоляції. Відповідний опір залізобетонних шпал зі скріпленнями КПП-5 у дощову погоду складає $R_{p-з} = 2,26$ кОм, що істотно (у 2,7 разу) менше, ніж для скріплень КБ. Середнє значення опору шпал зі скріпленнями УС-1 (з анкером, забитим у шпалі сірчаною мастикою) у дощову погоду набагато вищий. Тільки на ділянці кола «анкер \approx робоча арматура» він складає 10 кОм. Як бачимо, опір УС-1 забезпечує мінімальний струм витоку з рейок і, відповідно, максимальний захист від електрокорозії конструкцій будівель та споруд поблизу електрифікованих постійним струмом ділянок залізниць. Скріплення КПП-5 збільшує небезпеку електрокорозії цих конструкцій і в першу чергу самих залізобетонних шпал, що дійсно спостерігається при експлуатації.

Четвертий розділ \approx експериментально-теоретичний, в якому на основі результатів оригінальних експериментальних досліджень підтверджена основна наукова гіпотеза досліджень, поглиблені основні теоретичні уявлення, розроблені в роботах О.С. Борзяк, про механізм електрокорозії обводненого бетону під дією пульсуючого однонаправленого електричного поля.

Для дослідження впливу на обводнений бетон електричного поля з потенціалами, що змінюються за величиною і режимами вмикання і вимикання, близькими до реальних умов руху поїздів з електричною тягою, були розроблені і виготовлені спеціальні лабораторні установки (рис. 1).

Дослідження проводили на серіях з трьох зразків-кубів з розміром ребра 100 мм бетону міцністю 10 МПа з гідроізольованими бічними гранями. Кожен зразок поміщали в ємність установки (рис. 1). Один із зразків піддавали дії пульсуючого однонаправленого електричного поля і проточної води, два інших витримували без електричної дії у проточній (зразок К1) і стоячій (К2) воді. Дослідження проводили при напрузі 40, 15 і 5 В, що характеризувала значення потенціалів на рейках.

На рис. 2, а наведено графік залежності сили струму I в зразках від часу при тривалій дії пульсуючого однонаправленого електричного поля при 40, 15 і 5 В. Характерно, що в кінці кожного імпульсу (тривалість імпульсу 8 хв) струм був менший, ніж на початку імпульсу. Отже, у кожному циклі відмічалася різниця струмів ΔI , мА. Залежність цієї різниці від часу подана на рис. 2, б. Різниця струмів на початку і кінці кожного циклу дії обумовлена винесенням катіонів Ca^{2+} із зразка бетону через його нижню грань. Постійне винесення підтримується розчиненням $Ca(OH)_2$ під дією електричного струму і потоку води. Було також зафіксовано, що після вимикання джерела живлення різниця потенціалів на електродах зразка не зникає миттєво, а зменшується поступово протягом декількох хвилин з $2,0 \rightarrow 2,4$ до $0,4 \rightarrow 0,6$ В.

Кількість заряду Q , винесеного з досліджуваного зразка, Кл,

$$Q = \sum_{i=1}^n I_i t_i, \quad (4)$$

де I_i – різниця між силою струму в зразку на початку і у кінці циклу, А; t_i – тривалість циклу, с; n – кількість циклів.

За величиною Q згідно з 1-м законом Фарадея визначали масу m $Ca(OH)_2$, винесеного разом із катіонами Ca^{2+} (і аніонами OH^-) із досліджуваного зразка:

$$m = Q \cdot M / F, \quad (5)$$

де M – молекулярна маса $Ca(OH)_2$, 74 г/моль; F – число Фарадея, $9,65 \cdot 10^4$ Кл/моль.

Підставляючи величини I_i і t_i для кожного циклу у вирази (4) і (5), отримали дані для графіків залежності винесених кількості заряду Q , Кл, і m $Ca(OH)_2$ (% від його вихідної кількості) від часу дії електричного поля при 40, 15 і 5 В (рис. 3).

Згідно з графіком на рис. 3, а величина винесеного заряду за 90 діб склала $Q = 8500$ Кл, що відповідає масі винесеного $Ca(OH)_2$ $m = 6,5$ г, або 52 % від його вихідної кількості (рис. 3, б). Швидкість винесення зі зразка $Ca(OH)_2$ при 15 В менше приблизно у 2,5 разу, а при 5 В – у 7 разів, ніж при 40 В, проте і така кінетика винесення значно скоротить термін служби конструкції з бетону. У результаті винесення портландиту зменшується кількість електрогетерогенних контактів і, відповідно, знижується міцність бетону, а також збільшується його проникність і втрачаються захисні властивості щодо арматури.

Згідно з графіком на рис. 3, б, на 90-у добу дії електричного поля при напрузі 5 В винесення $Ca(OH)_2$ склало 6,4 % від вихідної кількості. Враховуючи лінійний характер розчинення $Ca(OH)_2$ при такій напрузі, його повне винесення відбудеться приблизно за 1300 діб, всього потенційно можливого $Ca(OH)_2$ – за 2600 діб, а всіх кристалогідратів – за 5200 діб або 14 років. Стан конструкцій у подібних умовах за такий самий час підтверджує реальність такої швидкості електрокорозії бетону.

Після дії електричного поля при 40, 15 і 5 В на основні зразки бетону, а також витримування в проточній і стоячій воді контрольних зразків К1 і К2 визначали їх масу, пористість, безнапірну водопроникність, міцність. Встановлено, що дія електричного поля при 40 В призвела до значного збільшення пористості і безнапірної водопроникності, а також до втрати маси. Втрата маси зразків практично співпала з розрахунковими значеннями. Міцність бетону в зоні омивання проточною водою після 104 діб дії електричного поля знизилася у порівнянні зі зразком, що знаходився у проточній воді без електричного впливу, на 16 %, а в стоячій воді – на 18 %. Результати експериментів переконливо свідчать про значну інтенсифікацію вилуговування під впливом електричного поля навіть при 5 В.

Дослідження впливу електричного поля при 40 В виконали для бетону традиційних складів із середньою міцністю 10, 20 і 30 МПа (відповідає класам В7,5, В15 і В22,5 відповідно), а також для бетону оптимального складу. Тривалість дії поля складала 1000 год, кількість імпульсів – 3500 (рис. 4). Міцність бетону всіх складів під впливом електричного поля при 40 В істотно зменшувалася, окрім бетону оптимального складу, міцність якого залишалася практично незмінною.

Згідно з рис. 4, *a* величина струму залежить від міцності і складу бетону: у бетоні традиційного складу невисоких класів він складає близько 100 мА/дм², у бетоні оптимального складу \bar{I} близько 19 мА/дм². За виразами (4) і (5) і даними про струм на початку і в кінці кожного циклу отримали дані для графіків залежності маси *m* винесеного із зразків $Ca(OH)_2$ від часу *t* безперервної дії на зразок пульсуючого однонаправленого електричного поля (рис. 4, *b*). Як видно з рис. 4, *b*, графіки залежності маси винесеного $Ca(OH)_2$ від тривалості дії поля наближаються до ламаних, що складаються з трьох лінійних ділянок різного нахилу. При цьому точки перелому незалежно від міцності бетону спостерігаються в однаковий час – через близько 300 і 600 год.

Згідно з рис. 4, *b* маса винесеного $Ca(OH)_2$ зменшується зі збільшенням класу бетону і, відповідно, витрат цементу. Така залежність є аномальною. Припущено, що така особливість може бути обумовлена розчиненням всіх блоків портландиту одночасно з однаковою швидкістю у бетонах всіх складів. При цьому початок і кінець їх розчинення повинні співпасти для бетонів з різною міцністю. Відповідно до даного припущення розроблені теоретичні уявлення про механізм розчинення портландиту під впливом пульсуючого однонаправленого електричного поля, представлена схема прошарку продуктів гідратації з кристалогідратів портландиту (*КГ*) і гідросилікатного гелю (*Г*) між ділянками силікатів кальцію на поверхні не до кінця гідратованих частинок цементу (рис. 5).

Блоки $Ca(OH)_2$ на цих схемах мають ПЕШ з позитивними ПВІ Ca^{2+} і негативними ПРІ OH^- , а частинки гелю гідросилікату – навпаки, ПВІ OH^- і ПРІ Ca^{2+} . При кожному імпульсі поля іони OH^- прагнуть переміститися у бік позитивного полюса, тобто у бік повітряного середовища, а Ca^{2+} \bar{I} у бік негативного полюса, тобто до води. Електроміграційна сила f_{em} такого переміщення визначається виразом

$$f_{em} = \frac{U \cdot z_{Ca^{2+}} \cdot e}{h} \cdot n \cdot V \cdot \cos^2 \varphi. \quad (6)$$

Струм через бетон протікає за рахунок перенесення Ca^{2+} із ПЕШ частинок гелю, потім порами за межі зразка. При цьому винесення може відбуватися по кожній частинці гелю у всіх рядах всіх прошарків. У результаті загальний струм у зразку буде залежати від кількості блоків у прошарку (рис. 5). Серед досліджених бетонів найбільша кількість рядів блоків \bar{I} у бетоні міцністю 10

МПа ($B/C = 1,2$), найменша – у бетоні оптимального складу ($B/C = 0,3$), що відповідає графікам на рис. 4, б.

Після виходу з вершини блока кристала катіона Ca^{2+} один з найближчих катіонів переходить на його місце (рис. 6). Цей перехід викликає зсув всього шару гідратованих ПВІ та адсорбційного шару води на поверхні всіх граней блока на середню відстань $a_{к2}$. Проте цьому перешкоджає в'язкісне тертя між адсорбційним шаром і найближчим шаром води, сила якого визначається виразом

$$f_{mp} = 6S_{sp} \frac{v}{(r_{Ca^{2+}} + d_{H_2O})} = 6l^2 b^2 \frac{v}{(r_{Ca^{2+}} + d_{H_2O})}. \quad (7)$$

При цьому встановлюється стаціонарний потік зі швидкістю v при рівності сил $f_{em} = f_{mp}$, з якого швидкість переміщення v найближчого ПВІ на відстань $a_{к2}$ (до ребра блока) визначається рівнянням

$$v = \frac{U \cdot e \cdot (r_{Ca^{2+}} + d_{H_2O})}{6h \cdot l^2 \cdot b^2} \cdot n \cdot \cos^2 \theta, \quad (8)$$

де n – кількість ПВІ Ca^{2+} на грані блока, що визначається як частка площі грані і площі, що займає один ПВІ.

При підстановці відповідних даних для портландиту $v = 1,24 \cdot 10^{-6}$ м/с тривалість відриву ПВІ від блока, що визначається тривалістю переміщення уздовж ребра кожного із ПВІ на відстань між ними $a_{к2}$, складає $\tau = a_{к2} / v = 2,98 \cdot 10^3$ с. Кількість молекул $Ca(OH)_2$ у блоці портландиту розміром 270 нм дорівнює $N = b^3 \cdot \rho_{KT} \cdot N_A / M = (2,7 \cdot 10^{-7})^3 \cdot 2,24 \cdot 10^6 \cdot 6,02 \cdot 10^{23} / 74 = 3,59 \cdot 10^8$. Відповідно загальний час розчинення блока портландиту під дією поля складає $T = \tau \cdot N = 2,98 \cdot 10^3 \cdot 3,59 \cdot 10^8 = 297$ год. Це відповідає перелому кривих на рис. 4, б, підтверджуючи коректність розроблених уявлень про механізм і кінетику розчинення портландиту в цементному камені бетону при його електрокорозії.

Згідно зі схемами прошарків на рис. 5, а і б блоки портландиту в середніх рядах прошарку розчиняються по всіх чотирьох гранях, а блоки, прилеглі до поверхні частинок цементу, – тільки по двох (рис. 5, в). З урахуванням цього швидкість розчинення останніх повинна бути удвічі нижча, ніж блоків у середині прошарку. Отже, у період від 300 до 600 год відбувається розчинення блоків портландиту, прилеглих до поверхні частинок цементу (рис. 5, в).

Вилуговування бетону досліджуваним полем підтверджене шляхом вимірювання рН води, в якій знаходилися зразки. За результатами вимірювань, кожен електричний імпульс збільшував концентрацію іонів OH^- у воді в декілька разів. Руйнівна дія на бетон пульсуючого однонаправленого електричного поля підтверджена також результатами рентгенофазового аналізу, аналізу інфрачервоних спектрів поглинання. Згідно з результатами цих

досліджень чим вища напруга і чим нижча міцність бетону, тим інтенсивніша руйнівна дія поля.

За даними досліджень, за допомогою світлової і скануючої електронної мікроскопії у бетоні з нижньої зони зразків міцністю 10 МПа, які піддавались дії досліджуваного поля при 40 В, оголені частинки піску, продукти гідратації складаються з гідросульфоалюмінатів і гідроалюмінатів кальцію (кубічних і гексагональних). Їх округлість свідчить про часткове розчинення цих фаз. Зустрічається еtringіт у вигляді довгих і коротких голок. Спостерігаються також глобули гідросилікатів кальцію, між якими розподілені у великій кількості крупні пори – результат вилуговування портландиту. Електронні мікрофотографії бетону оптимального складу зі зразків, що знаходилися без електричної дії в стоячій воді, і зразків, які піддавались дії поля при 40 В і проточної води, не мають відмінностей, що свідчить про електрокорозійну стійкість цього бетону.

П'ятий розділ присвячений впровадженню й експлуатаційній перевірці результатів досліджень. Основними результатами впровадження є розроблені і впроваджені способи і конструкції з комплексного захисту від електрокорозії бетонних, залізобетонних і кам'яних конструкцій, зокрема металоін'єкційна сорочка з поляризованим заземленням на двох найбільш зруйнованих кільцях аварійної водопропускної труби на 19 км ділянки Харків – Люботин Південної залізниці; сталобетонна обойма, заземлена у ґрунт, на зруйнованому електрокорозією залізобетонному поясі опори моста на 284 км ділянки Основа – Букине ПЗ; залізобетонна сорочка з бетону оптимального складу на найбільш зруйнованих ділянках аварійної водопропускної труби на 365 км ділянки Основа – Букине ПЗ. За наслідками експлуатаційних випробувань всіх трьох способів і конструкцій комплексного захисту від електрокорозії бетонних і кам'яних конструкцій труб і мостової опори (3+6 років) ознак електрокорозії у сталевих оболонках сорочки і обойми, бетоні або кам'яній кладці не виявлено. Крім того, за наслідками дисертації розроблено 4 галузевих нормативних документи Укрзалізниці, отримано 2 патенти України на винаходи. Сумарний економічний ефект від впровадження рекомендацій по дисертації склав 188 тис. грн. Матеріали дисертації використовуються у навчальному процесі.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. У результаті статистичного аналізу експлуатаційної документації встановлено, що знос будівель і споруд на електрифікованих постійним струмом ділянках залізниць значно вищий, ніж на електрифікованих змінним струмом або неелектрифікованих ділянках.

2. Виконані натурні дослідження показали, що синхронно з проходженням поїздів з електричною тягою постійного струму на рейках, поверхні ґрунту і конструкціях будівель і споруд, розташованих поблизу колії, виникає

пульсуючий однонаправлений електричний потенціал. Його величина на конструкціях, а також ступінь їх пошкодження залежать від величини потенціалу на рейках, відстані до них, стану верхньої будови колії, ґрунту і покриття на ньому, наявності підвалів і заземлень. Потенціал на конструкціях досягає +1,7 В і більше, причому пошкодження в них частіше відмічаються при потенціалі, що перевищує +1 В.

3. Встановлено, що в результаті багаторічної експлуатації поверхня ґрунту біля залізничної колії поляризується $\bar{\varphi}$ на узбіччі біля рейок відмічається позитивний потенціал величиною до 0,7 В, в основі насипу – негативний до $\bar{\varphi}$ 0,3 В. Поляризація обумовлена електроміграційним стіканням катіонів Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ та ін. із дифузної частини подвійних електричних шарів частинок ґрунту і їх винесенням потоком води по водовідвідних спорудах.

4. Виконані дослідження електричного опору залізобетонних шпал із різними типами скріплень показали, що шпали з анкерними скріпленнями (КПП-5) характеризуються значно меншим опором, ніж з клемно-болтовими скріпленнями (КБ). Менший опір шпал призводить до їх прискореного руйнування, а також інтенсивнішого пошкодження конструкцій поблизу електрифікованої колії.

5. У результаті оригінальних експериментальних досліджень встановлено, що тривала (близько 3000 год) дія на бетон пульсуючого однонаправленого електричного поля викликає в ньому електричний струм, що змінюється у часі. Спочатку струм максимальний і залежить від напруги (досягає 100 мА/дм² при 40 В), потім з кожним імпульсом зменшується і через близько 1500 год досягає значень менше 5 мА/дм², близьких для різної напруги. При зникненні зовнішнього поля у бетоні залишається викликана поляризацією напруга близько 2,5 В, що також поступово зменшується. Зразки бетону традиційного складу з різними міцністю і V/C , що піддалися дії такого поля і проточної води, характеризувалися істотною втратою міцності і маси, збільшенням пористості і безнапірної водопроникності. Втрата міцності і маси бетону оптимального складу (з оптимальними значеннями коефіцієнтів розсунення заповнювачів ϵ_{onm} , ν_{onm} і V/C_{onm}) не відмічались. Втрата міцності і маси всіма зразками, що знаходилися у воді без електричного поля, не відмічались.

6. Експериментально встановлено, що в результаті тривалої дії на бетон пульсуючого однонаправленого електричного поля відбувається розчинення портландиту $Ca(OH)_2$ і його винесення з бетону. Кількість винесеного $Ca(OH)_2$ за 90 діб дії поля при 40 В склало 52 % від його початкової кількості. Швидкість винесення $Ca(OH)_2$ при 15 В приблизно у 2,5 разу, а при 5 В – у 7 разів менше, ніж при 40 В. Виведено теоретичне рівняння залежності кількості винесеного $Ca(OH)_2$ (за величиною винесеного заряду) від напруги і тривалості дії, яке узгоджується з експериментальними даними. Винесення $Ca(OH)_2$ обумовлює зниження міцності і маси, збільшення пористості і безнапірної водопроникності

бетону, а також втрату ним захисних властивостей відносно арматури, її корозію й утворення тріщин у захисному шарі.

7. Надано опис механізму розчинення і винесення портландиту під дією пульсуючого однонаправленого електричного поля. Таке поле викликає одночасне розчинення одразу всіх блоків портландиту в цементному камені так, що загальна тривалість їх розчинення відповідає часу розчинення одного блока. При кожному імпульсі поля відбувається винесення потенціалвизначальних іонів Ca^{2+} у бік негативного полюса і далі з конструкції. Отримано рівняння стаціонарного потоку іонів Ca^{2+} , обумовленого рівнодіючою електроміграційної сили, що виштовхує їх з ребер блоків кристалів, і сили в'язкісного тертя адсорбційного шару води на поверхні граней блоків, з якого отримані рівняння швидкості перенесення $Ca(OH)_2$ і тривалість розчинення портландиту.

8. Фізико-хімічні дослідження (рН-метрія, рентгенофазовий аналіз, інфрачервона спектроскопія, світлова і скануюча електронна мікроскопія) бетонів різного складу, що піддалися дії досліджуваного поля, підтвердили коректність поданого механізму електрокорозії бетону, а також електрокорозійну стійкість бетону оптимального складу.

9. Розроблені комплексні способи захисту від електрокорозії бетонних, залізобетонних і кам'яних конструкцій, у т.ч. за допомогою металоін'єкційної сорочки з поляризованим заземленням; сталобетонної обойми, зануреної у дно водотоку на глибину, при якій щільність струму, що стікає крізь неї в ґрунт, набагато менша небезпечної величини $0,6 \text{ mA/dm}^2$; залізобетонної сорочки з бетону оптимального складу. Комплексні способи захисту від електрокорозії впроваджені при капітальному ремонті споруд Південної залізниці. Результати досліджень використовуються у навчальному процесі УкрДАЗТу при підготовці спеціалістів і магістрів будівельних спеціальностей.

10. Економічний ефект від впровадження результатів досліджень склав 188 тис. грн. Він обумовлений виконанням капітального ремонту споруд у поєднанні із захистом від електрокорозії замість повної заміни пошкоджених конструкцій новими, а також збільшенням міжремонтних термінів.

Основні результати дисертації викладені в роботах:

1. 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, 2007.- Вип. 42.- С. 112-119. *Особистий внесок*: вимірювання електричного потенціалу на рейках та металоін'єкційній обоймі.

2. 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, 2008.- Вип. 47.- С. 179-184. *Особистий внесок*: розробка лабораторної

установки для моделювання електричної дії та обводнення на бетон, вимірювання рН водного середовища, в якому знаходиться бетонний зразок.

3. Дослідження можливості виробництва залізобетонних шпал за безпропарувальною технологією / А.А. Плугін, А.М. Плугін, О.В. Романенко, В.О. Яковлев, О.С. Борзяк, О.А. Плугін, О.А. Дудін // Зб. наук. праць.- Харків: УкрДАЗТ, 2008.- Вип. 91.- С. 211-224. *Особистий внесок*: визначення оптимального складу бетону залізобетонних шпал та оптимального вмісту добавок електролітів для прискорення твердіння бетону без зниження його електричного опору (спільно з О.В. Романенком).

4. 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 // Вісник НТУ «ХП».- Харків, 2009.- № 40.- С. 88-104. *Особистий внесок*: проведення експериментальних досліджень потенціалів на рейках, конструкціях та спорудах (спільно з О.А. Дудінім), проведення експериментальних досліджень електричних характеристик бетону в лабораторних умовах.

5. Плугин Ал.А. Связь аварийности конструкций с токами утечки на электрифицированных участках железных дорог / Ал.А. Плугин, Я.В. Гавриленко, Е.В. Дульцев // Зб. наук. праць.- Харків: УкрДАЗТ, 2009.- Вип. 103.- С. 218-222. *Особистий внесок*: аналіз стану конструкцій та споруд, які піддаються електрокорозійному пошкодженню, визначення ступеня їх пошкодження, розробка еквівалентної електричної схеми протікання блукаючих струмів крізь конструкції та споруди, що руйнуються.

6. 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 // Зб. наук. праць.- Харків: УкрДАЗТ, 2009.- Вип. 109.- С. 131-143. *Особистий внесок*: аналіз даних анкетування відомств Укрзалізниці (спільно з А.М. Плуґінім і А.А. Плуґінім), проведення експериментальних досліджень електричних потенціалів на рейках, поверхні ґрунту, а також будівлях та спорудах (спільно з О.С. Борзяк та О.А. Дудінім), розробка схеми натікання блукаючих струмів на конструкції будівель та споруд поблизу електрифікованих ділянок колії.

7. Электрическое сопротивление железобетонных шпал с различными типами рельсовых скреплений / А.Н. Плугин, Ал.А. Плугин, А.А. Дудин, А.А. Плугин // Харків: УкрДАЗТ, 2009.- Вип. 111.- С. 245-261. *Особистий внесок*: проведення експериментальних досліджень електричного опору залізобетонних шпал (спільно з О.А. Дудінім), аналіз даних про вплив різних факторів на опір.

8. 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. 197-211.

Особистий внесок: розробка лабораторної установки і методики вимірювань; виконання електрометричних вимірювань (спільно з О.А. Дудіним) та фізико-механічних випробувань (спільно з О.А. Дудіним і О.А. Конєвим).

9. Механизмы формирования структуры, прочности и долговечности стали и железобетона на основе электроповерхностного потенциала простых веществ / А.Н. Плугин, А.А. Плугин, Д.А. Плугин, Л.В. Трикоз, Ал.А. Плугин, А.А. Дудин // Науковий вісник ЛНАУ.- Луганськ, 2010.- Вип. 14.- С. 250-271. *Особистий внесок:* розробка механізму розчинення заліза під дією латерального електроповерхневого відштовхування (спільно з А.М. Плуґіним і А.А. Плуґіним), розрахунки рівноважних розмірів блоків.

10. Плугин Ал.А. Исследование влияния величины напряжения пульсирующего однонаправленного постоянного электрического поля на электрокоррозию бетона / Ал.А. Плугин // Зб. наук. праць.- Харків: УкрДАЗТ, 2010.- Вип. 115.- С. 56-67.

11. Плугин Ал.А. Исследование электрокоррозионной стойкости бетона оптимального состава / Ал.А. Плугин, О.А. Калинин // Зб. наук. праць.- Харків: УкрДАЗТ, 2010.- Вип. 115.- С. 67-75. *Особистий внесок:* визначення складу бетону і розробка методики дослідження, проведення експериментальних досліджень і аналіз їх результатів.

12. Дослідження спільної дії вібрації і обводнення на будівлі та споруди станційних комплексів / В.В. Палій, А.А. Плуґін, О.А. Плуґін, О.А. Дудін // Зб. наук. праць.- Харків: УкрДАЗТ, 2009.- Вип. 109.- С. 151-163. *Особистий внесок:* вимірювання характеристик вібраційних коливань конструкцій та споруд, які розташовані поблизу електрифікованих ділянок залізничної колії (спільно з О.А. Дудіним), оцінка ступеня пошкодження конструкцій від спільної дії електричного струму, обводнення та вібрації.

13. Research of influence of leakage currents and stray currents on railways on buildings and constructions / A.N.Plugin, A.A.Plugin, O.Plugin, O.Dudin, O.Borzyak // 17 Internationale Baustofftagung, 23-26 September 2009, Bundesrepublik Deutschland: Tagungsbericht.- Weimar, 2009.- Band 2.- P. 1151-1156. *Особистий внесок:* проведення експериментальних досліджень потенціалів на рейках, конструкціях та спорудах (спільно з О.А. Дудіним), проведення експериментальних досліджень електричних характеристик бетону в лабораторних умовах.

14. Пат. 87795 UA МПК С04В28/26 Е01С 21/00. Рідкоскляна композиція / А.А. Плуґін, А.М. Плуґін, О.С. Герасименко, Л.В. Трикоз, С.В. Мірошніченко, О.А.Калінін, Д.А.Плуґін, О.А.Дудін, В.А.Лютій, О.А.Плуґін; Заявник та патентовласник УкрДАЗТ.- №а200811931; заявл. 07.10.2008; опубл. 10.08.2009, Бюл. №15. *Особистий внесок:* дослідження властивостей рідкоскляної композиції і формулювання вимог для її використання як гідроізоляційного та електроізоляційного екрана для обводнених конструкцій.

15. Пат. 88998 UA МПК E04B1/66, E04B1/62. Спосіб визначення електрокорозійної стійкості захисних покриттів / 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; Заявник та патентовласник УкрДАЗТ.- №а200811897; заявл. 07.10.2008; опубл. 10.12.2009.- Бюл. №23. *Особистий внесок*: перевірка і застосування способу визначення електрокорозійної стійкості захисних покриттів для оцінки якості і довговічності електрокорозійного захисту бетонних та залізобетонних конструкцій за допомогою металоін'єкційної обойми з нанесеним на неї захисним покриттям.

АНОТАЦІЯ

Плугін Олексій Андрійович. Вплив постійного струму на бетон обводнених конструкцій та споруд, розташованих поблизу електрифікованих залізничних колій. Рукопис.

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

Дисертація присвячена експериментально-теоретичним дослідженням впливу пульсуючого однонаправленого струму витoku на електрокорозію бетону і розчину бетонних, залізобетонних і кам'яних конструкцій поблизу електрифікованих постійним струмом ділянок залізниць. Встановлено, що знос будівель і споруд на ділянках залізниць, електрифікованих постійним струмом, значно вищий, ніж на ділянках, електрифікованих змінним струмом, або неелектрифікованих. Виконані дослідження потенціалів на рейках, поверхні ґрунту і конструкціях будівель при проходженні поїздів з електричною тягою. Встановлено, що потенціали виникають синхронно з проходженням поїздів, їх величина і, отже, ступінь пошкодження конструкцій будівель і споруд залежать від відстані до найближчої електрифікованої колії, стану підрейкової основи, стану покриття і ґрунту між ними, наявності підвалів і заземлень. У результаті багаторічної експлуатації поверхня ґрунту поблизу залізничної колії поляризується $\bar{\kappa}$ на узбіччі біля рейок виникає позитивний потенціал, в основі насипу – негативний. Розкритий механізм цієї поляризації.

За допомогою оригінальної методики виконані тривалі експериментальні дослідження впливу пульсуючого однонаправленого електричного поля при різній напрузі на бетони різного складу та міцності. Розроблені теоретичні уявлення про механізм розчинення і виносу портландиту під дією вказаного поля, згідно з яким воно викликає одночасне розчинення одразу всіх блоків кристалів портландиту так, що загальна тривалість розчинення орієнтовно дорівнює тривалості розчинення одного блока. Виведене рівняння швидкості розчинення портландиту в цементному камені. Виконані фізико-хімічні дослідження бетонів різних складів підтвердили коректність теоретичних

уявлені про механізм електрокорозії бетону, а також довели, що бетон оптимального складу є електрокорозійностійким. Розроблені і впроваджені комплексні способи захисту від електрокорозії бетонних, залізобетонних і кам'яних конструкцій.

Ключові слова: електрифікована залізниця, постійний струм, бетон, цементний камінь, обводнення, електричне поле, електрокорозія, вилуговування, захист.

АННОТАЦІЯ

Плугин Алексей Андреевич. Влияние постоянного тока на бетон обводненных конструкций и сооружений, расположенных вблизи электрифицированных железнодорожных путей. 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 экспериментально-теоретическим исследованиям влияния пульсирующего однонаправленного постоянного тока утечки на электрокоррозию бетона и раствора бетонных, железобетонных и каменных конструкций вблизи электрифицированных постоянным током участков железных дорог. Установлено, что износ зданий и сооружений на участках железных дорог, электрифицированных постоянным током, значительно выше, чем на участках, электрифицированных переменным током, или неэлектрифицированных. Выполнены исследования в эксплуатационных условиях. Измерены величины потенциалов на рельсах, на поверхности грунта и конструкциях зданий при прохождении поездов с электрической тягой, а также при их отсутствии. Установлено, что они возникают синхронно с прохождением поездов с электрической тягой, их величины и, следовательно, степень повреждения конструкций зданий и сооружений зависят от их расстояния до ближайшего электрифицированного пути, состояния подрельсового основания, состояния покрытия и грунта между ними, наличия подвалов и заземлений. В результате многолетней эксплуатации поверхность грунта возле железнодорожного пути, в частности на насыпи и у ее основания, поляризуется $\bar{\epsilon}$ возле рельсов возникает положительный потенциал, у основания насыпи – отрицательный. Раскрыт механизм этой поляризации.

С помощью оригинальной методики и установки, автоматически поддерживающей режим включения и выключения источника постоянного напряжения, близкий к режиму движения поездов, выполнены длительные экспериментальные исследования влияния пульсирующего однонаправленного электрического поля при различном напряжении на бетоны разных составов и прочности. При этом по изменению тока, протекающего во время воздействия поля через образец бетона, определена масса вынесенного из образца $Ca(OH)_2$.

Показано, что даже невысокие напряжения, в частности 5 В, вызывают значительную электрокоррозию бетона.

Разработаны теоретические представления о механизме растворения портландита под влиянием пульсирующего однонаправленного электрического поля, согласно которому исследуемое электрическое поле вызывает одновременное растворение сразу всех блоков портландита, так что общая продолжительность растворения ориентировочно равна продолжительности растворения одного блока. Выведено уравнение стационарного потока катионов Ca^{2+} от блока портландита, уравнения для скорости растворения блока портландита, которое и определяет время растворения исходного портландита в цементном камне.

Выполнены физико-механические и физико-химические исследования бетонов различных составов, подвергнутых воздействию электрического поля (рН-метрия, рентгенофазовый анализ, инфракрасная спектроскопия, световая и сканирующая электронная микроскопия), которые подтвердили корректность теоретических представлений о механизме электрокоррозии бетона. Эти исследования показали также, что бетон оптимального состава является электрокоррозионностойким.

Разработаны комплексные способы защиты от электрокоррозии бетонных, железобетонных и каменных конструкций, в т.ч. с помощью металлоинъекционной рубашки с поляризованным заземлением; сталебетонной обоймы, погруженной в дно водотока на определенную глубину; железобетонной рубашки из бетона оптимального состава.

Ключевые слова: электрифицированная железная дорога, постоянный ток, бетон, цементный камень, обводнение, электрическое поле, поляризация, электрокоррозия, выщелачивание, защита.

ABSTRACT

Plugin Oleksiy A. Influence of the direct current on a concrete of flooded constructions and buildings, located nearby the electrified railway tracks. 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, 2010.

The thesis is devoted to experimentally theoretical research of influence of pulsating unidirectional leakage direct current of different voltage on an electro-corrosion of concrete of different strength and on a mortar of a concrete, reinforced-concrete and stone constructions located nearby the electrified by a direct current railway sections. It is established that the wear of buildings and constructions on a railway sections, electrified by a direct current, considerably higher, than on sections, electrified by an alternating current or non-electrified.

Researches of sizes of potentials on rails, on a surface of ground and constructions of buildings at passing of trains with electric traction, and also at their absence were

realized. Established, that these potentials appear synchronously with passing of trains with electric traction, their sizes and, consequently, damage degree of building structures and constructions, depend on their distance to the nearest electrified track, state of coverage and soil between them, state of foundation under rails, presences of basements and earthed equipment. As a result of a long-term exploitation a surface of a soil near a railway sections, in particular, on an embankment and at its foundation, is polarized $\bar{\kappa}$ near rails is a positive potential, at a foundation of embankment – negative. The mechanism of this polarization is disclosed.

The long-term experimental researches of influence of the pulsating unidirectional direct electric field of different voltage on concretes of different composition and strength with the help of an original method and equipment were done. Theoretical notions of dissolution mechanism of a portlandite under the action of this electric field are developed. In accordance with that mechanism the investigated electric field is caused by a simultaneous dissolution all of portlandite blocks, so that the total duration of dissolution approximately equals the duration of a dissolution of a one block. The equation for the dissolution rate of the portlandite in a cement stone is deduced. Physico-chemical researches of concretes of different compositions confirmed the correctness of the theoretical notions of a mechanism of electro-corrosion of concrete. And also they proved that a concrete of an optimum composition has a high electro-corrosion resistance.

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

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

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

ВПЛИВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ НА БЕТОН ОБВОДНЕНИХ КОНСТРУКЦІЙ ТА СПОРУД, РОЗТАШОВАНИХ ПОБЛИЗУ ЕЛЕКТРИФІКОВАНИХ ЗАЛІЗНИЧНИХ КОЛІЙ

ПЛУГІН Олексій Андрійович

Відповідальний з випуск

Партала Н.М.

Підписано до друку __.__.2010

Формат паперу 60x84 1/16. Папір для розмножувальних апаратів.

Друк офсетний. Умовн.- друк. арк. 0,9.

Замовл. № _____. Тираж 100 прим. Безкоштовно

Видавництво УкрДАЗТу. Свідоцтво ДК № 2874 от 12.06.2007 р.

Типографія УкрДАЗТу: 61050, м. Харків 50, пл. Фейербаха 7