

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УКРАЇНСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

ПЛУГІН ДМИТРО АРТУРОВИЧ

УДК 620.193.7:691.32 (043.3)

**РОЗВИТОК ТЕОРІЇ ЕЛЕКТРОКОРОЗІЇ ОБВОДНЕНИХ
КОНСТРУКЦІЙ І РОЗРОБКА ЕЛЕКТРОКОРОЗІЙНОСТІЙКИХ
МАТЕРІАЛІВ І СПОСОБІВ ЗАХИСТУ**

05.23.05 – будівельні матеріали та вироби

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків – 2014

Дисертацією є рукопис

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

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

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,
Бондар Віктор Олександрович, Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, професор кафедри технології будівельних конструкцій, виробів і матеріалів;

доктор технічних наук, професор,
Нетеса Микола Іванович, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, завідувач кафедри будівельного виробництва та геодезії;

доктор технічних наук, доцент,
Толмачов Сергій Миколайович, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, доцент кафедри технології дорожньо-будівельних матеріалів.

Захист відбудеться « 06 » червня 2014 р. о _____ 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 « » _____ 2014 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради
кандидат технічних наук, доцент

Г.Л. Ватуля

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Значна частина відповідальних бетонних, залізобетонних, кам'яних та металевих конструкцій і споруд з проектними або економічно доцільними термінами служби не менше 100 років, що експлуатуються на електрифікованих ділянках залізниць в умовах часткового обводнення (транспортних тунелів, водопропускних труб, мостів, шляхопроводів тощо), зазнає пошкоджень, перебуває в незадовільному стані і виходить з ладу значно раніше нормативних термінів служби, часто вимагає великих експлуатаційних витрат і невідкладного капітального ремонту. Головними причинами недостатньої довговічності конструкцій з бетону вважають: недосконалість систем забезпечення якості вихідних матеріалів і кінцевого продукту; посилення негативних дій (агресивності середовищ, навантажень); виготовлення бетонів низьких класів за міцністю з цементу високої марки. Однак знання зазначених факторів і причин та спроба їх усунення не сприяли вирішенню проблеми недостатньої довговічності обводнених бетонних і залізобетонних конструкцій, що свідчить про існування інших факторів і причин, до кінця не розкритих, дослідженню яких стосовно до обводнених споруд присвячена дисертація. Таким чином, основною причиною електрокорозійного пошкодження і передчасного зниження довговічності конструкцій бетонних, залізобетонних, кам'яних і металевих споруд є недосконалість теорії міцності і електрокорозії цементного каменю, бетону і сталі та довговічності конструкцій з них, що не дає змоги розробити ефективні способи і матеріали для захисту від електрокорозії. Отже, тема дисертації, яка присвячена розвитку теорії електрокорозії обводнених бетонних, залізобетонних, кам'яних і металевих конструкцій і споруд, що експлуатуються на електрифікованих ділянках залізничної колії, та створенню на цій основі теоретичних і методичних основ їх ефективного захисту від електрокорозії, відновлення та забезпечення надійної експлуатації, є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація виконана на кафедрі «Будівельні матеріали, конструкції та споруди» Української державної академії залізничного транспорту в рамках держбюджетних науково-дослідних робіт: «Розробка теоретичних та експериментальних основ захисту від електрокорозії споруд залізничного транспорту» (№ ДР 0108U000076); «Розробка теоретичних основ та експериментальні дослідження впливу струмів витоків та блукаючих струмів на бетон та розчин бетонних, залізобетонних та кам'яних конструкцій» (№ ДР 0110U002128); «Розвиток теоретичних основ та експериментальні дослідження протизсувних заходів, технологічних рішень і матеріалів» (№ ДР 0112U000420); «Розвиток теоретичних та експериментальних основ визначення складів водонепроникного тріщиностійкого бетону для конструкцій і споруд залізниць» (№ ДР 0113U001030), «Теоретичні та експериментальні дослідження впливу електрокорозійного і напружено-деформованого стану залізничних споруд і колії на їх надійність і безпеку руху» (№ ДР 0113U001031); а також у рамках госпдоговірних НДР, виконаних відповідно до планів НДДКР Укрзалізниці, з Південною залізницею і іншими організаціями.

Мета дослідження – розвиток теорії електрокорозії бетону, залізобетону і сталі в обводнених конструкціях споруд, що експлуатуються на електрифікованих ділянках залізничної колії на основі положень колоїдної хімії, фізико-хімічної механіки дисперсних систем і електрогетерогенних взаємодій у них, і створення на

цій основі комплексу високоефективних матеріалів, конструктивних рішень, способів і технологій захисту від електрокорозії, відновлення і продовження термінів служби конструкцій і споруд.

Наукова гіпотеза:

1. Електрокорозійне руйнування бетону під впливом пульсуючого односпрямованого постійного електричного потенціалу на рейках і конструкціях відбувається за рахунок електроміграційного виносу катіонів Ca^{2+} з капілярів у воду або водонасичений ґрунт під впливом струмів витоку і електричного поля від контактних проводів.

2. Причиною інтенсифікації електрокорозії металевих конструкцій, арматури і бетону в залізобетонних конструкціях прогонових будов шляхопроводів, а також тунелів, на яких закріплена контактна мережа постійного струму, може служити виникнення електростатичного поля в повітрі від потенціалу в контактному проводі, яке індукує протилежний потенціал на поверхні металу конструкцій або арматури. Це викликає необхідність розробки на додаток до звичайного заземлення пристроїв екрануючого захисту.

3. Захист знову зведених і відновлення експлуатованих конструкцій, що руйнуються від електрокорозії, може бути забезпечено за рахунок розроблення та впровадження такого комплексу заходів:

- методики проведення експлуатаційних досліджень електрокорозійної небезпеки бетонних, залізобетонних, кам'яних і металевих конструкцій споруд від дії блукаючих струмів, струмів витоку і електростатичного поля з урахуванням обводнення конструкцій і графіка руху електрорухомого складу (ЕРС);

- комплексного захисту від електрокорозії за рахунок усунення виносу продуктів електрокорозії з тіла конструкції; відводу струмів витоку від підданої електрокорозії підземної і наземної конструкції, зменшення їх обводнення за допомогою протифільтраційної завіси в ґрунті, застосування для виготовлення нових або відновлення експлуатованих конструкцій, що руйнуються від електрокорозії електрокорозійностійкого бетону або розчину оптимального складу з безосадовою з високою відрозтічністю суміші.

Для досягнення мети в роботі поставлені такі **задачі досліджень:**

- виконати аналіз існуючих даних про електрокорозійний стан бетонних, залізобетонних, металевих і кам'яних конструкцій споруд на електрифікованих постійним струмом ділянках залізничної колії;

- виконати критичний аналіз існуючих теоретичних уявлень про механізми електрокорозії бетонних і залізобетонних конструкцій і способи їх захисту від електрокорозії;

- виконати натурні дослідження електрокорозійного стану обводнених бетонних, залізобетонних, кам'яних і металевих конструкцій в експлуатаційних умовах і характеру впливу на них струмів витоку і електричного поля від контактних проводів;

- розробити нові теоретичні уявлення про електрокорозію бетону в обводнених неармованих бетонних і залізобетонних конструкціях;

- виконати комплексні лабораторні дослідження з перевірки нових теоретичних уявлень;

- розробити комплекс високоефективних матеріалів і технологій для захисту обводнених конструкцій від електрокорозії;

- виконати експлуатаційні випробування і впровадити нові матеріали і технології;

- розробити нові нормативні документи щодо забезпечення захисту обводнених

конструкцій від електрокорозії.

Об'єкт дослідження – цементний камінь, бетон і сталь обводнених бетонних, залізобетонних, кам'яних і металевих конструкцій і споруд, які експлуатуються на електрифікованих ділянках залізничних колій і руйнуються, матеріали для захисту і відновлення зазначених конструкцій.

Предмет дослідження – процеси, явища і взаємодії, що визначають структуру, міцність, руйнування, в тому числі електрокорозійне, захист від електрокорозії і довговічність цементного каменю, бетону, залізобетону і сталі в спорудах, що експлуатуються на електрифікованих ділянках залізничної колії в умовах обводнення і впливу на них блукаючих струмів, струмів витоку і електростатичного поля від потенціалу в контактному проводі.

Методи дослідження. Зміну властивостей бетону і сталі, в результаті впливу електричного поля в умовах обводнення, досліджували з використанням комплексу стандартних і оригінальних методів. Фізико-механічні властивості бетону визначалися за стандартними методиками. Фазовий склад цементного каменю в бетоні (вихідному і такому, що піддавався дії електричного поля) і продуктів корозії сталі – за допомогою фізико-хімічних методів: рентгенографічного – за допомогою дифрактометра ДРОН-3 та інфрачервоної спектроскопії – ІЧ-Фур'є-спектрометра Bruker ALPHA. Мікро- та субмікроструктуру цементного каменю і бетонних зразків вивчали за допомогою методу люмінесцентної дефектоскопії та оптичної мікроскопії із використанням біокулярного мікроскопа МБС-2, структурних елементів надмолекулярного рівня – шляхом додаткового збільшення за допомогою сканера і ПЕОМ. Хімічний склад води в комірках з обробленими бетонними зразками – методом *pH*-метрії за допомогою *pH*-метра-мілівольтметра *pH*-150М і *pH*-метра-іономера «Експерт-001», та методом титрування. Електричні характеристики бетону, в тому числі як елементів підрейкових основ, сталевих елементів верхньої будови колії при впливі постійного електричного поля в умовах обводнення, нових конструктивних рішень захисту від електрокорозії конструкцій шляхопроводів, на яких закріплена контактна мережа, – за оригінальними методиками за допомогою спеціально розроблених і виготовлених датчиків і установок. Характеристики поширення електричного поля від струму витоку з рейок на обводнені конструкції та споруди досліджували відповідно до оригінальних методик і схем вимірювань за допомогою цифрових мультиметрів Sanwa PC510, оснащених інтерфейсом з комп'ютером, програмного забезпечення PC Link і спеціально виготовлених датчиків.

Достовірність результатів досліджень забезпечено використанням при теоретичних дослідженнях фундаментальних закономірностей колоїдної хімії і фізико-хімічної механіки дисперсних систем, при експериментальних дослідженнях – одночасно декількох незалежних методів дослідження, а також статистичною обробкою отриманих даних.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Нові теоретичні уявлення:

– про природу струму витоку з рейок на електрифікованій постійним струмом колії, яка полягає в тому, що в дійсності це пульсуючий односпрямований постійний струм;

– про електрокорозійне руйнування цементного каменю в обводненому бетоні, яке полягає в розчиненні під дією пульсуючої напруги блоків портландиту $Ca(OH)_2$,

зменшенні при цьому концентрації електрогетерогенних контактів з одиничними контактами між катіонами Ca^{2+} і аніонами OH^- , виникненні за рахунок цього надлишкових електрогетерогенних контактів між частинками об'ємного гелю і відштовхування між ними, що обумовлює виникнення внутрішніх напружень розтягування;

– про залежність електрокорозійної пошкоджуваності залізобетонних опор контактної мережі від гігантських за величиною надлишкових природних та антропогенних зарядів;

– про ємнісну провідність бетону, зумовлену його гігантською діелектричною проникністю, що в умовах пульсуючого односпрямованого постійного струму створює порівнянну з активною і навіть перевищуючу її ємнісну провідність $2\pi fC$.

2. Нові уявлення про основні механізми:

– формування міцності і електрокорозії сталі, у т.ч. рейок, з урахуванням її мікро- і субмікроструктури, згідно з яким під впливом зовнішнього електричного потенціалу на поверхні блоків і зерен сталі виникає додатковий електроповерхневий потенціал, що призводить до збільшення на поверхні феритового блоку (зерна) латерального електроповерхневого відштовхування між потенціалвизначальними іонами, що спричинює електрокорозію сталі;

– аномально високих корозійних руйнувань у конструкціях тунелів на неелектрифікованих і електрифікованих ділянках колії, механізм яких обумовлений існуванням надлишкового позитивного заряду у вміщуючих ґрунтових масивах і в конструкціях тунелю у зв'язку з його великим заглибленням або розташуванням на узбережжі в оточенні морської затоки з декількох боків;

– руйнування легких економічних висячих і великих залізобетонних мостів через великі річки, механізм якого пов'язаний з накопиченням після будівництва моста надлишкових негативних зарядів величезної величини, що переходять з dna річки на його конструкції, викликаючи в них великі розтягувальні напруги і перехід пружних властивостей матеріалів в еластичні.

3. Нові уявлення про протікання електрокорозійних струмів через бетонні та залізобетонні конструкції, в тому числі для опор контактної мережі, обробки тунелів, високих пасажирських платформ, звичайних шляхопроводів і мостів, висячих зруйнованих і аномально коливних мостів.

4. Вперше встановлена залежність електрокорозійного руйнування бетонних і залізобетонних конструкцій пасажирських платформ від їх відстані до водойми або водотоку.

Практичне значення отриманих результатів полягає в розробленні та впровадженні комплексу нових методик проведення експлуатаційних досліджень електрокорозійної небезпеки бетонних, залізобетонних, кам'яних і металевих конструкцій споруд, а також високоефективних матеріалів і технологій для захисту від електрокорозії і забезпечення несучої здатності і високої довговічності обводнених конструкцій з бетону, залізобетону, кам'яної кладки і сталі, що експлуатуються на електрифікованих ділянках залізничної колії.

Зазначені матеріали і технології були успішно реалізовані при відновленні і підсиленні аварійних мостів, водопропускних труб і пасажирських платформ за планами капітального ремонту Південної залізниці та ряду інших організацій, а також при розробленні таких відомчих нормативних та інструктивних документів: – технічні вказівки до захисту конструкцій мостів від корозії, що виникає від

блукаючих струмів; – 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; – рекомендації із захисту від корозії елементів верхньої будови колії в залізничних тунелях; – рекомендації із захисту від електрокорозії конструкцій шляхопроводів, на яких закріплена контактна мережа; – рекомендації із захисту та підсилення конструкцій пасажирських платформ на електрифікованих ділянках залізниць; – рекомендації із закріплення слабких ґрунтів основ будівель та споруд, що експлуатуються на залізницях України; – рекомендації зі зменшення та усунення тріщиноутворення дерев'яних шпал та брусів; – рекомендації із забезпечення тріщиностійкості плит безбаластного мостового полотна, ЦП-0224; – рекомендації з усунення тріщин у стінах будівель станційних комплексів; – рекомендації з улаштування полімеркомпозиційного прокладного шару під збірним та збірномонolitним залізобетонним безбаластним мостовим полотном; – технічні умови «Склади захисні кольорові ЗС-1М і ЗС-3М для бетонних, залізобетонних і металевих конструкцій» ТУ У 45.2-01116472-105:2006; – галузеві будівельні норми України (проект). Споруди транспорту. Захист будівельних конструкцій та споруд залізничного транспорту від агресивних дій.

Матеріали дисертації використовуються в УкрДАЗТ у навчальному процесі при підготовці спеціалістів та магістрів за спеціальностями «Залізничні споруди та колійне господарство» і «Промислове та цивільне будівництво», а також при підвищенні кваліфікації фахівців підприємств залізничного транспорту.

Основний економічний ефект від розробок за дисертацією за період впровадження склав 2 803 745 грн. Він обумовлений виконанням капітального ремонту в поєднанні із захистом від електрокорозії споруд замість повної заміни пошкоджених конструкцій новими, а також збільшенням міжремонтних термінів.

Особистий внесок здобувача. Огляд існуючих уявлень щодо досліджуваних питань, розроблення теоретичних розділів дисертації – формулювання наукових гіпотез, висновки залежностей, відповідні розрахунки і т.д. виконані автором особисто. Експериментальні і натурні дослідження та впровадження результатів досліджень виконані спільно із співавторами публікацій. Участь автора у спільних публікаціях відображено в переліку опублікованих робіт.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися на конференціях і семінарах: 45-й Міжнародний семінар по моделюванню и оптимизации композитов МОК'45 (Одеса, 28 – 29 квітня 2006 р.); Aktualne problemy naukowo-badawcze budownictwa: VIII Konferencje Naukowo-Techniczna (Польща, Ольштин, 18 – 20 травня 2006 р.); 6-й Український міжгалузевий науково-практичний семінар «Сучасні проблеми проектування, будівництва та експлуатації споруд на шляхах сполучення» (Київ, 26 – 28 червня 2006 р.); Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні проблеми проектування, будівництва та експлуатації споруд на шляхах сполучення» (Київ, 21 – 23 червня 2007 р.); 2-га науково-технічна конференція «Математичні моделі процесів в будівництві» (Залізобетонні конструкції та матеріали) (Луганськ, 29 – 30 березня 2007 р.); Школа-семінар «Протирозмивні заходи. Використання залізобетонних габіонних конструкцій»

(Коломия, 29 – 30 вересня 2010 р.); 7 International Conference on Bridges across the Danube 2010. «Theory and practice in bridge engineering» (Болгарія, Софія, 14 – 15 жовтня, 2010 р.); Школа-семінар «Відновлення інженерних споруд в умовах щільної міської забудови» (Белгород-Дністровський, 6 – 7 вересня 2011 р.); 18 Internationale Baustofftagung «18 Ibausil» (Німеччина, Веймар, 12 – 15 вересня 2012 р.); Aplikovane vědecke novinky – 2013: IX Mezinar. vědecko-prakt. konf. (Чехія, Прага, 27 липня – 5 серпня 2013 р.); Международная научная конференция «Эффективные композиты для архитектурной геоники» (Росія, Белгород, 18 – 19 вересня 2013 р.); Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы физико-химического материаловедения» (Макіївка, 30 вересня – 4 жовтня, 2013 р.); III-я Международная научно-практическая конференция, посвященная 60-летию БелИИЖТа – БелГУТа «Проблемы и перспективы развития транспортных систем и строительного комплекса» (Білорусь, Гомель, 03 – 04 жовтня 2013 р.); 66 – 75 міжнародних науково-технічних конференціях УкрДАЗТ (Харків 2004 – 2013 рр.).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковані в 50 наукових працях, з яких 30 опубліковано у наукових журналах і збірниках наукових праць у виданнях, рекомендованих ВАК України, в т.ч. 2 монографії; 2 – у виданнях іноземних держав; 3 – у виданнях, які включені до міжнародних наукометричних баз. За результатами досліджень отримано 7 патентів України на винаходи.

Структура дисертації. Дисертація складається зі вступу, 7 розділів, загальних висновків, 5 додатків і викладена на 492 сторінках, які включають 300 сторінок основного тексту, 32 таблиці, 293 рисунки і додатки на 79 сторінках, список використаних джерел з 220 найменувань на 17 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі сформульовані актуальність теми, мета і завдання досліджень, викладені наукова новизна і практична значимість роботи. Відображені основні наукові положення і результати досліджень, які виносяться на захист. Наведено відомості про структуру дисертації, публікації та апробації роботи.

У першому розділі виконаний критичний аналіз існуючих даних і попередні натурні дослідження впливу струмів витоку з рейок і струмів з контактних проводів на електрокорозію рейок і конструкцій обводнених споруд.

Вчені, які зробили найбільший внесок у науку про електрокорозію: О.В. Котельников, С.М. Алексєєв, А.Ф. Бернацький, Ф.М. Іванов, А.О. Кудрявцев, Ю.І. Міхельсон, В.М. Москвін, В.Б. Ратінов, В.І. Бабушкін, О.О. Старосельський, Ю.В. Целебровський, А.М. Плугін, А.А. Плугін, В.О. Бондар, E. Double, G.W. Mole та інші.

В цілому по Україні електрифіковано 41,7 % залізниць, з них постійним струмом 20,5 %. Найбільша кількість таких колій на Придніпровській (56,1 %) і Донецькій (40,8 %), на Одеській і Південно-Західній залізницях таких колій немає.

Критичний аналіз стану конструкцій залізничних тунелів і прийнятої класифікації їх дефектів і пошкоджень свідчать про недосконалість прийнятої класифікації для обводнених тунелів на електрифікованих ділянках колії. На підставі багаторічних досліджень, виконаних кафедрою БМКС, запропоновано III категорію найбільш небезпечних дефектів доповнити такими: – відвалювання нанесених на поверхню конструкцій великих за площею шарів торкретування; – руйнування болтів залізобетонних тубінгів від їх електрокорозії; – втрата щільності

бетону, в т.ч. з наскрізним виносом і вивалами бетону омонолічених ділянок через його вилуговування; – випирання кам'яної обробки всередину тунелю на великих ділянках; – аномальне глибоке до 2-х і більше рядів виколування і випадіння цегли в цегляній кладці склепіння і стін (без ознак істотного морозного руйнування).

Відповідно до існуючої класифікації всі дефекти рейок класифіковані за групами та номерами (№). У цій класифікації вказані також причини виникнення дефектів окремо за їх №. Виконано аналіз причин виникнення дефектів на основі сучасних уявлень про мікроструктуру і електроповерхневі властивості сталі, зокрема розвинених, з урахуванням потенціалів на рейках і струмів витоку з них. Це дозволило припустити, що зазначені вище причини, узагальнені за даними нормативних документів, – це лише наслідок дійсних причин (механізмів) їх виникнення. Дійсними причинами є внутрішні надлишкові (що відрізняються від рівноважних) електроповерхневі потенціали і поверхневі заряди на зернах фериту і в цементитовому прошарку сталі при її виготовленні, а також потенціали на рейці.

На підставі теоретичних досліджень електропровідних властивостей вакууму і повітря за існуючими літературними даними висловлено припущення про те, що існуюче конструктивне рішення ізоляції контактних проводів не забезпечує повну ізоляцію конструкцій від потрапляння на них постійного електричного поля від контактного проводу при пульсуючому режимі руху електрорухомого складу, в результаті чого конструкції піддаються електрокорозії.

Реальність руйнівного впливу високої електричної напруги в контактній мережі на стан наближених до неї металевих і залізобетонних конструкцій мостів впливає з результатів попередніх досліджень, виконаних протягом кількох років.

Виконано попередні натурні дослідження впливу струмів витоку на електрокорозію конструкцій високих пасажирських платформ, водопропускних труб, шляхопроводів і мостів. Згідно з цими дослідженнями висловлена гіпотеза, що найбільш реальною причиною руйнувань цих конструкцій є електрокорозія бетону від постійного струму витоку, пульсуючого в такт з режимом проходження електрорухомого складу (ЕРС).

У другому розділі виконаний критичний аналіз існуючих уявлень про механізми електрокорозії, довговічності та захисту залізобетонних, бетонних, кам'яних та металевих конструкцій і споруд, що експлуатуються на електрифікованих ділянках залізничної колії.

Як відомо, контактна мережа залізниць, електрифікованих постійним струмом, має напругу 3000 В, живиться від тягових підстанцій (ТП), розташованих уздовж залізничних колій через приблизно 20 км, і розділена на окремі секції. Контактна мережа залізничних штучних споруд – великих мостів і тунелів також виділена в окремі секції. Струм, що протікає по рейках, частково стікає через скріплення, шпали та баласт у землю, яка, по суті, є провідником, паралельним рейкам, і розтікається в землі як вздовж колії, так і впоперек. При цьому розрізняють струми витоку і блукаючі струми.

У літературних джерелах дається недостатньо чітке стосовно до конструкцій мостів і тунелів формулювання струмів витоку і блукаючих струмів. Струмом витоку вважаються струми, що стікають з джерела струму, а блукаючими струмами – електричні струми в землі.

Конкретизовано формулювання у вигляді, зручному для аналізу процесів електрокорозії конструкцій, розташованих на коліях і недалеко від них: струми витоку – це струми, що стікають з рейок, переходять через скріплення, шпали,

баласт, насип колії, тобто поширюються до землі; блукаючі струми – струми, що поширюються в землі і в підземних провідних спорудах.

Електрокорозія залізобетонних конструкцій (опори контактної мережі, штучні споруди, а отже, шпали, водопропускні труби, пасажирські платформи, підземні переходи під залізничними коліями та ін.) протікає під впливом струмів витоку.

Ділянка рейкової колії, розташована ближче до позитивного полюса ТП і на якій виникає позитивний потенціал щодо землі, є анодною зоною, а ділянка, ближче розташована до негативного полюса ТП, тобто до кабелю відсмоктування і на якій виникає негативний потенціал, є катодною зоною.

При цьому максимальний позитивний потенціал на рейках переміщається уздовж колії разом з ЕРС, а максимальний негативний потенціал перебуває в місці приєднання до кабелю відсмоктування.

Електрокорозійну небезпеку становить собою істотний позитивний потенціал, що потрапляє на головку рейки, і, відповідно, струм витоку (анодний струм), що виходить з його підошви. Далі він протікає, як зазначалося, через елементи скріплення, шпали і через конструкції штучних споруд у землю або водотік.

На відміну від підземних трубопроводів і кабелів, для залізобетонних і металевих штучних споруд опис протікання струму дається в загальному вигляді, без конкретних схем протікання по конструкціях, недостатньо коректно. Це обумовлено, головним чином, тим, що бетон розглядається як електричний активний опір, набагато порядків більший, ніж опір арматури в залізобетоні, але набагато менший, ніж опір ізоляторів, в результаті чого струми від контактних проводів потрапити на конструкції через повітря не можуть через опір повітря, що вважається нескінченним, і через те, що бетон як такий вважається несхильним до електрокорозії.

Для деяких споруд схеми протікання струму через конструкції надані Котельниковим О.В. і Кудрявцевим А.О., однак для обводнених умов і вони не відображають дійсний шлях їх перебігу.

Це обумовлено тим, що відповідно до наших уявлень цементний камінь у бетоні, а отже, і бетон, особливо сильно зволожений або водонасичений, має гігантську низькочастотну діелектричну дисперсію, при якій його відносна діелектрична проникність досягає мільйонів і більше одиниць. При цьому величина ємнісної складової провідності $2\pi fC$ може бути набагато більшою, ніж активної $1/R$.

Отже, струм у залізобетонних опорах і в поверхневих шарах фундаментів металевих опор, а також в інших обводнених залізобетонних конструкціях протікає за схемами з паралельним з'єднанням активного і ємнісного опору арматури, точніше її захисного шару. При цьому у зв'язку з тим, що арматура на початку експлуатації опори або фундаменту перебуває в лужному середовищі бетону, електрокорозії піддається в першу чергу бетон. З урахуванням викладеного існуючі схеми протікання струмів витоку по конструкціях є, на наш погляд, некоректними для обводнених умов.

Виконано критичний аналіз показників електрокорозійної небезпеки і захищеності конструкцій і споруд. В анодних і знакозмінних зонах підземних і підводних залізобетонних конструкцій оцінюється небезпека руйнування арматури під шаром неушкодженого бетону за значенням середньої щільності струму, який стікає з арматури в бетон і далі в землю, яка є небезпечною при перевищенні $0,6 \text{ мА/дм}^2$.

Для залізобетонних опор контактної мережі оцінку небезпеки електрокорозії проводять за непрямими показниками, в тому числі за величиною струму витoku (середнього) за період вимірювання, який вважається безпечним, якщо не перевищує 40 мА. Для залізобетонних шпал показником можливої небезпеки електрокорозії її арматури вважають відсутність або несправність ізолюючих елементів.

Захист підземних та інших споруд і конструкцій на електрифікованих постійним струмом ділянках колії здійснюють із застосуванням пасивних і активних заходів захисту на самих спорудах. Однак для захисту штучних споруд (мости, тунелі) і опор контактної мережі проводиться лише заземлення конструкцій на рейки, що виконують, як відомо, функції землі. При цьому виконується пряме заземлення або через іскровий проміжок. Однак для складних умов експлуатації всі ці способи пасивного та активного захисту штучних споруд, як впливає з виконаних первинних натурних досліджень, неефективні або малоефективні.

Виконано критичний аналіз існуючих уявлень про вплив наведених струмів від контактної мережі на електрокорозію інженерних споруд і способів їх захисту від електростатичного поля. Вважається, що в просторі навколо ЛЕП наявні заряджені частки повітря і, відповідно, об'ємний заряд і статичні електричні поля (лінії).

Про наявність електричних полів, які генеруються залізничним транспортом, і про реальність провідності зони між контактним проводом і розташованою поруч конструкцією свідчать дані вимірювань, проведених американськими вченими. Вони показали, що в зоні напруженості електричного поля 40 кВ/м цей струм складає $0,003 \div 0,004$ мА.

Виконано критичний аналіз існуючих уявлень про механізм електрокорозії бетону. На відміну від думки більшості вчених про відсутність впливу постійного струму на бетон, деякі дослідники, зокрема О.О. Старосельський, А.Ф. Бернацький, G. Mole, І.В. Стрижевський, G. H. Anderson показали, що поряд з електрокорозією арматури в залізобетоні можуть відбуватися процеси масопереносу і зміни хімічного і фазового складу цементних матеріалів. Критичний аналіз робіт цих авторів, а також В.С. Артамонова, В.Б. Ратінова, В.М. Москвіна, А.Д. Курушина, І.Дж. Ніколаса, В.І. Бабушкіна і інших свідчить про те, що, по суті, теорія електрокорозії обводненого бетону не розроблена.

Виконано критичний аналіз існуючих уявлень про вплив електричного поля на структуру і властивості сталі, що істотно для рейок. Цей аналіз підтверджує реальний вплив струмів на технологічні та фізико-механічні характеристики сталі. Однак існуючі уявлення мають загальний характер, не узгоджуються одне з одним.

У третьому розділі наведено дані про методи досліджень і матеріали, що використовуються в дисертації.

У дослідженнях застосовувались стандартні будівельні матеріали: портландцемент ПЦ І-500 за ДСТУ Б В.2.7-46:2010 виробництва ВАТ «Балцем» (м. Балаклея, Харківська обл.); пісок кварцовий з модулем крупності $1,1 \div 1,2$ за ДСТУ Б В.2.7-32-95 (Безлюдівський кар'єр, Харківська обл.); щебінь гранітний за ДСТУ Б В.2.7-75-98; вода питна водопровідна за ДСанПіН 2.2.4-171-10; сталь листова $\delta = 2$ мм за ГОСТ 19903; провіолока сталева $\varnothing 1,8$ мм за ГОСТ 3282; залізничні рейки типу Р65 за ДСТУ 4344:2004.

Гідроізоляція поверхні випробуваних зразків досягалась застосуванням електрокорозійностійких захисних складів ЗС-3 за ТУ У 01116472.042 або ЗС-3М за ТУ У 45.2-01116472-105:2006.

Для визначення загальної жорсткості води і вмісту іонів Ca^{2+} застосовано реактиви кваліфікації чисті для аналізу (ч.д.а.), вода дистильована.

Для вимірювання напруги і струмів застосовано сучасні прилади і засоби: цифровий мультиметр Sanwa PC510 (Японія), ПК і ПЗ PC Link. Для електричних вимірювань на бетонній або кам'яній поверхні застосовували неполяризовуваний мідно-сульфатний електрод.

Для моделювання дії електричного поля на бетон і сталь були сконструйовані спеціальні лабораторні установки і розроблена оригінальна методика досліджень. Після дії електричного поля визначено безнапірну водонепроникність бетону та міцність при стиску. Оцінку винесення продуктів розчинення цементного каменю здійснено шляхом вимірювання pH водного середовища за допомогою pH -метра-мілівольтметра $pH-150M$, pH -метра-іономера «Експерт-001» і скляного електрода ЕСК-10301/7(К80.7).

Фізико-хімічні дослідження складу продуктів гідратації цементного клінкера, продуктів корозії цементного каменя і сталі виконували за допомогою інфрачервоної спектроскопії, рентгенофазового аналізу, світової і електронної мікроскопії. ІЧ-спектри отримували за допомогою ІЧ-Фур'є-спектрометра Bruker ALPNA, ПК і ПЗ OPUS, рентгенограми – за допомогою модернізованого дифрактометра ДРОН-3, ПК і ПЗ DIFWIN1. Структуру зразків вивчали на різних рівнях методами люмінесцентної дефектоскопії та оптичної мікроскопії. Оптичну мікроскопію проводили на аншліфах у відбитому світлі за допомогою біокулярного мікроскопа МБС-2. Фотознімки отримували шляхом зйомки зображення в окулярі мікроскопа цифровим фотоапаратом з роздільною здатністю не менш 3 мегапікселів.

Четвертий розділ присвячено натурним дослідженням електрокорозії бетону, залізобетону, розчину кам'яної кладки і сталі в конструкціях споруд на електрифікованих ділянках залізничної колії, у тому числі залізобетонних опор контактної мережі, водопропускних труб, високих пасажирських платформ, шляхопроводів, мостів і тунелів.

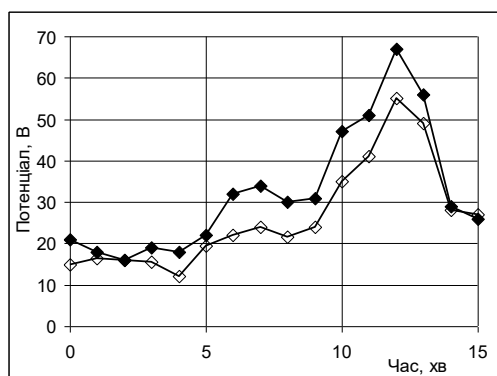
Дослідження електрокорозії неармованого бетону виконані на прикладі водопропускної бетонної труби під високим насипом (18 м) на 365 км ділянки Основа – Букине Південної залізниці і бетонних опор високих пасажирських платформ Харківського вузла Південної залізниці на ділянках, електрифікованих постійним струмом, і на станції Ніжин Південно-Західної залізниці на ділянці, електрифікованій змінним струмом.

Найбільші руйнування бетону в оболонці труби відбулися в блоках, над якими розташовані рейкові колії, і в місці максимального скупчення води на поверхні насипу (перехід між існуючою і добудованою частинами труби), що свідчить про електрокорозійний механізм руйнування бетону. Характерними електрокорозійними ушкодженнями і руйнуваннями для досліджуваної та інших бетонних труб є тріщини в стінах і бетонних оголовках труби, осипання бетону зі стін і наскрізні виноси зруйнованого бетону в їх нижній частині, в результаті чого сильно змінюється перетин труби.

Встановлено, що максимальна величина потенціалів на рейках досягає 70 В, вони проявляються протягом 5 ÷ 10 хвилин при проходженні електрорухомого

складу в зоні труби (рис. 1). За результатами лабораторних випробувань зразків-кернів, відібраних з труби, бетон має максимальну міцність при стисненні – в середині стінки, мінімальну – із зовнішньої сторони труби, і ще менше – зсередини (рис. 2). Середнє значення міцності бетону склало 7,4 МПа. Як показав проведений розрахунок, наявні пошкодження є небезпечними, вони знижують несучу здатність конструкції труби, що може призвести до її завалу.

Потенціал на рейці призводить до струму витоку з неї через рейкове скріплення, баласт, насип, який потрапляє в конструкції труби і з боків від насипу розтікається по поверхні ґрунту. Віддаляючись від рейок, його величина зменшується. До відстаней від рейки 30 ÷ 40 м потенціал є значущим (до 0,2 В). Крім того, величини потенціалів залежать також від типу проїжджаючого ЕРС. Чим важче склад, тим вище потенціал.



—◆— ближня колія; —◇— дальня колія

Рис. 1. Зміна в часі потенціалу на рейці при проходженні електрорухомого складу в зоні водопрпусної труби

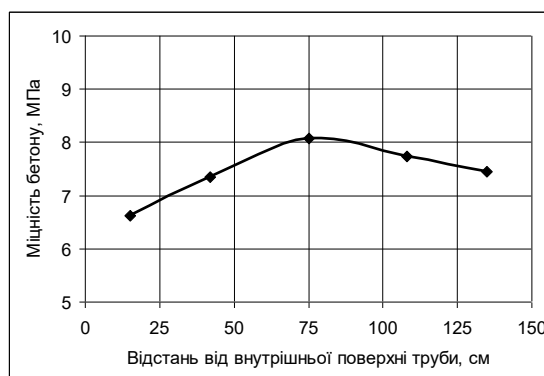


Рис. 2. Зміна міцності бетону на стиск по товщині стінки труби

Виконані вимірювання показали, що величина потенціалу всередині бетону істотно вища, ніж на його внутрішній поверхні. Це, а також те, що з боку ґрунту бетон має меншу міцність, свідчить про те, що через тіло бетону проходить струм витоку, тобто переміщення зовні всередину труби катіонів Ca^{2+} (переважно), а разом з ними в капілярах бетону виникає стаціонарний потік води всередину, що обумовлює постійну електрокорозію бетону і його руйнування. Менші міцності бетону і величини потенціалу зсередини труби свідчать також про надлишок гідросилікатів кальцію по відношенню до портландиту, що обумовлює надлишок негативного заряду і призводить до виникнення тріщин.

Практично на всіх 16-ти досліджених платформах асфальтобетонне покриття в місцях швів і на деякій площі по поверхні плит сильно пошкоджене. Встановлено, що на платформах з бетонними опорами найбільшою мірою пошкоджені бетонні опори, а залізобетонні багатопустотні плити – набагато меншою. На платформах із залізобетонними стояками і ригелями найбільшою мірою пошкоджені залізобетонні ребристі плити.

У процесі проведення досліджень виявлено залежність ступеня електрокорозії конструкцій платформ від відстані платформ до водойм у зоні до 2 км (рис. 3).

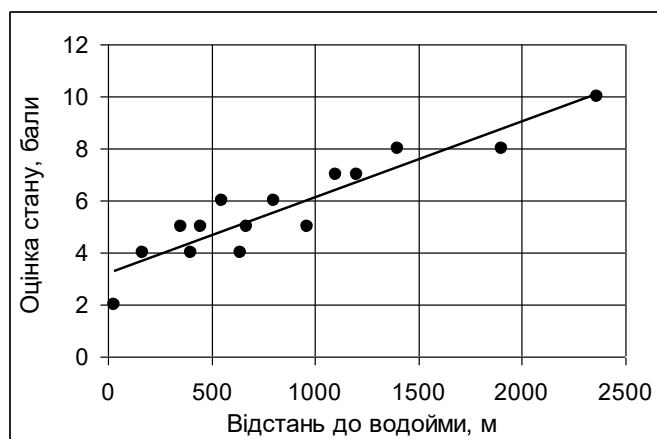


Рис. 3. Залежність стану конструкцій платформи від її відстані до водойми

У процесі натурних досліджень було виявлено, що на низці слабо обводнених мостів і мостів-труб також відбувається інтенсивна електрокорозія неармованого бетону, кам'яної кладки та залізобетону. Це свідчить про те, що в ґрунті під мостом і в баласті шпал постійно перебуває надлишковий поверхневий негативний заряд і, відповідно, потенціал. При цьому конструкції моста поляризуються, так що в їх верхній частині виникає позитивний надлишковий заряд, а до низу – негативний, у той час як на рейках при проходженні ЕРС виникає позитивний потенціал. В результаті електричне поле від потенціалу на рейках і потенціалу в ґрунті за абсолютною величиною додаються, катіони Ca^{2+} переміщуються донизу всіх конструкцій і вимиваються водою, що протікає через них у період дощів.

Існування такого надлишкового електричного заряду і потенціалу на поверхні ґрунту загальновідоме. При середній величині напруженості електричного поля на поверхні Землі -130 В/м в одних місцях вона збільшується за абсолютною величиною до $\approx -1000 \text{ В/м}$, а в інших – до $\approx +200 \text{ В/м}$. Ці надлишкові заряди можуть набувати величезних величин, що призводить до катастрофічних руйнувань мостів і багатьох катастрофічних процесів на Землі.

Виконані аналітичні дослідження руйнувань конструкцій мостів, у тому числі висячих і залізобетонних, під впливом надлишкових негативних зарядів на дні річок та інших великих водотоків (рис. 4). До сьогодні вважається, що мости входять у резонансні коливання від навантажень вітру, хвиль, натовпу людей та ін.

Встановлено, що основна причина руйнування легких висячих мостів економічної конструкції – накопичення надлишкових негативних зарядів величезної величини, які переходять з дна річки на конструкції мостів. Нові мости, важкі і неекономічні, по суті, перешкоджають не дії вітру, шторму, проходу натовпу людей, а дії величезних надлишкових негативних зарядів, переданих конструкціям моста, і відповідно великим напруженням розтягування, що не враховуються.

Підтвердженням електрокорозійної руйнівної дії надлишкового негативного заряду на дні річок є виникнення тріщин на опорах Південного та Дарницького (міст Г. Кірпи) мостів через р. Дніпро у Києві.

а)

б)



Рис. 4. Руйнування мостів: а) висячий Такомський міст (США, 1940 р.); б) Волгоградський хитний залізобетонний міст (Росія, 2010 р.)

Виконано дослідження конструкцій шляхопроводів на Південній залізниці, на яких закріплена контактна мережа постійного струму.

Найбільш пошкодженими є залізобетонні конструкції, в тому числі обрушення залізобетонної балки № 1 прогонової будови № 9, автодорожнього шляхопроводу через залізничні колії ст. Лозова на 928 км ділянки Харків – Лозова Південної залізниці. На суміжних прогонових будовах і опорах у прогоні № 9 виявлені відколи в нижній полиці до хомутів, корозія і руйнування хомутів з оголенням робочої арматури, тріщини в стояках опор.

У зв'язку з виявленими корозійними пошкодженнями і тріщинами виконані вимірювання потенціалів на арматурі і поверхні бетону конструкцій у прогоні, де обрушилася балка. Записані на діаграмах зміни потенціалів узагальнені і наведені на схемі рис. 5.

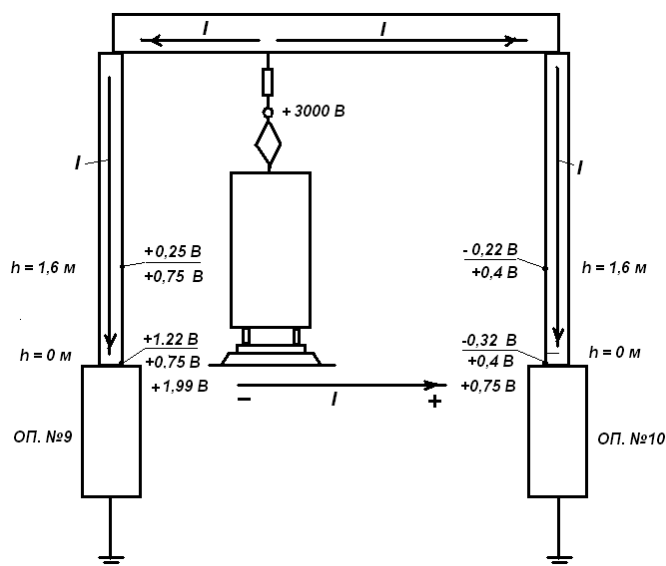


Рис. 5. Зміна потенціалів на опорах № 9 та № 10 при проходженні ЕРС у прогоні № 9 автодорожнього шляхопроводу на ст. Лозова, Південна залізниця

Характер зміни потенціалів, наведений на схемі рис. 5, свідчить про те, що ґрунт під рейковою колією має істотний надлишковий негативний заряд, який за відсутності ЕРС викликає через рейкову колію поляризацію опор і ригеля на них, а контактний дріт створює електричне поле, яке поляризує бетон ригеля (і прогонової будови) над ним і опор.

При цьому ділянка ригеля і опора № 9 до дроту розташовані на більш близькій відстані, і струм поляризації в лівій частині ланцюга перевищує струм у правій частині, в результаті чого струми в опорах спрямовані протилежно, що відповідає вимірним значенням і змінам при проходженні ЕРС.

Більш позитивний потенціал у нижній частині опори № 9, порівняно з верхньою, викликає інтенсивний винос з бетону катіонів Ca^{2+} і підвищену концентрацію гідросилікатного гелю. Це, у свою чергу, призводить до виникнення сил відштовхування між частинками гелю, розтягуючих напружень і тріщин внизу опори № 9. Більш негативні потенціали в опорі № 10 призводять до ще більш інтенсивного тріщиноутворення в ній.

Поряд з поздовжньою поляризацією ригеля і опор відбувається і інтенсивна поляризація ригеля (і прогонової будови) за їх висотою з утворенням надмірного позитивного потенціалу в їх верхній частині. Це зумовило загальний напружено-розтягнутий стан бетону прогонової будови, інтенсивну електрокорозію попередньо напруженої арматури в ньому.

Досліджено вплив електричного поля контактної мережі, струмів витоку та природних надлишкових зарядів на електрокорозію конструкцій і рейкової колії 13 залізничних тунелів на Донецькій, Львівській, Придніпровській, Південній і Південно-Західній залізницях. За наявними відомостями, до сильного корозійного руйнування схильні не тільки тунелі на електрифікованих постійним струмом ділянках залізниць, а й на неелектрифікованих, зокрема Лутугинський тунель Донецької залізниці в Луганській області, найдовший залізничний тунель в Україні (2063 м). Крім нього, є недалеко ще два тунелі – довжиною 42 м і 711 м – Глафірівський тунель. Незважаючи на близькість розташування, тунелі мають різний ступінь пошкодженості. Дуже сильно пошкодженим є Лутугинський тунель, показано, що пошкодження в ньому обумовлені надлишковим позитивним зарядом, який у свою чергу, обумовлений тим, що він розташований нижче Глафірівського тунелю приблизно на 50 м, у ґрунтових масивах, що мають значно більш позитивний надлишковий заряд, а Глафірівський тунель – значно більш негативний. У результаті стінки і склепіння Лутугинського тунелю також отримують надлишковий позитивний заряд. Відповідно, арматура та рейки стають більш анодними, і це призводить до їх електрокорозії. Надлишковий позитивний заряд у бетоні і кам'яній кладці тунелю призводить до електроміграційного потоку всередину тунелю катіонів Ca^{2+} , а слідом за ними гідроксильних іонів OH^- , разом з водою, що фільтрує крізь обробку, тобто відбувається електрокорозія бетону в конструкціях тунелю, а також рейок і скріплень.

Виконані натурні дослідження Бескидського (довжина 1746 м), що перебуває в практично аварійному стані, і сильно пошкодженого електрокорозією Яворського (довжина 445 м) тунелів Львівської залізниці.

У Бескидському тунелю, згідно з виконаними вимірами і отриманими графіками залежності потенціалу U , V від часу, при проходженні ЕРС на рейках з'являється високий потенціал (до +56 В). Синхронно з ним з'являються дуже високі позитивні потенціали на баласті під шпалою (+35 В) і в обробці (+7 В). При позитивному потенціалі в обробці інтенсифікувався винос катіонів Ca^{2+} , а слідом за ними аніонів OH^- з розчину кладки всередину тунелю, в кам'яних блоках виникли концентрації напружень, у них виникли тріщини і навіть відбувалося випадіння каменів. Разом з цим збільшилося обводнення тунелю.

У Яворському тунелі виявлені сильна електрокорозія болтів кріплення тюрбінгів, велика кількість тріщин в плитній частині тюрбінгів, великі зони водонасичених тюрбінгів, багато течій зі склепіння і кам'яних стін з інтенсивним вилуговуванням розчину і бетону.

На Придніпровській залізниці досліджені 3 тунелі – Сухарний, Білий і Троїцький довжиною 329,5, 452,5 і 300,5 м відповідно, розташовані біля узбережжя Чорного моря близько один до одного.

На відміну від Сухарного і Білого, в Троїцькому тунелі відбувається дуже сильна електрокорозія рейок і скріплень, у результаті якої їх замінюють двічі на рік. Традиційно вважається, що море викликає корозію сталі за рахунок хлор-іонів. Однак рейкова колія поруч із тунелем і вздовж морського узбережжя піддається набагато меншій корозії. Відмінністю Троїцького тунелю, в порівнянні з Сухарним і Білим, є його набагато менша відстань до морської затоки, оточення його затокою з трьох боків і дуже незначна висота над рівнем моря (близько 5 м). Можна припустити, що підвищений корозійний знос рейок у Троїцькому тунелі пов'язаний з посиленням впливу струмів витоку з рейок на їх електрокорозію в зазначених умовах.

П'ятий розділ присвячений розвитку теоретичних уявлень про вплив на електрокорозійні пошкодження та відмови залізобетонних опор контактної мережі природних і антропогенних надлишкових потенціалів і зарядів на поверхні Землі.

Виконано аналіз даних Управління електрифікації та електропостачання ВАТ «Російські залізниці» (РЖД) про питому кількість електрокорозійнонебезпечних, а також дефектних опор контактної мережі по дорогах Росії на ділянках, електрифікованих постійним струмом.

Аналіз даних про пошкоджуваність опор і територіальне розташування залізниць по відношенню до основних російських космодромів Плесецьк, Капустін Яр та Байконур, а також китайських космодромів Цзюцюань, Тайюань і Сичан дозволив встановити, що фактором підвищеної пошкоджуваності опор контактної мережі є надлишкові потенціали і гігантські за величиною електричні диполі та надлишкові заряди від ракет-носіїв, що запускаються з космодромів. Набагато більша пошкоджуваність опор відбувається в зоні поширення цих диполів між горами і великими водоймами, які є для них перешкодою.

З урахуванням проведених натурних досліджень розроблено схеми протікання через конструкції струмів витоку з рейок, струмів від електричного поля контактних проводів, а також потрапляння на них надлишкових зарядів Землі (рис. 6 – 11).

а)

б)

а)

б)

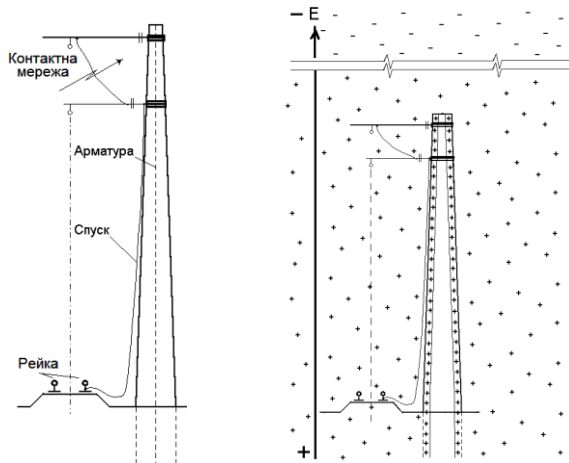


Рис. 6. Схема заземлення консолі залізобетонної опори: а) при звичайних умовах; б) при надлишковому позитивному заряді Землі

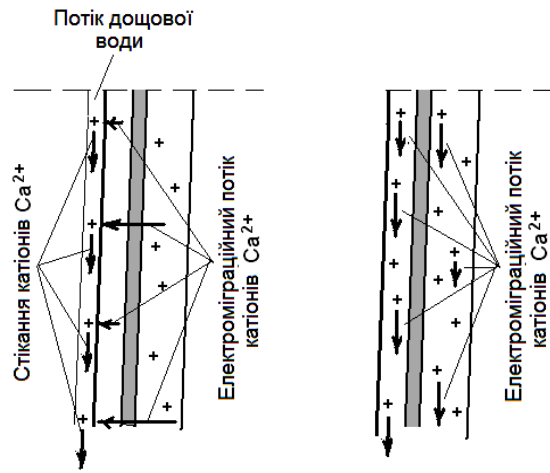


Рис. 7. Стікання струмів при надлишковому позитивному заряді Землі: а) в дощову погоду; б) у суху погоду

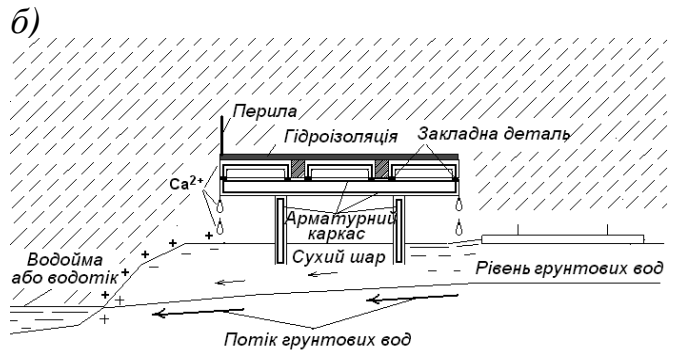
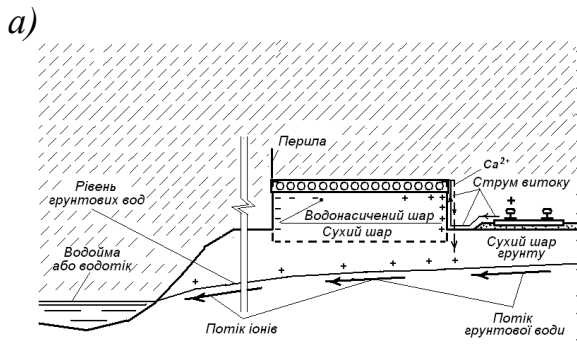
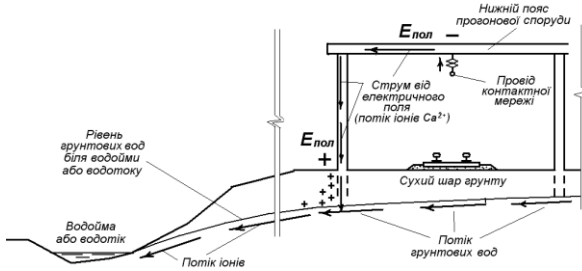


Рис. 8. Схема протікання струму витіку з рейок у конструкції високої пасажирської платформи: а) з бетонними опорами; б) із залізобетонними стояками і ригелями

а)



б)

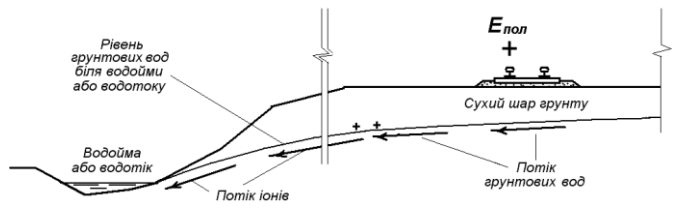


Рис. 9. Схема протікання струму: а) від контактної мережі; б) на ділянці рейкової колії недалеко від шляхопроводу

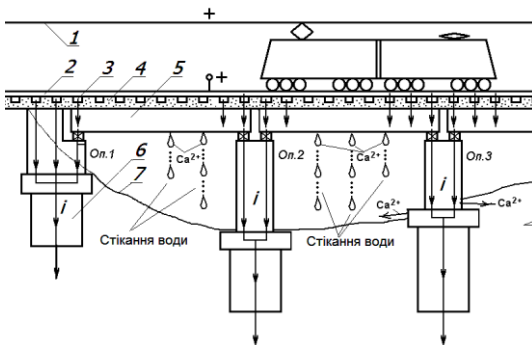


Рис. 10. Схема протікання струмів витіку по конструкціях залізобетонного моста

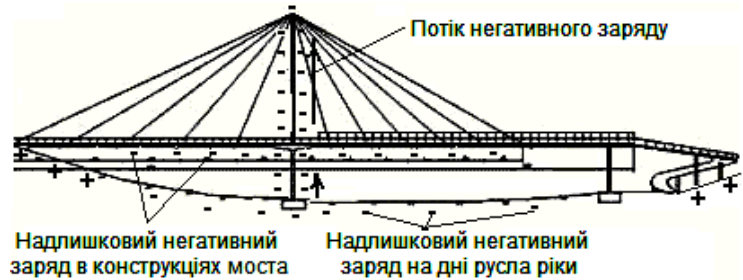
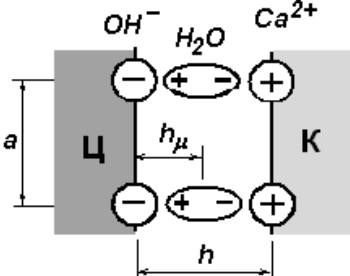


Рис. 11. Схема перетікання надлишкового негативного заряду з дна русла річки в конструкції вантового моста

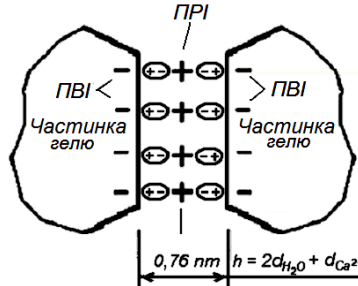
Уточнена розвинена на кафедрі СМКС кількісна теорія міцності цементного каменю з урахуванням розчинення кристалогідратів портландиту при електрокорозії бетону.

Згідно з цими уявленнями в звичайному цементному камені з величезною питомою поверхнею гідросилікатного гелю виникають елементарні електрогетерогенні контакти (ЕГК) з однією молекулою води між потенціалвизначальними іонами (рис. 12, а), що є основними носіями міцності і водостійкості цементного каменю, а також елементарні електрогомогенні контакти (ЕГомК) з одним шаром гідратованих протиіонів (ПРІ) (рис. 12, б). При надлишку гідросилікатів кальцію і води виникають також електрогомогенні контакти з дифузним шаром протиіонів (рис. 12, в).

а)



б)



в)

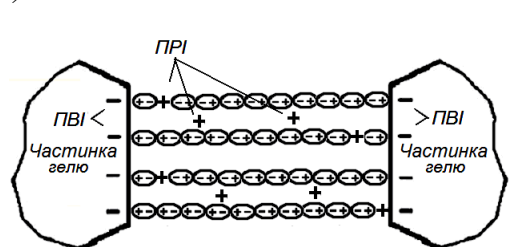


Рис. 12. Схема одиничного електрогетерогенного контакту (а) і електрогомогенного контакту з одним загальним шаром гідратованих протиіонів (б) і за нестачі портландиту і надлишку води (в): Ц, К – цементні і кристалогідратні частинки

Електрогомогенні контакти з одним шаром гідратованих протиіонів також

визначають досить високу міцність цементного каменю, проте не є водостійкими і легко переходять у звичайні коагуляційні контакти при надмірній кількості води (рис. 12, в). Однак у цементному камені і в продуктах його гідратації електрогетерогенні контакти не є суцільними, тому що частинки розподілені у воді.

З урахуванням викладеного міцність цементного каменю визначається як добуток сили зв'язку між потенціалвизначальними іонами (ПВІ) $f_{ПВІ}$ ($f_{ЕГК}$), концентрацією ПВІ кристалогідратів n_0 та поверхневою концентрацією електрогетерогенних контактів $\gamma_s^{ЕГК}$:

$$R_t^{ЦК} = f_{ЕГК} \cdot n_0 \cdot \gamma_s^{ЕГК}. \quad (1)$$

Сила зв'язку в одиничному контакті між ПВІ $f_{ЕГК}$ обумовлюється іон-іонним тяжінням іоном OH^- і Ca^{2+} (ПВІ частинок цементу або гелю і кристалогідратів, відповідно) і іон-дипольними взаємодіями між іоном OH^- і молекулами води, розташованими між ПВІ (рис. 12, а):

$$f_{ЕГК} = \frac{z^- z^+ e^2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 h^2} + 0,9 \cdot \frac{z^- e \mu \phi}{\pi\epsilon\epsilon_0 h_\mu^3}. \quad (2)$$

Розроблено відповідні схеми та виведені вирази для інших складових рівняння (1). З урахуванням цього, виведено вираз для міцності цементного каменю при розтягуванні для $B/\zeta \geq 0,23$ (звичайне для бетону і розчину в експлуатованих конструкціях), який має кінцевий вигляд

$$R_P^{ЦК} = R_{ЕЛ.Р}^{ЕГК} \cdot \frac{A \cdot B}{\rho^{КГ} \cdot \rho^Г} \cdot \alpha^2 \frac{\left(\frac{\zeta}{B}\right)^2}{\left(\frac{\zeta}{B} + \rho_\zeta\right) \cdot \left(1 - \alpha \cdot \frac{B_{ХС}/\zeta}{B/\zeta}\right)} = R_{P,\alpha=1}^{ЦК} \cdot \gamma. \quad (3)$$

З урахуванням того, що при електрокорозії розчиняється частина кристалогідратів кальцію, що мають позитивний електроповерхневий потенціал, концентрація ЕГК зменшиться за виразом:

$$\gamma^{ЕГК} = (1 - A^{ЕК}) \gamma^{КГ}, \quad (4)$$

де $A^{ЕК}$ – частка кристалогідратів, розчинених у результаті електрокорозії.

Виведено вираз для відносної міцності цементного каменю, %:

$$R_{ЦК}^{ЕК} / R_{ЦК} \cdot 100 = \frac{14,2(1 - 2,34 A^{ЕК})}{14,2} = (1 - 2,34 A^{ЕК}) \cdot 100. \quad (5)$$

При виникненні зовнішнього (для конструкцій) поля напруженістю E виникає поле поляризації і дипольний момент на частинках цементного каменю. В області критичних частот (у нашому випадку критичного розміру частинки) подвійний електричний шар (ПЕШ) встигає повернутися в початковий стан за рахунок дифузії його протиіонів, і виникає «величезний» ПЕШ.

Більш істотним для цементного каменю є механізм поляризації довгих паличкоподібних частинок, до яких наближаються за формою кристалогідрати портландиту, і капіляри (рис. 13).

Виведено вирази для швидкості V і часу повернення T дифузійної хвилі для таких частинок і капілярів, виходячи з рівняння стаціонарного потоку, що

визначається рівністю електроміграційної сили f_{EM} і сили тертя потоку іонів об воду f_{TEP} :

$$f_{EM} = f_{TEP}; \quad \frac{U_{en} \cdot ze \cdot S_{бок}}{l_{кан} \cdot a^2} = \eta \cdot S_{бок} \cdot \frac{V}{r_{кан}}, \quad (6)$$

$$V = \frac{U_{en} \cdot ze \cdot r_{кан}}{l_{кан} \cdot a^2 \cdot \eta}, \quad (7)$$

$$T = \frac{l_{кан}}{V}. \quad (8)$$

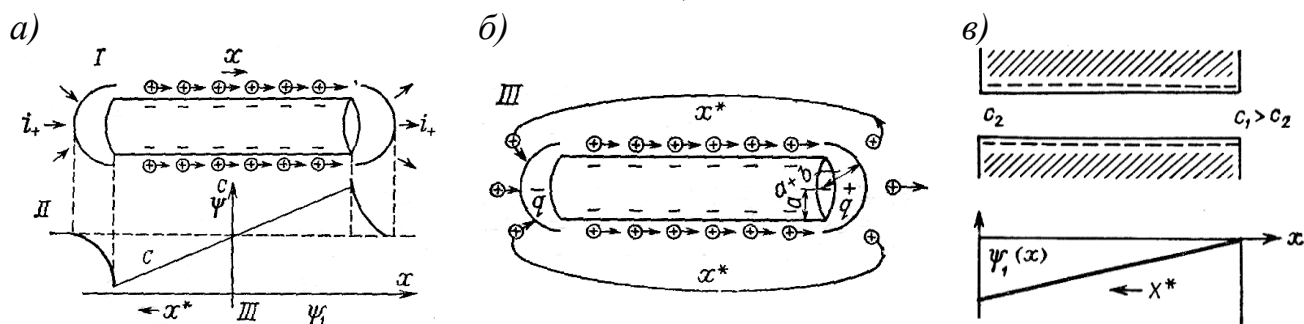


Рис. 13. Поляризація частинок і капілярів: а, б) паличкоподібної частинки; в) капіляра

Підставивши в (7) середній радіус мікрокапілярів, утворених кристалогідратами, що дорівнює $r_{кан} = 100$ нм, середню відстань між ПВІ гіросилікатів кальцію $a = 3$ нм; $U_{en} = 2$ В (за попередніми експериментами), отримали – $V = 1,42 \times 10^{-4}$ м/с, а $T = 6$ хв, що відповідає реальному часу зміни проходження ЕРС у секціях колії, де розташовані штучні споруди.

Отже, викликана поляризація бетону і його електрокорозія обумовлені процесами електроміграційного і дифузійного переміщення протиіонів Ca^{2+} (і слідом за ними аніонів OH^-) уздовж мікрокапілярів цементного каменю в бетоні.

Розвинуто уявлення про міцність і електрокорозію сталі і бетону в сталевих та залізобетонних конструкціях з урахуванням уявлень про їх мікро- і субмікροструктуру і електроповерхневі властивості структурних елементів, а також дії сили латерального електроповерхневого відштовхування $f_{ЛАТ}^{EP}$ між потенціалвизначальними електронами або катіонами Fe^{2+} .

Згідно з наведеними в дисертації електронно-мікроскопічними знімками структури сталі, розрізняють зерна фериту і границі між ними з цементиту Fe_3C . Розміри зерен коливаються в широкому інтервалі – від одиниць до 40 мкм, середній розмір – 13,5 мкм, при цьому зерна складаються з набагато менших частинок (блоків).

Розроблено схему сил, діючих на реберні (кутові) ПВІ (ПВЕ) (рис. 14), виведені вирази для латеральної електроповерхневої складової $f_{ЛАТ}^{EP}$, що витісняє кутовий або реберний електрон (і катіон Fe^{2+}) і сили їх зв'язку з кристалічним каркасом заліза $f_{ПР}$, що перешкоджає витісненню:

$$f_{ЛАТ}^{EP} = \frac{z^2 e^2 \cdot b}{4\epsilon\epsilon_0 a_0^3}; \quad f_{ПР} = \frac{z_{Fe^{2+}} \cdot z_{OH^-} \cdot e}{4\pi\epsilon_1\epsilon_0 \delta^2 Fe^{2+} e^-} \cdot 2 \cdot \sin 45^\circ, \quad (9)$$

де b – розмір блока, м; a_0 – відстань між ПВЕ (Fe^{2+}), м.

Шляхом підстановки в (9) стандартних величин, а також $\delta_0 = 2 \cdot r_{Fe^{2+}} = 2 \cdot 0,8 \cdot 10^{-10} = 1,6 \cdot 10^{-10}$ м отримано спрощений вираз $f_{ЛАТ}^{ЕП} = 0,247 \cdot b$ і визначено величину $f_{ПР} = 2,045 \cdot 10^{-0,8}$ Н, за якими побудована графічна залежність $f_{ЛАТ}^{ЕП}$ і $f_{ПР}$ від b (рис. 15). Згідно з цією залежністю при $f_{ЛАТ}^{ЕП} > f_{ПР}$ реберні ПВЕ разом з катіоном Fe^{2+} витісняються в розчин, і зерно розчиняється. При $f_{ЛАТ}^{ЕП} = f_{ПР}$ блок перебуває в рівноважному стані.

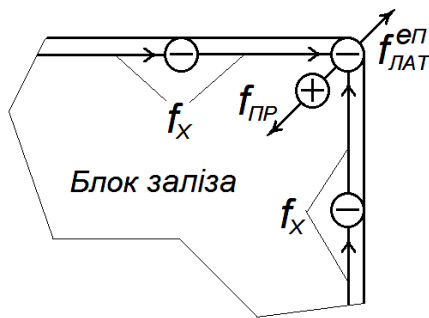


Рис. 14. Схема сил, що діють на реберні (кутові) ПВІ (ПВЕ)

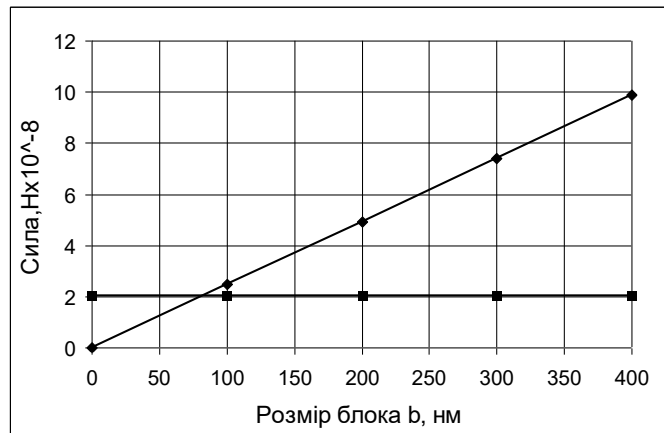


Рис. 15. Залежність співвідношення сил $f_{ЛАТ}^{ЕП}$ і $f_{ПР}$ від розміру блока b

При розробленні уявлень про міцність сталі розроблена схема одиничного електрогетерогенного контакту між суміжними блоками фериту, виведено вираз для сили потенціал-іонного тяжіння в цьому контакті і його міцності, який визначає міцність сталі.

$$f_{П-I} = \frac{\psi_{ЕП}^0 \cdot z \cdot e}{(2r)^2}, \quad R_{П-I} = \frac{f_{ЕГомК}}{a_0^2}. \quad (10)$$

Розрахункова міцність сталі склала 687 МПа, що є близьким до реальних величин.

Уявлення про електрокорозію сталі ґрунтуються на використанні відомої залежності між напругою і зарядом, виведеної залежності між щільністю поверхневого заряду частинки і зовнішнім потенціалом, а також виведеного виразу для додаткового електроповерхневого потенціалу $\psi_{ЕП}^{ПР}$ на поляризованій зовнішнім полем частинці:

$$q = \frac{Q}{144\pi R^2} = \frac{U}{144\pi}, \quad \psi_{ЕП}^{ПР} = \frac{U}{24}. \quad (11)$$

За виразом (11) і побудованим за ним графіком, додатковий електроповерхневий потенціал на поверхні зерен і блоків сталі зростає від потенціалу U на рейці і при $U = 80$ В (як реальний максимальний потенціал) дорівнює 5 В. Це призводить до збільшення на поверхні феритового блока (зерна) латерального електроповерхневого відштовхування між ПВІ, що викликає електрокорозію частинки.

Розвинені кількісні уявлення про механізм зносу і тріщиноутворення в головці рейки під навантаженням з урахуванням мікроструктури сталі і електроповерхневих

властивостей її структурних елементів. Згідно з металографічними дослідженнями в процесі експлуатації в головці рейки виникає сітка поверхневих тріщин. У смузі тріщин спостерігається зона хвилеподібного зносу і похилі ланцюжки, що складаються з маленьких частинок. Показано за допомогою додаткового збільшення фрагмента мікроструктури рейки, що цими неоднорідностями є блоки фериту, електроповерхневий потенціал яких змінився за рахунок взаємодії з атомами кисню і встановлення рівноважного (при $pH\ 7$) електроповерхневого потенціалу – $\psi_{EP}^p = -0,16\ B$, $\psi_{EP}^p = -0,63\ B$.

Суттєве зменшення абсолютної величини рівноважного електроповерхневого потенціалу поверхневих блоків фериту ($-0,63\ B$), в порівнянні з електроповерхневим потенціалом блоків фериту в зерні ($-1,77\ B$), призводить до значного ослаблення зв'язку цих блоків із зернами. Це обумовлює можливість зсуву поверхневих блоків під впливом навантаження від колеса.

У шостому розділі подано результати лабораторно-експериментальних досліджень, спрямованих у першу чергу на перевірку розроблених теоретичних уявлень.

Для перевірки теоретичних уявлень про електрокорозійний вплив на бетон пульсуючої односпрямованої постійної напруги (далі пульсуюча напруга) виконані лабораторні дослідження за допомогою спеціально розробленого і виготовленого комплексу обладнання. Напруга джерела постійного струму становила $40\ B$ (відповідає середній напрузі на рейках). Досліджували зразки $10 \times 10 \times 10\ cm$ з бетону міцністю на стиск $10\ MPa$. Тривалість дії складала близько 3600 годин (11500 циклів), що відповідає 8 місяцям експлуатації в колії на ділянці з інтенсивною вантажнапруженістю.

Графік зміни в часі величини струму, що проходить через зразок, наведено на рис. 16. За даними безперервного запису побудовані графіки зміни провідності обводненого бетонного зразка за окремі цикли, а також загальний за весь час вимірювань (рис. 17) і (рис. 18).

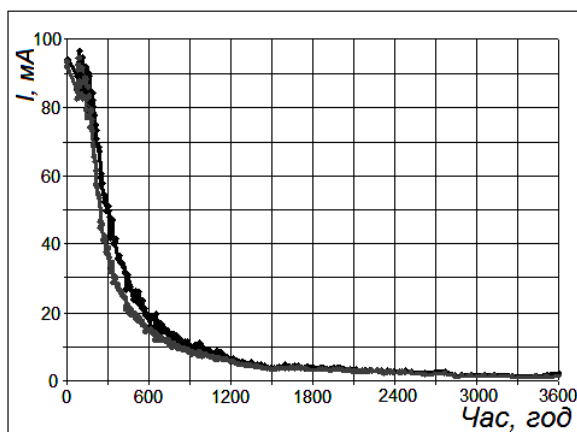
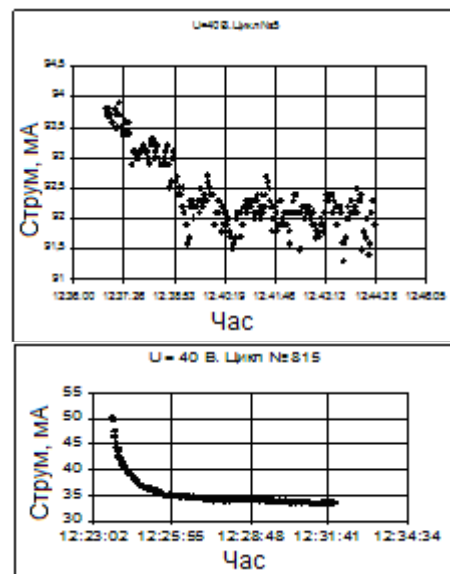


Рис. 16. Кінетика зміни сили струму I в зразку бетону на початку (верхня крива) і в кінці (нижня крива) кожного циклу при тривалому впливі пульсуючої напруги



Згідно з цими графіками струм і його перепади в межах кожного циклу за період обробки зменшується, що свідчить про винесення катіонів Ca^{2+} , розчинення $Ca(OH)_2$ і електрокорозію бетону. З урахуванням графіків провідності обводненого

бетонного зразка, що наведені на рис. 17 і рис. 18, розроблені уявлення про механізм впливу на бетонний зразок пульсуючої односпрямованої напруги і уявлення про поляризацію та електрокорозію бетону під впливом цієї напруги.

Згідно з цими уявленнями при накладенні зовнішнього імпульсу постійної напруги бетонний зразок поляризується, в ньому виникає ємність C (Φ), при цьому бетон характеризується ємнісною провідністю (12), (13), (14) і діелектричною проникністю ε , пов'язаною з ємністю C за виразами (15) і (16) (рис. 19). При початковій провідності $0,0025 \text{ Сім (1/Ом)}$ максимальне і мінімальне значення діелектричної проникності за (16) досягає величезних величин, відповідно, $\varepsilon_{\max} = 2,85 \cdot 10^9$ і $\varepsilon_{\min} = 5,4 \cdot 10^7$, що підтверджує наші уявлення про гігантську діелектричну проникність бетону в пульсуючому односпрямованому електричному полі.

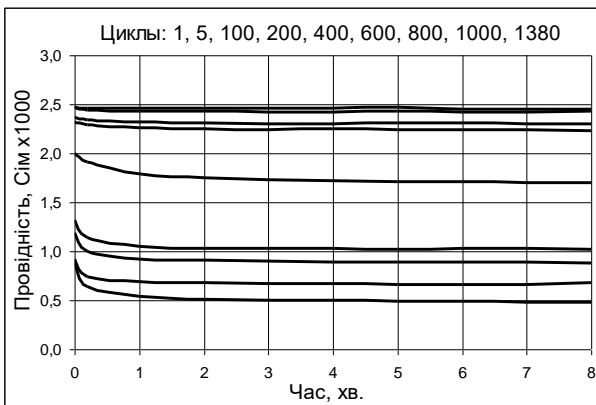


Рис. 17. Зведений графік зміни провідності бетонного зразка при впливі на нього пульсуючої односпрямованої постійної напруги 40 В

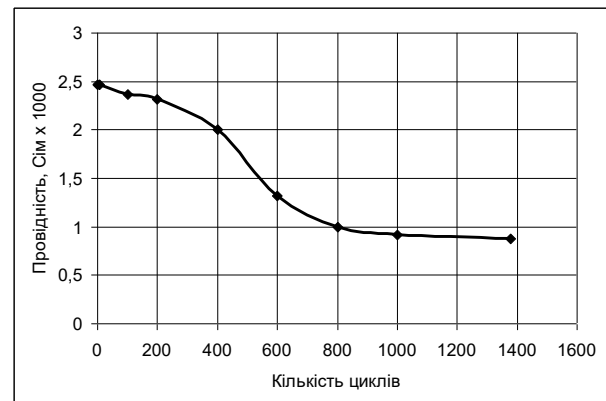


Рис. 18. Загальна зміна провідності бетонного зразка при впливі на нього пульсуючої односпрямованої постійної напруги 40 В

Загальна провідність і ємність бетонного зразка:

$$j = j_0 + 2\pi f C, \quad (12)$$

$$C = \frac{\Delta j}{2\pi f}, \quad (13)$$

При $f = \frac{1}{t}$ $C = \frac{\Delta j t}{2\pi}, \quad (14)$

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d}, \quad (15)$$

Звідки $\varepsilon = \frac{dC}{\varepsilon_0 S}. \quad (16)$

З урахуванням цього розроблена схема поляризації кристалогідратів портландиту і уточнено механізм його електрокорозійного розчинення під впливом пульсуючого електричного поля напруженістю E_0 (рис. 19).

Відповідно до цього механізму електрокорозійне розчинення кристалогідрату визначається співвідношенням між силою латерального електроповерхневого відштовхування $f_{\text{ЛІТ}}^{\text{ЕП}}$ між ПВІ Ca^{2+} , що відриває його від ґратки, і силою його зв'язку з кристалічною ґраткою на куті або ребрі $f_{\text{ГР}}$, що перешкоджає відриву. При

$f_{ЛІАТ}^{ЕП} > f_{ПР}$ відбувається розчинення кристалогідрату з кутів і ребер, а при $f_{ЛІАТ}^{ЕП} = f_{ПР}$ кристалогідрат перебуває в рівноважному стані.

Під впливом зовнішнього пульсуючого електричного поля надлишкові за рахунок розчинення катіони Ca^{2+} зміщуються в капіляри, а з них до нижньої грані зразка, звідки виносяться водою (рис. 19, а).

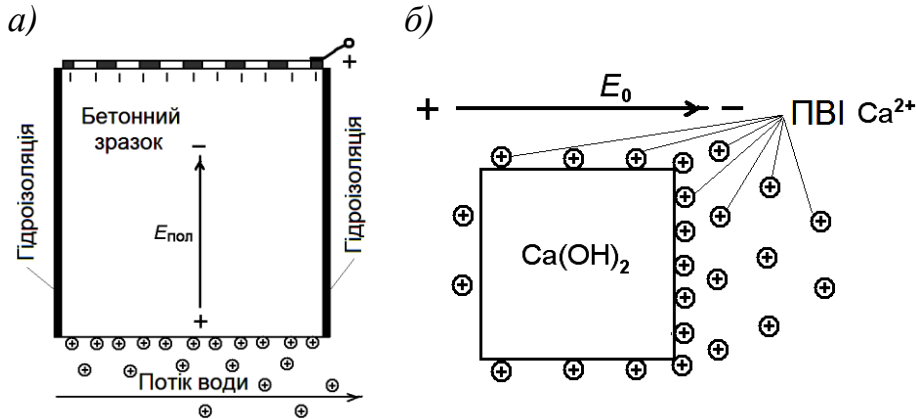


Рис. 19. Схема поляризації: а) бетонного зразка; б) блока портландиту $Ca(OH)_2$ з відривом ПВІ під впливом зовнішнього поля E_0

За даними перепаду струму на початку і кінці кожного циклу визначено загальну кількість винесеного заряду Q і маси m $Ca(OH)_2$, винесених із зразка електрокорозійним шляхом: $m = Q \cdot M / F$ (M – молекулярна маса $Ca(OH)_2$, 74 г/моль; F – число Фарадея, $9,65 \cdot 10^4$ Кл/моль): $Q = 9200$ Кл і $m = 7,1$ г. Виходячи з кількості прогідратованого цементу в бетоні зразка близько 100 г (ступінь гідратації $\alpha = 0,5$), вміст $Ca(OH)_2$ приблизно дорівнює 25 г. Відповідно, винесена маса портландиту за період впливу напруги становить близько 30 %, що свідчить про дуже інтенсивну електрокорозію під дією напруги $U = 40$ В. Разом з розчиненням кристалогідратів портландиту зникають поодинокі електрогетерогенні контакти (ЕГК), що зменшує міцність бетону.

Після закінчення обробки зразка пульсуючою напругою були зрізані пошкоджені шари бетону, які контактували з водою, на товщину приблизно 1 см, після чого зразки були випробувані на безнапірну водопроникність. Після цього зразки були висушені, розпиляні на 8 частин, близьких до кубічної формі, і випробувані на міцність при стиску. Випробування показали, що швидкість фільтрації основного зразка (оброблюваного напругою) значно вища (на 40 %), а міцність у зоні контакту з водою набагато менше (на 18 %), ніж у контрольного (необроблюваного) зразка.

Це також підтверджує теоретичні уявлення про електрокорозію бетону під впливом пульсуючої односпрямованої постійної напруги.

Фізико-хімічні дослідження фазового складу цементного каменю, відібраного з бетонних зразків, виконані за допомогою методів інфрачервоної спектроскопії (ІЧС) і рентгенографії (РГ). На ІЧС-спектрах смуги поглинання, характерні для гідроксиду кальцію або інших кристалогідратів, не проявилися. Сильно зменшилися смуги в області високоосновних і середньоосновних гідросилікатів кальцію, і проявилися смуги, характерні для найнижчих низькоосновних гідросилікатів кальцію (тоберморитоподібного $5CaO \cdot 6SiO_2 \cdot 5H_2O$ і ксонотліту $5CaO \cdot SiO_2 \cdot H_2O$). На

рентгенограмі ліній, характерні для C_3S і C_2S , $Ca(OH)_2$ та інших кристалогідратів відсутні. Спостерігається велика кількість низькоосновних гідросилікатів кальцію типу ксонотліту $6CaO \cdot 6SiO_2 \cdot H_2O$.

Дослідження макроструктури бетону методами оптичної мікроскопії та люмінесцентної дефектоскопії показали, що в обробленому зразку тріщин на контакті цементного каменю з зернами щебеню більше, ніж на необроблених зразках, що перебували в стоячій і проточній воді.

Таким чином, фізико-хімічні дослідження підтвердили, що проточна вода і пульсуюча односпрямована постійна напруга викликають сильне електрокорозійне вилугування цементного каменю в бетоні і руйнування його структури.

Виконано дослідження впливу пульсуючої напруги на бетони різної міцності 10, 20, 30 МПа традиційних складів, а також бетон оптимального складу, що виготовлено у відповідності до патенту на винахід 99426 UA (рис. 20) і (рис. 21).

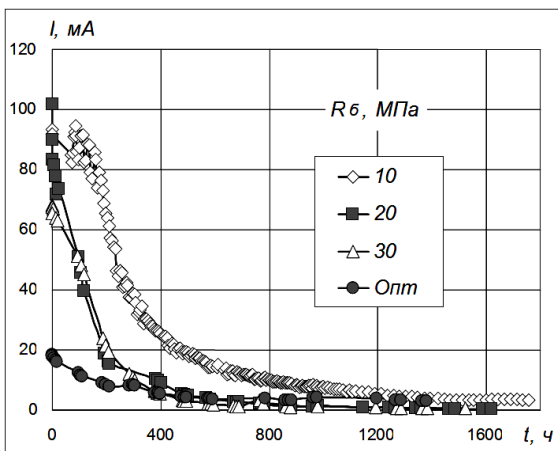


Рис. 20. Залежність сили струму I , що протікає через зразок бетону, від часу t впливу на зразок постійного електричного поля. Зразки бетону міцністю при стиску R_b , МПа: \diamond – 10; \blacksquare – 20; \triangle – 30; \bullet – оптимального складу (Опт)

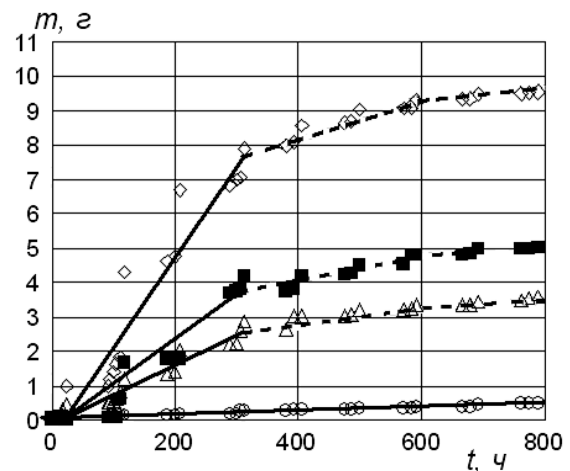


Рис. 21. Залежність маси m винесеного із зразків бетону $Ca(OH)_2$ від часу t безперервного впливу на зразок постійного електричного поля. Зразки бетону міцністю при стиску R_b , МПа: \diamond – 10; \blacksquare – 20; \triangle – 30; \circ – оптимального складу (Опт)

Згідно з експериментальними даними величина щільності струму залежить від міцності і складу бетону: у бетоні традиційного складу невисоких класів за міцністю вона становить близько 100 мА/дм^2 , у бетоні оптимального складу – близько 19 мА/дм^2 , що характеризує електрокорозійну стійкість бетону оптимального складу.

Виконано лабораторно-експериментальні дослідження впливу пульсуючої напруги на електрокорозію сталі за допомогою спеціально розроблених установки і методики (рис. 22).

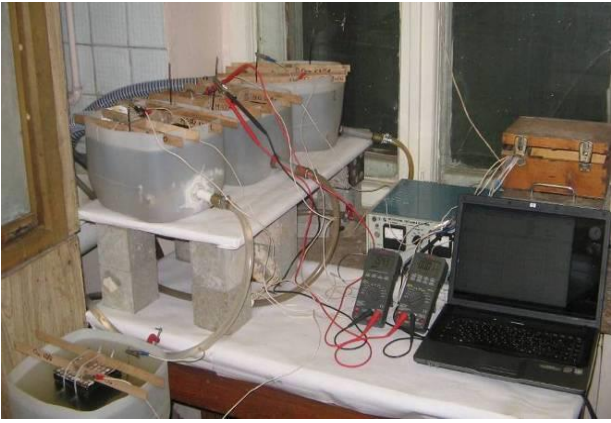


Рис. 22. Набір установок із зразками під час випробувань

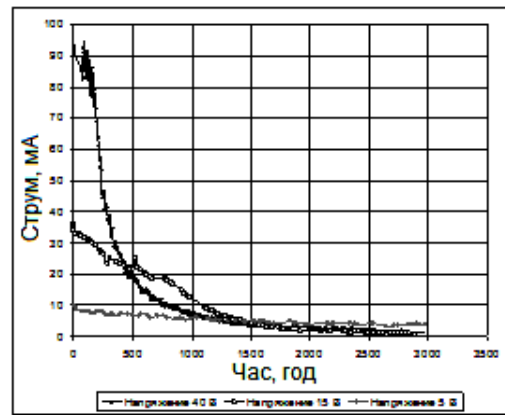


Рис. 23. Зміна струму I в зразках бетону в потоці води при напрузі 40 В, 15 В і 5 В

На виготовлені бетонні зразки $10 \times 10 \times 10$ см міцністю на стиск близько 10 МПа, що ізолювані по бічних гранях електрокорозійностійким захисним складом ЗС-3 (ЗС-3М), встановлювали перфоровані сталеві пластини-електроди на закладних деталях.

На основний зразок, встановлений у проточну воду, подавали пульсуючу напругу, а два контрольних перебували у воді, один у стоячій, а інший у проточній. Дослідження проводили при різних напругах – 40, 15 і 5 В. Зміна струму в бетонних зразках (рис. 23), а також ступінь і характер корозійного пошкодження сталевих пластин-електродів свідчить про пряму залежність електрокорозійного впливу пульсуючої односпрямованої постійної напруги від її величини.

Проведені експериментальні дослідження підтвердили коректність розробленого механізму електрокорозії сталі від дії пульсуючого односпрямованого постійного струму в рейках та інших металевих і залізобетонних виробів і конструкціях.

Проведено експериментальні дослідження впливу пульсуючої напруги на рейки, скріплення і бетон під ними в умовах обводнення.

Досліджувані зразки: БК – рейка Р65 довжиною 100 мм встановлена при формуванні на поверхню бетонного зразка ($150 \times 100 \times 100$ мм), бічні поверхні якого ізолювані захисним складом ЗС-3 (ЗС-3М); ДК – рейка Р65 довжиною 100 мм встановлена на дерев'яну основу ($150 \times 100 \times 100$ мм); ДП і ДПК (контрольний) – рейка Р65 довжиною 225 мм закріплена костиллями через металеві підкладки на фрагментах дерев'яних шпал. Напруга 30 В, час впливу 2000 годин (5900 циклів).

Характер корозійних пошкоджень зразків (рис. 24), свідчить про те, що процеси корозії рейок і скріплень під дією пульсуючої односпрямованої постійної напруги в умовах обводнення відбуваються значно інтенсивніше, ніж у контрольному зразку ДПК, що піддавався впливу тільки проточною водою. Виконані вимірювання та побудовані за ними графіки (рис. 25), також свідчать про сильну електрокорозію рейок, у порівнянні з рейками, що не зазнали електричного впливу.

а)

б)



Рис. 24. Зразки рейок після 1850 годин обробки пульсуючою напругою: а) ДК; б) БК

При цьому показано, що в першому періоді (до 200 годин електричного впливу) за кожний цикл і протягом усього часу впливу зі зразка виносилися катіони Ca^{2+} , що є продуктом розчинення цементного каменю під дією пульсуючої напруги і потоку води. У другому періоді (починаючи з 200 годин) виносилися продукти корозії рейки. Тобто електрокорозія рейки відбувається після втрати захисних властивостей бетону, в умовах колії – бетону залізобетонної шпали.

Експериментальні дослідження підтвердили теоретичні уявлення про механізм електрокорозії підосви і шийки рейки при впливі пульсуючої напруги, аналогічної потенціалу на рейках у колії, причому інтенсивність електрокорозії залежить прямо пропорційно від величини потенціалу на рейці.

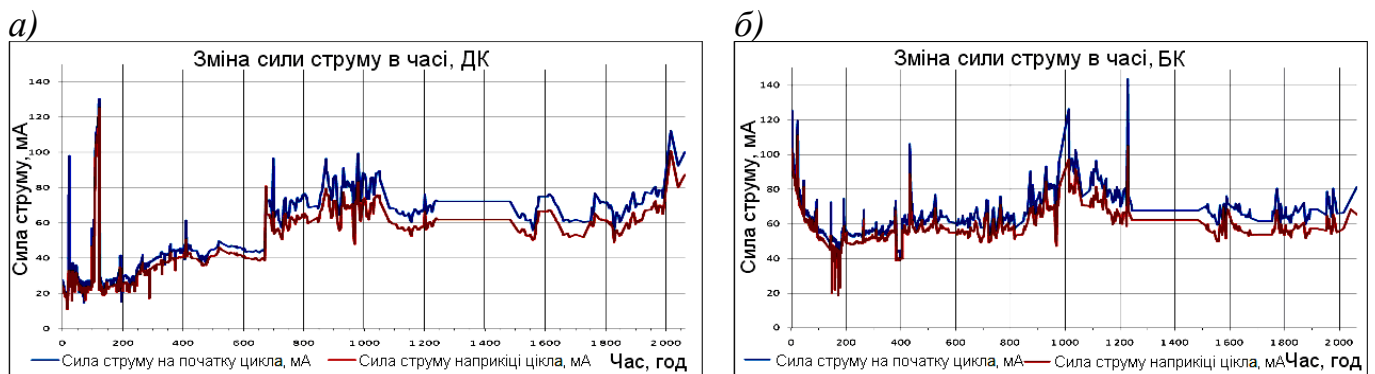


Рис. 25. Зміна сили струму в зразках: а) ДК; б) БК

Виконано дослідження ефективності застосування захисних екранів з різних матеріалів (сталева сітка, суцільний сталевий лист і алюмінієва фольга) від електричного поля високої напруги (5 кВ) для бетонного зразка з арматурним стержнем. Показано, що захисні екрани зменшують у середньому у 8 разів потенціали на арматурному стержні, наведені електричним полем, порівняно з незахищеним зразком.

Сьомий розділ присвячено експлуатаційним випробуванням та впровадженню результатів досліджень. За результатами експериментально-теоретичних і експлуатаційних досліджень розроблено комплекс нових методик проведення експлуатаційних досліджень електрокорозійної небезпеки бетонних, залізобетонних, кам'яних і металевих конструкцій споруд, а також високоефективних матеріалів і технологій для захисту від електрокорозії і забезпечення несучої здатності і високої довговічності конструкцій з бетону, залізобетону, кам'яної кладки і сталі.

Конструкції і технології захисту від електрокорозії пошкоджених і руйнованих конструкцій залізничних тунелів та аварійних водопропускних труб.

1. Розроблено конструкцію і технологію виготовлення металоін'єкційної обшивки, що складається із закріпленого на стіні тонкого суцільного сталевого листа і суперпластифікованої цементно-водяної суспензії СПЦВС (Пат. 71208 UA), що нагнітається під нього. Обшивка успішно пройшла експлуатаційні випробування і впроваджена на дослідній ділянці тунелю Львівської залізниці.

2. Розроблені, випробувані та впроваджені на 3 аварійних водопропускних трубах Південної залізниці металоін'єкційна обшивка, бетон оптимального складу з безосадової бетонної суміші, що вібророзтікається (Пат. 99426 UA) (рис. 26 – 28).

3. Розроблена, випробувана і впроваджена на аварійній водопропускній трубі, експлуатованій на електрифікованій постійним струмом ділянці Південної залізниці, металоін'єкційна обшивка з діодним заземлювачем (рис. 29).

4. Розроблена і впроваджена на дослідній ділянці тунелю Львівської залізниці конструкція бетонної основи із застосуванням розчинної підготовки оптимального складу (Пат. 62613 UA, Пат. 99426 UA) і захисного електрокорозійностійкого складу ЗС-3 (ЗС-3М) (рис. 30).

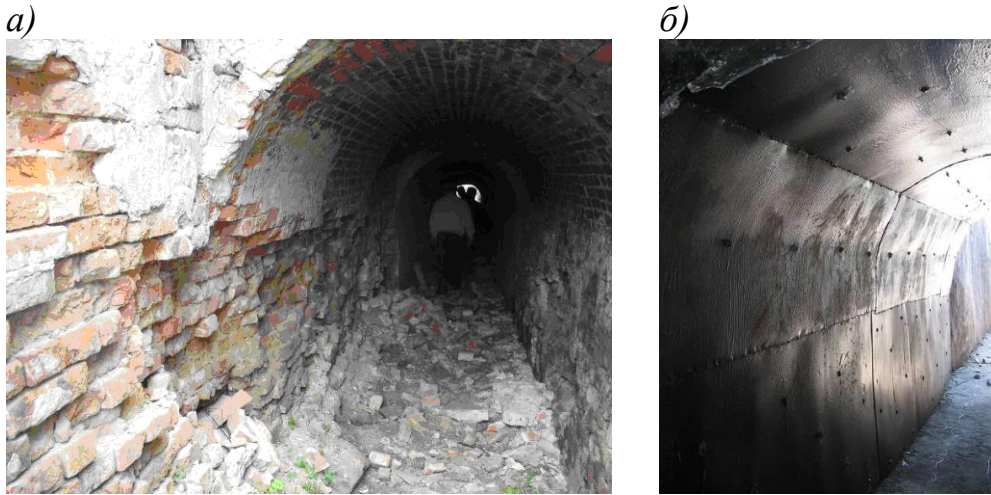


Рис. 26. Водопропускна кам'яна труба на 19 км ділянки Харків – Люботин: *а)* руйнування кладки стін; *б)* посилення стіни за допомогою металоін'єкційної обшивки

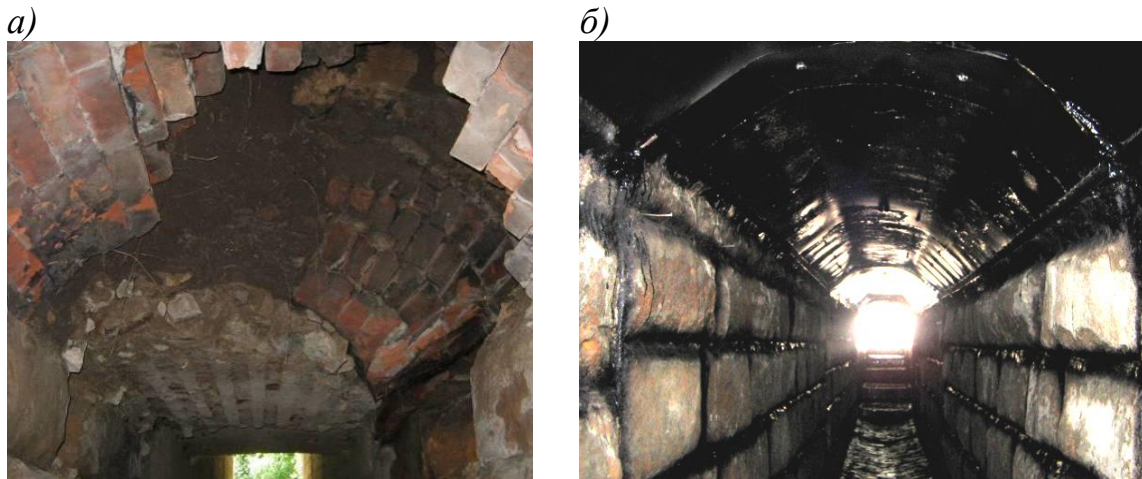


Рис. 27. Водопропускна труба на 111 км ділянки Харків – Куп'янськ: *а)* пошкодження конструкцій труби; *б)* конструкції труби після капітального ремонту

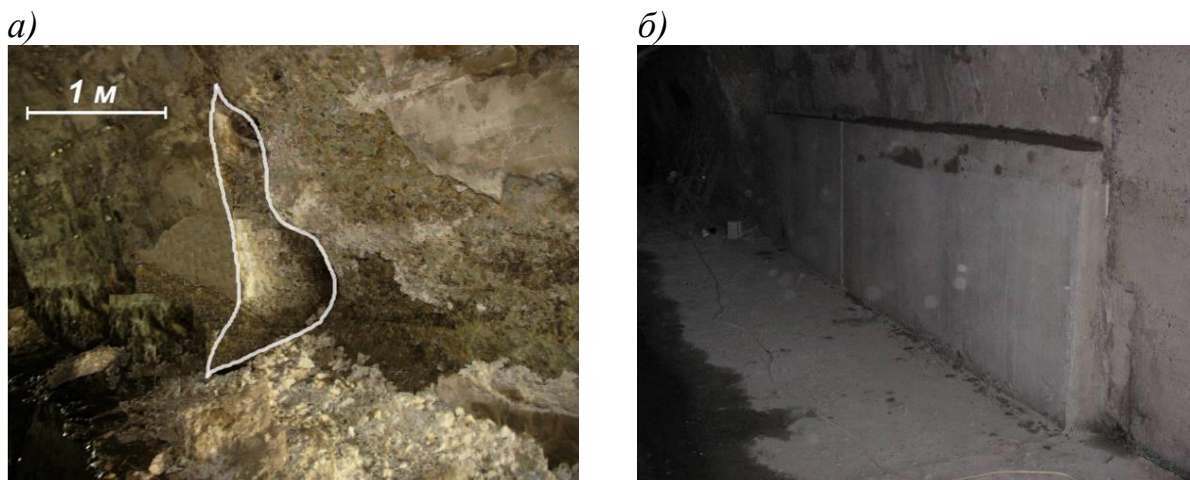


Рис. 28. Водопропускна труба на 365 км ділянки Основа – Букине Південної залізниці: *а)* пошкодження бетонних стін з наскрізним вивалом; *б)* посилення стіни за допомогою залізобетонної обшивки з бетону оптимального складу з безосадової бетонної суміші, що вібророзтікається

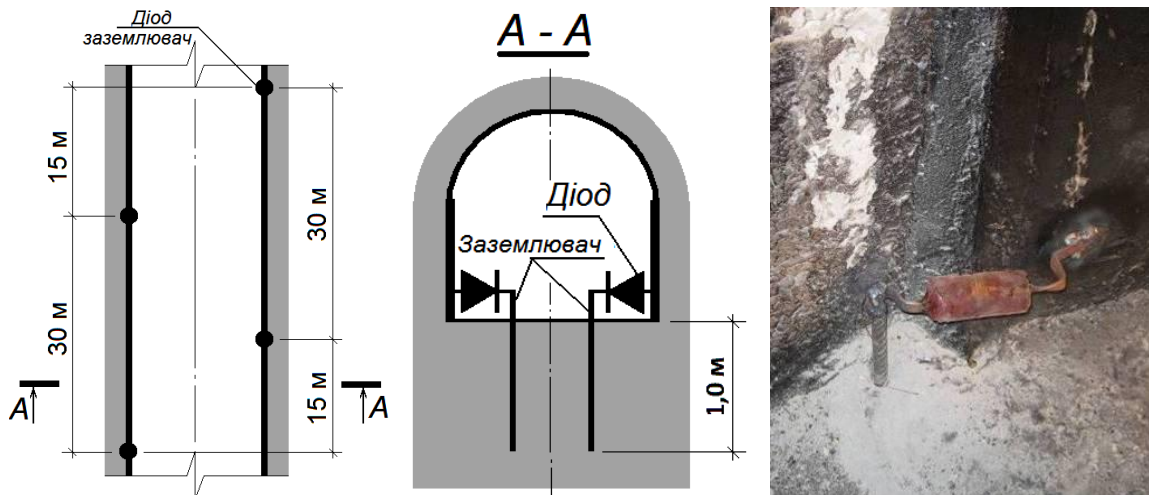


Рис. 29. Захист водопропускних труб від електрокорозії за допомогою металоін'єкційної обшивки із діодним заземлювачем

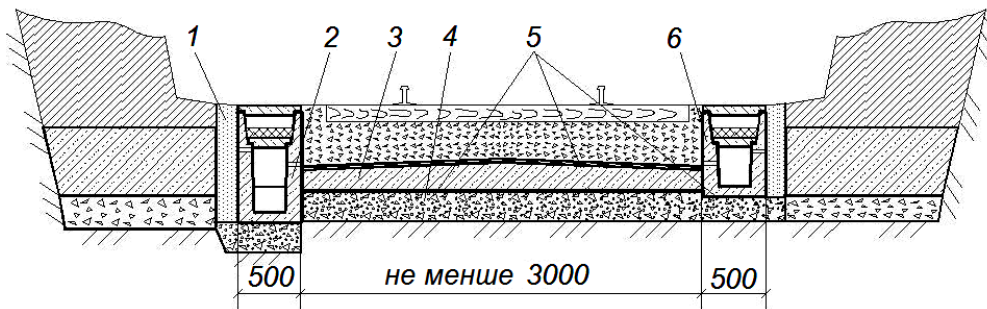


Рис. 30. Конструкція бетонної основи тунелю:

1 – цементно-піщаний розчин оптимального складу; 2 – відстійник водовідвідного лотка; 3 – залізобетонна розпірна плита; 4 – підготовка із сухої цементно-піщаної суміші оптимального складу; 5 – гідроізоляційне покриття плит і лотків електрокорозійностійким складом ЗС-3; 6 – водовідвідний лотік

Способи і технології з посилення і захисту від електрокорозії конструкцій аварійних шляхопроводів і мостів.

1. Розроблена і впроваджена на 2 шляхопроводах Південної залізниці і на шляхопроводі АТ «ММК Азовсталь» у м. Маріуполь конструкція металоін'єкційної напівобойми для сильно пошкоджених переднапружених залізобетонних прогонових будов, а також металоін'єкційна обойма для кам'яних і залізобетонних опор.

2. Розроблена і впроваджена на великому металевому мості Південної залізниці конструкція бетону в сталевій обоймі для посилення і електрокорозійного захисту фундаменту аварійної опори (рис. 31).

3. Розроблена і впроваджена на залізобетонному шляхопроводі Південної залізниці металоін'єкційна обойма для посилення і захисту від електрокорозії деталей конструкцій складної форми (рис. 32).

4. Розроблено спосіб і технологію захисту конструкцій шляхопроводів від електрокорозії за допомогою рідкоскляних екранів (Пат. 87795 UA) навколо опор з глибинним заземленням.

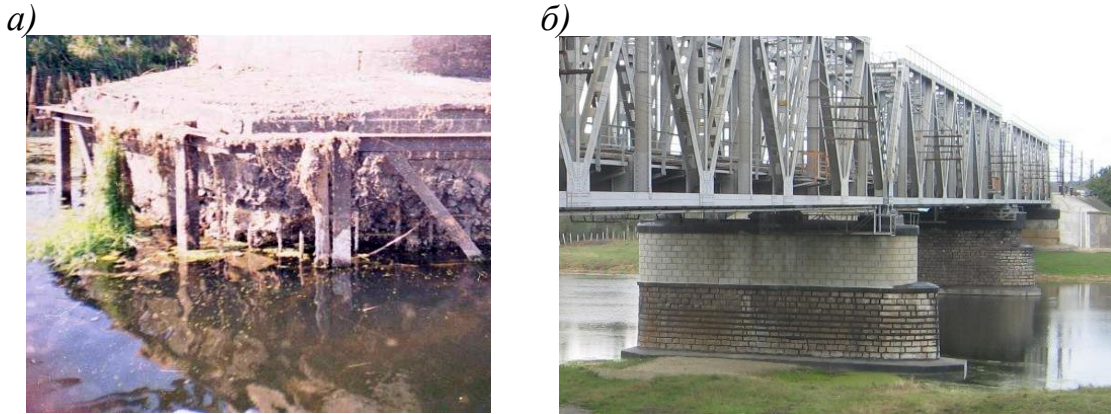


Рис. 31. Опора № 3 моста через р. Сів. Донець на 284 км ділянки Основа – Букине Південної залізниці: а) пошкодження залізобетонного пояса біля обрізу фундаменту; б) посилений і захищений від електрокорозії пояс і опора за допомогою сталобетонної обійми, що заземлена в дно річки



Рис. 32. Залізобетонний шляхопровід на 802 км ділянки Гребінка – Черкаси Південної залізниці: а) зруйнована частина залізобетонного стояка; б) посилення і захист від електрокорозії стояка за допомогою металоін'єкційної обшивки

Способи і технології відновлення, посилення несучої здатності і захисту від електрокорозії конструкцій високих пасажирських платформ.

1. Розроблено конструктивні схеми посилення залізобетонних плит платформи.
2. Розроблено та впроваджено на дослідній опорі спосіб і технологію посилення та захисту конструкцій платформи від електрокорозії за допомогою сталобетонної напівобійми на бетонній опорі (рис. 33).
3. Розроблено способи захисту від електрокорозії конструкцій платформ поблизу водойм за допомогою підстиляючого гідроізоляційного шару-корита, а також сталевого заземленого екрана.

Способи захисту конструкцій від електрокорозії шляхом усунення струмів витоку з рейкової колії через шпали.

Розроблено та впроваджено на дослідній ділянці колії із залізобетонними шпалами Південної залізниці рейкове пружне скріплення типу УС-1 (PRS-4) з анкерами на сірчаній мастиці (Пат. 78666 UA) (рис. 34).

Всього зазначені способи, конструкції і технології впроваджені на 12 об'єктах – водопропускних трубах, шляхопроводах, мостах і тунелях при проведенні їх капітальних ремонтів.

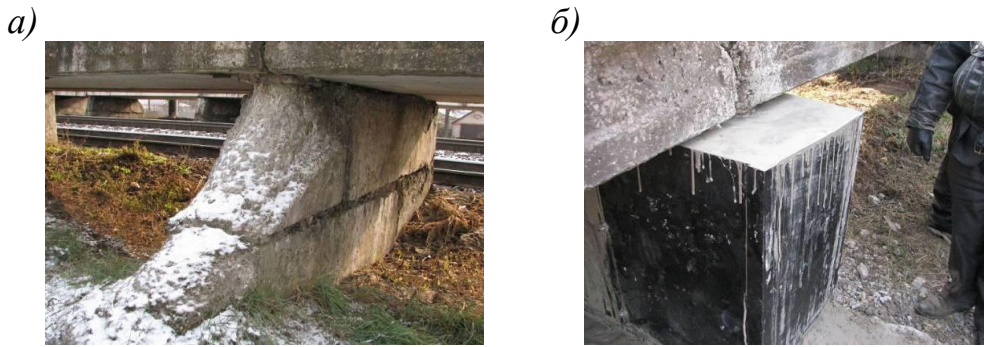


Рис. 33. Бетонна опора високої пасажирської платформи на з.п. Зелений Гай Південної залізниці: *а)* руйнування бетонної опори; *б)* підсилення за допомогою сталобетонної напівобойми

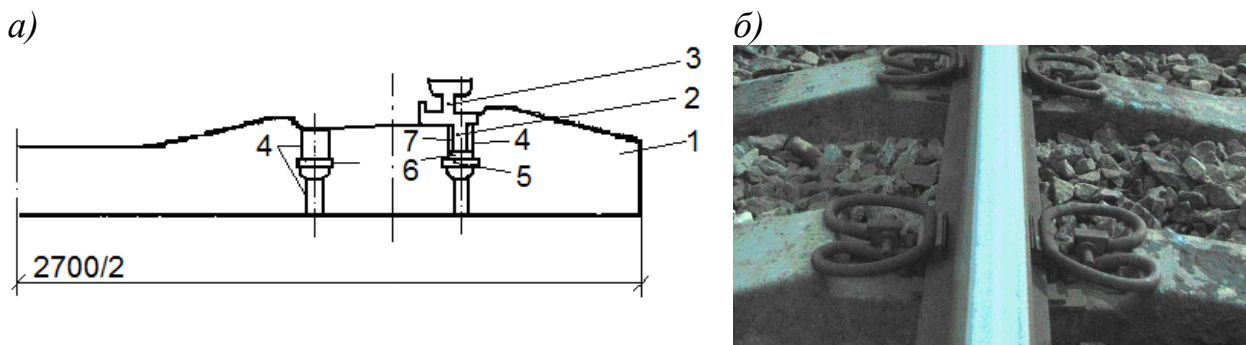


Рис. 34. Захист конструкцій від електрокорозії за допомогою рейкового скріплення типу УС-1 (PRS-4) з анкером на сірчаній мастиці з наповнювачем: *а)* залізобетонна шпала з анкером скріплення; *б)* рейкове скріплення УС-1 (PRS-4) на дослідній ділянці електрифікованої колії Південної залізниці: 1 – залізобетонна шпала; 2 – хвостовик анкера; 3 – головка анкера; 4 – отвір у шпалі під закладний болт; 5 – закладна шайба; 6 – прокладка; 7 – затверділа сірчана мастика

У результаті проведених досліджень підготовлено до випуску, випущено і затверджено: 12 нормативних документів галузевого характеру (для Укрзалізниці), Технічні умови «Склади захисні кольорові ЗС-1М і ЗС-3М для бетонних, залізобетонних і металевих конструкцій» ТУ У 45.2-01116472-105:2006, галузеві будівельні норми України (проект). Споруди транспорту. Захист будівельних конструкцій та споруд залізничного транспорту від агресивних дій.

За результатами досліджень отримано 7 патентів України на винаходи.

В результаті виконання робіт із впровадження результатів дисертації був досягнутий високий економічний ефект за рахунок відновлення несучої здатності конструкцій, продовження їх терміну служби і всієї споруди в цілому, застосування високоефективних недорогих матеріалів, нетрудомістких технологій, без залучення важкої техніки і зупинки руху поїздів, у порівнянні з традиційно використовуваними матеріалами і технологіями.

Досягнута економія за період впровадження визначена як різниця між орієнтовною вартістю реалізації типових конструктивних і технологічних рішень з фактичними витратами на проведення робіт і становить 2,8 млн грн.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Чимало обводнених бетонних, залізобетонних, кам'яних та металевих конструкцій тунелів, водопропускних труб, мостів, шляхопроводів, високих пасажирських платформ і верхньої будови колії на електрифікованих постійним струмом ділянках залізничної колії перебувають у сильно пошкодженому, нерідко аварійному стані, мають низьку довговічність, вимагають великих експлуатаційних витрат. Основною причиною цих інтенсивних пошкоджень і передчасного зниження довговічності конструкцій є недосконалість теорії міцності і електрокорозії бетону і сталі.

2. Виконаний аналіз існуючих теоретичних уявлень і теорій, а також нормативних документів показав, що чинні норми і методика визначення електрокорозійної небезпеки залізобетонних конструкцій не дають змоги досить вірогідно оцінити дійсний стан обводнених конструкцій, традиційні уявлення про природу електрохімічного механізму корозії сталі є недосконалими, тому що не відображають реальну мікро- і субмікроструктуру сталі, електроповерхневі властивості її структурних елементів.

3. Виконані натурні дослідження обводнених кам'яних, бетонних, залізобетонних і сталевих конструкцій водопропускних труб, високих пасажирських платформ, мостів, шляхопроводів, тунелів, а також рейок на електрифікованих постійним струмом ділянках колії. Встановлено, що при проходженні електрорухомого складу в бетонних стінах водопропускних труб виникають позитивні потенціали (по відношенню до «землі»), величина яких усередині бетону істотно вища, ніж на внутрішній поверхні труби, що свідчить про протікання струму витоку через тіло бетону. На високих пасажирських платформах з бетонними опорами найбільшою мірою пошкоджені бетонні опори, а із залізобетонними стояками і ригелями – залізобетонні ребристі плити. Інтенсивність електрокорозійного руйнування бетонних і залізобетонних конструкцій платформ залежить від їх відстані до водойми або водотоку. Контактна мережа, закріплена на конструкціях шляхопроводів і мостів, викликає інтенсивне електрокорозійне пошкодження і руйнування бетону та арматури прогонових будов і опор.

4. Встановлено причини аномально високих корозійних руйнувань у конструкціях тунелів на неелектрифікованих і електрифікованих ділянках колії, які полягають в існуванні надлишкового позитивного заряду у ґрунтових масивах, що вміщують тунель, і в конструкціях тунелю. Зокрема, в Лутугинському тунелі цей заряд обумовлений великим його заглибленням, у Троїцькому тунелі – його розташуванням на узбережжі моря в оточенні затоки з трьох боків.

5. Розвинуто нові теоретичні уявлення:

– про природу струму витоку з рейок на електрифікованій постійним струмом колії, яка полягає в тому, що насправді це пульсуючий односпрямований постійний струм;

– про електрокорозійне руйнування цементного каменю, яке полягає в розчиненні під дією пульсуючої напруги блоків портландиту $Ca(OH)_2$, зменшенні при цьому концентрації електрогетерогенних контактів ЕГК з одиничними контактами між катіонами Ca^{2+} і аніонами OH^- , виникненні за рахунок цього надлишкових електрогетерогенних контактів між частинками об'ємного гелю і

відштовхування між ними, що обумовлює виникнення внутрішніх напружень розтягування;

– про залежність електрокорозійної пошкоджуваності залізобетонних опор контактної мережі від гігантських за величиною надлишкових природних та антропогенних зарядів;

– про ємнісну провідність бетону, зумовлену його гігантською діелектричною проникністю, що в умовах пульсуючого односпрямованого постійного струму створює порівнянну з активною і навіть перевищуючу її ємнісну провідність $2\pi fC$.

6. Розвинуто нові уявлення про основні механізми формування міцності і електрокорозії сталі, у т.ч. рейок, з урахуванням її мікро- і субмікроструктури, згідно з яким під впливом зовнішнього електричного потенціалу на поверхні блоків і зерен сталі виникає додатковий електроповерхневий потенціал, що призводить до збільшення на поверхні феритового блоку (зерна) латерального електроповерхневого відштовхування між потенціалвизначальними іонами, що спричинює електрокорозію сталі.

7. Розроблено близькі до реальних принципово нові схеми протікання електрокорозійних струмів через бетонні та залізобетонні конструкції, в тому числі для опор контактної мережі, обробки тунелів, високих пасажирських платформ, звичайних шляхопроводів і мостів, висячих зруйнованих і аномально коливних мостів.

8. Лабораторно-експериментальні та фізико-хімічні дослідження бетонних зразків, що перебували в проточній воді під тривалим впливом пульсуючої односпрямованої постійної напруги, а також експериментальні модельні дослідження виникнення електричного поля від контактного проводу підтвердили, що під дією цих напруги і електричного поля бетон піддається електрокорозії. Комплексні фізико-хімічні дослідження проб цементного каменю, відібраних з бетонних зразків, що перебували в проточній воді під тривалим впливом пульсуючої односпрямованої постійної напруги, підтвердили зміну фазового складу цементного каменю, розчинення C_3S і портландиту, різке зниження основності гідросилікатів кальцію.

Експериментальні модельні дослідження підтвердили ефективність екрануючого захисту бетонних і залізобетонних елементів.

9. Розроблено і впроваджено комплекс нових методик проведення експлуатаційних досліджень електрокорозійної небезпеки бетонних, залізобетонних, кам'яних і металевих конструкцій споруд, а також високоефективні матеріали і технології для їх захисту від електрокорозії і забезпечення несучої здатності і високої довговічності.

10. За результатами досліджень випущені такі нормативні документи: Технічні вказівки до захисту конструкцій мостів від корозії, що виникає від блукаючих струмів; 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 зі зменшення та усунення тріщиноутворення дерев'яних шпал та брусів; Рекомендації із захисту та підсилення будівель та споруд станційних комплексів, що руйнуються від спільної дій електричного струму, вібрації,

грунтових вод; Рекомендації із захисту від корозії елементів верхньої будови колії в залізничних тунелях; Рекомендації із закріплення слабких ґрунтів основ будівель та споруд, що експлуатуються на залізницях України; Рекомендації із забезпечення тріщиностійкості плит безбаластного мостового полотна, ЦП-0224; Рекомендації із захисту від електрокорозії конструкцій шляхопроводів, на яких закріплена контактна мережа; Рекомендації із захисту та підсилення конструкцій пасажирських платформ на електрифікованих ділянках залізниць; Рекомендації з усунення тріщин у стінах будівель станційних комплексів; Рекомендації з улаштування полімеркомпозиційного прокладного шару під збірним та збірномонолітним залізобетонним безбаластним мостовим полотном; Галузеві будівельні норми України (проект). Споруди транспорту. Захист будівельних конструкцій та споруд залізничного транспорту від агресивних дій; Технічні умови «Склади захисні кольорові ЗС-1М і ЗС-3М для бетонних, залізобетонних і металевих конструкцій» ТУ У 45.2-01116472-105:2006. За результатами досліджень отримані 7 патентів на винаходи.

11. Матеріали дисертації використовуються в УкрДАЗТ у навчальному процесі при підготовці спеціалістів та магістрів будівельних спеціальностей, а також при підвищенні кваліфікації фахівців підприємств залізничного транспорту.

12. Основний економічний ефект за період впровадження розробок за дисертацією склав 2 803 745 грн. Він обумовлений виконанням капітальних ремонтів у поєднанні із захистом від електрокорозії споруд замість повної заміни пошкоджених конструкцій новими, а також збільшенням міжремонтних термінів.

Основні положення дисертації опубліковані в таких роботах:

1. Плугин А.Н. Основы теории твердения, прочности, разрушения и долговечности портландцемента, бетона и конструкций из них: Монография в 3-х тт. Т. 2. Теория твердения портландцемента / А.Н. Плугин, А.А. Плугин, О.А. Калинин, С.В. Мирошниченко, Д.А. Плугин, А.С. Кагановский, Ал.А. Плугин, О.В. Градобоев; Под ред. А.Н. Плуцина. – К.: Наук. думка, 2012. – 224 с. *Особистий внесок*: Розрахунки рівноважних блоків кристалогідратів цементного каменю.
2. Плугин А.Н. Основы теории твердения, прочности, разрушения и долговечности портландцемента, бетона и конструкций из них: Монография в 3-х тт. Т. 3. Теория прочности, разрушения и долговечности бетона, железобетона и конструкций из них / А.Н. Плугин, А.А. Плугин, О.А. Калинин, С.В. Мирошниченко, Д.А. Плугин, А.С. Кагановский, Ал.А. Плугин, О.В. Градобоев, О.С. Борзяк; Под ред. А.Н. Плуцина. – К.: Наук. думка, 2012. – 288 с. *Особистий внесок*: Нові уявлення про міцність і електрокорозійне руйнування бетону під впливом струмів витоку.
3. Плугин А.Н. Долговечность конструкций и сооружений из бетона, эксплуатируемых в условиях обводнения / А.Н. Плугин, А.А. Плугин, О.А. Калинин, Д.А. Плугин, О.С. Борзяк, А.В. Никитинский, О.С. Герасименко // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. – К.: НТУ, 2006. – № 73. – С. 248 – 253. *Особистий внесок*: Розрахунок фільтраційного виносу продуктів корозії цементного каменю у водне середовище.
4. Плугин А.Н. Теоретические предпосылки создания теории электрогетерогенного твердения портландцемента, прочности, разрушения и долговечности бетона / А.Н. Плугин, А.А. Плугин, О.А. Калинин, С.В. Мирошниченко, Д.А. Плугин //

Збірник наукових праць УкрДАЗТ. – 2006. – Вип. 77. – С. 5 – 70. *Особистий внесок*: Розрахунки сил електроповерхневого латерального відштовхування для $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

5. Плугин А.Н. Новый принцип соответствия как основа надежности и долговечности бетонных, железобетонных и каменных конструкций в сложных условиях эксплуатации / А.Н. Плугин, А.А. Плугин, Д.А. Плугин, О.А. Калинин, С.В. Мирошниченко // Збірник наукових праць УкрДАЗТ. – 2007. – Вип. 87. – С. 13 – 24. *Особистий внесок*: Формулювання складової принципу щодо стійкості бетону і розчину по відношенню до дії блукаючих струмів і струмів витоку, поєднаних з обводненням.

6. Плугин А.Н. Электроосмотический перенос как фактор разрушения железобетонных и каменных опор железнодорожных мостов на водотоках / А.Н. Плугин, А.А. Плугин, С.В. Мирошниченко, Д.А. Плугин, О.С. Борзяк // Збірник наукових праць ЛНАУ. Серія: Технічні науки. – Луганськ: ЛНАУ, 2007. – № 71 (94).

С. 189 – 196. *Особистий внесок*: Теоретичне обґрунтування виникнення електроосмотичного переносу в цементному камені конструкцій мостів на водотоках під дією струму витоку з рейкової колії.

7. Плугин А.Н. Основные факторы трещинообразования и разрушения опор мостов через реки на электрифицированных участках железных дорог / А.Н. Плугин, А.А. Плугин, С.В. Мирошниченко, В.А. Лютый, Д.А. Плугин // Дороги і мости: Зб. наук. праць. – К.: ДерждорНДІ, 2007. – Вип. 7. – Т. II. – С. 121 – 127. *Особистий внесок*: Критичний аналіз існуючих уявлень про фактори передчасних руйнувань обводнених бетонних і залізобетонних конструкцій споруд, що експлуатуються на електрифікованих ділянках залізниць.

8. Плугин А.Н. Механизм электрокоррозии бетонных конструкций пульсирующим однонаправленным блуждающим током или током утечки / А.Н. Плугин, А.А. Плугин, С.В. Мирошниченко, Д.А. Плугин, О.С. Борзяк, А.В. Романенко // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХДТУБА; ХОТВ АБУ, 2007. – Вип. 42. – С. 106 – 111. *Особистий внесок*: Участь у складі колективу авторів в натурних дослідженнях конструкцій споруд, аналіз їх результатів, формулювання способів усунення електрокорозії бетону обводнених конструкцій.

9. Плугин А.Н. Блуждающие токи на конструкциях, зданиях и сооружениях, расположенных вблизи электрифицированных постоянным током участков железных дорог / А.Н. Плугин, А.А. Плугин, О.А. Калинин, Д.А. Плугин, Ал.А. Плугин, А.А. Дудин, О.С. Борзяк // Збірник наукових праць УкрДАЗТ. – 2009. – Вип. 109. – С. 131 – 143. *Особистий внесок*: Розробка методики експериментальних досліджень електричних потенціалів на рейках, поверхні ґрунту, будівлях і спорудах.

10. 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 // Вісник НТУ. – 2009. – № 40. – С. 88 – 104. *Особистий внесок*: Аналіз даних експериментальних досліджень електричних характеристик бетону в лабораторних умовах і фізико-хімічних досліджень цементного каменю.

11. Плугин А.Н. Механизм 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. Серія: Технічні науки. – Луганськ: ЛНАУ, 2010. – № 14. – С. 250 – 270. *Особистий внесок*: Кількісний опис механізму утворення рівноважних блоків фериту в маловуглецевій сталі під дією сил латерального електроповерхневого відштовхування.

12. Плугін А.А. Аналіз впливу агресивних дій на конструкції та споруди залізниць: Верхня будова колії в залізничних тунелях / А.А. Плугін, А.М. Плугін, Д.А. Плугін, О.С. Борзяк, О.О. Скорик, О.А. Конєв // Збірник наукових праць УкрДАЗТ. – 2011. – Вип. 122. – С. 187 – 201. *Особистий внесок*: Планування та проведення експериментальних досліджень потенціалів на рейках і конструкціях тунелів, порівняльний аналіз і виділення закономірності впливу основних факторів на інтенсивність корозійного руйнування рейок.

13. Борзяк О.С. Исследование состава водной среды, контактирующей с бетоном, подвергающимся электрокоррозии / О.С. Борзяк, Ал.А. Плугин, Д.А. Плугин // Вісник НТУ. – 2011. – № 27. – С. 138 – 145. *Особистий внесок*: Аналіз даних лабораторних досліджень, розроблення методики розрахунку втрати маси бетонного зразка виходячи зі зміни загальної жорсткості води, що контактує із бетонним зразком.

14. Плугин А.Н. Развитие некоторых аспектов коллоидной химии и физико-химической механики дисперсных систем и материалов применительно к устойчивости откосов и склонов / А.Н. Плугин, Л.В. Трикоз, О.С. Герасименко, А.А. Плугин, Д.А. Плугин, Ал.А. Плугин // Вісник ДНУЗТ. – 2011. – Вип. 39. – С. 150 – 156. *Особистий внесок*: Розроблення методики вимірювання електричних потенціалів на схилі залізничного насипу, проведення експериментальних досліджень.

15. Плугін Д.А. Оцінка можливого впливу замкненого простору в тунелі на величину потенціалу на рейці / Д.А. Плугін, А.М. Плугін, А.А. Плугін, О.С. Тіряєв // Збірник наукових праць УкрДАЗТ. – 2011. – Вип. 127. – С. 175 – 183. *Особистий внесок*: Планування та проведення експериментальних досліджень потенціалів на рейках і конструкціях тунелів, аналіз їх результатів.

16. Плугин А.А. Механизм электрокоррозии железобетонных конструкций под действием высоковольтного переменного напряжения в контактных проводах / А.А. Плугин, А.Н. Плугин, Д.А. Плугин, О.С. Борзяк, Ал.А. Плугин, А.А. Дудин // Комунальне господарство міст. Науково технічний збірник. Серія: Технічні науки та архітектура – Харків: ХНАМГ, 2012. – Вип. 103. – С. 13 – 23. *Особистий внесок*: Кількісний опис впливу змінної напруги в контактних проводах на електрокорозію цементного каменю в бетоні конструкцій.

17. Плугин А.А. Теоретические предпосылки создания количественной теории электрокоррозии стали и защиты от нее / А.А. Плугин, А.Н. Плугин, Ю.Н. Горбачова, А.В. Афанасьев, Д.А. Плугин // Збірник наукових праць УкрДАЗТ. – 2012. –

Вип. 129. – С. 169 – 173. *Особистий внесок*: Критичний аналіз існуючих уявлень про формування міцності сталі з урахуванням її мікро- і субмікроструктури.

18. Плугін Д.А. Розробка конструктивних рішень захисту від електрокорозії конструкцій шляхопроводів, на яких закріплена контактна мережа / Д.А. Плугин // Збірник наукових праць УкрДАЗТ. – 2012. – Вип. 130. – С. 90 – 99.

19. Плугін Д.А. Дослідження впливу водойм і водотоків на електрокорозію конструкцій пасажирських платформ / Д.А. Плугін // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХНУБА; ХОТВ АБУ, 2013. – Вип. 71. – С. 254 – 259.
20. Плугін Д.А. Захист конструкцій пасажирських платформ від електрокорозії під дією струму витоку з рейкової колії / Д.А. Плугін // Збірник наукових праць УкрДАЗТ. – 2013. – Вип. 138. – С. 90 – 94.
21. Плугін Д.А. Дослідження й розвиток кількісних уявлень про мікроструктуру сталі: механічні властивості сталі залізничних рейок / Д.А. Плугін // Вісник НТУ. – 2013. – № 47 (1020). – С. 106 – 112.
22. Плугін Д.А. Дослідження й розвиток кількісних уявлень про мікроструктуру сталі: механізм зношування й тріщиноутворення залізничних рейок / Д.А. Плугін // Вісник НТУ. – 2013. – № 64 (1037). – С. 129 – 142.
23. Плугин Д.А. Коррозия верхнего строения пути в железнодорожных тоннелях: Определение сроков эксплуатации / Д.А. Плугин // Промышленный транспорт Казахстана. – Алматы: КУПС, 2013. – № 3 (40). – С. 13 – 19.
24. Plugin D.A. Electro-corrosion of constructions of bridges on electrified by a direct current sections of railways / D.A. Plugin, A.N. Plugin, Al.A. Plugin, O.S. Borzyak // Nauka i Studia. Techniczne nauki budownictwo i architektura nowoczesne informacyjne technologie. – Przemyśl, 2013. – № 30 (98). – S. 69 – 77. *Особистий внесок:* Планування експериментів та аналіз їх результатів.
25. Пат. 71208 UA МПК 7 С 04 В 28/12. Суперпластифікована цементно-водяна суспензія СПЦВС для цементації гірських порід і будівельних конструкцій / А.М. Плугін, Арт. М.Плугін, О.А. Калінін, С.В. Мірошніченко, А.А. Плугін, Д.В. Шумик, Д.А. Плугін, А.В. Никитинський, В.А. Лютий, М.Д. Костюк; заявник та патентовласник Українська держ. академія залізнич. тр-ту. – № 20031210920; заявл. 02.12.2003; опубл. 25.02.2008, Бюл. №4. *Особистий внесок:* Дослідження властивостей СПЦВС і формулювання вимог для її використання у складі конструкцій в умовах електрокорозії.
26. Пат. 87795 UA МПК С 04 В 28/26 Е 01 С 21/00. Рідкоскляна композиція / 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; заявник та патентовласник Українська держ. академія залізнич. тр-ту. – № а 200811931; заявл. 07.10.2008; опубл. 10.08.2009, Бюл. № 15. *Особистий внесок:* Теоретичне обґрунтування вимог, що висуваються до рідкоскляної композиції для її використання як електроізоляційного екрана для обводнених конструкцій.
27. Пат. 99426 UA МПК (2012.01) G01N 33/38 (206.01) C04B 28/00. Особливошвидкотверднучий безпропарювальний бетон / А.А. Плугін, А.М. Плугін, О.В. Романенко, О.А. Плугін, О.А. Калінін, Д.А. Плугін, С.В. Мірошніченко; заявник та патентовласник Українська держ. академія залізнич. тр-ту. – № а 201114838; зявл. 14.12.2011; опубл. 10.08.2012, Бюл. № 15. *Особистий внесок:* Формулювання критеріїв електрокорозійної стійкості бетону.
28. Плугін А.М. Електроміграційний перенос у процесах корозії бетону / А.М. Плугін, Д.А. Плугін, І.В. Подтележнікова, О.С. Борзяк // Збірник наукових праць УкрДАЗТ. – 2006. – Вип. 77. – С. 130 – 138. *Особистий внесок:* Розробка механізму проходження струмів витоку через конструкції моста.
29. Плугин А.Н. Экспериментальное определение потенциалов в конструкциях железнодорожных мостов на электрифицированных участках пути / А.Н. Плугин,

- Д.А. Плугін, В.А. Лютий, І.В. Подтележникова, О.С. Борзяк, А.А. Плугін // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. – К.: НТУ, 2006. – № 73. – С. 253 – 257. *Особистий внесок*: Вимірювання потенціалів на конструкціях металевої ферми, розробка фізико-математичної моделі електрокорозії захисного шару плити БМП.
30. Плугін А.А. Аналіз впливу агресивних дій на конструкції та споруди залізниць: промислові та цивільні будівлі та споруди / А.А. Плугін, В.І. Наконечний, Є.Г. Щур, О.А. Калінін, С.В. Мірошніченко, Д.А. Плугін // Збірник наукових праць УкрДАЗТ. – 2007. – Вип. 87. – С.68 – 78. *Особистий внесок*: Аналіз умов експлуатації конструкцій і споруд на залізницях України.
31. Плугін А.А. Аналіз впливу агресивних дій на конструкції та споруди залізниць: Огляд характерних пошкоджень залізобетонних, бетонних і кам'яних конструкцій штучних споруд / А.А. Плугін, В.О. Систренський, О.О. Скорик, С.В. Мірошніченко, О.А. Калінін, Д.А. Плугін // Збірник наукових праць УкрДАЗТ. – 2007. – Вип. 87. – С. 79 – 88. *Особистий внесок*: Аналіз впливу постійних струмів витоку як одного з руйнівних факторів на конструкції штучних споруд залізниць.
32. Плугін Д.А. Реконструкція моста-пам'ятника архітектури та містобудування із забезпеченням сучасної вантажопідйомності / Д.А. Плугін, А.А. Плугін, С.В. Мірошніченко, О.В. Лобяк // Збірник наукових праць УкрДАЗТ. – 2009. – Вип. – 109, С. 189 – 212. *Особистий внесок*: Аналіз природних і антропогенних впливів на конструкції моста. Обґрунтування рішень щодо забезпечення несучої здатності, надійності і довговічності конструкцій моста.
33. Плугін А.Н. Повышение эффективности пропитки деревянных шпал каменноугольным маслом за счет введения катионных ПАВ / А.Н. Плугін, Д.А. Плугін, О.С. Борзяк // Збірник наукових праць УкрДАЗТ. – 2007. – Вип. 87. – С. 98 – 107. *Особистий внесок*: Теоретичні дослідження та формулювання наукової гіпотези. Розробка просочувальних складів для підвищення ефективності просочення дерев'яних шпал.
34. Плугін А.М. Зменшення та усунення тріщиноутворення дерев'яних шпал і брусів та поліпшення їх електроізолювальних властивостей / А.М. Плугін, Д.А. Плугін, О.С. Борзяк, А.А. Плугін // Дороги і мости: Зб. наук. праць. У 2-т. – К., 2007. – Т. II, Вип. 7. – С. 114 – 120. *Особистий внесок*: Обґрунтування модифікації просочувального складу для зменшення та усунення тріщиноутворення дерев'яних шпал і брусів і поліпшення їх електроізолюючих властивостей. Аналіз даних лабораторних досліджень.
35. Пат. №78666 UA, МПК Е 01 В 9/30, Е 01 В 9/68. Пружне рейкове скріплення PRS-4 / А.М. Плугін, О.І. Белорусов, С.В. Мірошніченко, О.А. Калінін, А.А. Плугін, Д.А. Плугін, В.А. Лютий, А.В. Никитинський, П.В. Рагулін, А.О. Івановський; заявник та патентовласник Українська держ. академія залізнич. тр-ту. – № а 2006 10793; заявл. 12.10.2006; опубл. 10.04.2007, Бюл. № 4. *Особистий внесок*: Обґрунтування вимог, що висуваються до амортизуючої прокладки та ізолюючого вкладиша з метою підвищення електричного опору ланцюга на ділянці рейка – шпала.
36. Пат. 78667 UA, МПК Е 01 В 3/00. Шпала Ш-1-1-PRS / А.М. Плугін, А.А. Плугін, О.І. Белорусов, С.В. Мірошніченко, О.А. Калінін, Д.А. Плугін, П.В. Рагулін, В.О. Яковлев; заявник та патентовласник Українська держ. академія залізнич. тр-ту. – № а 2006 10861; заявл. 16.10.2006; опубл. 10.04.2007, Бюл. № 4. *Особистий внесок*: Розробка конструкції підрейкової площадки шпали з пазами для надійної фіксації

пружної електроізолюючої підрейкової прокладки з метою підвищення електричного опору ланцюга на ділянці рейка – шпала.

37. Пат. 88998 UA, МПК E 04 B 1/66, E 04 B 1/62. Спосіб визначення електрокорозійної стійкості захисних покриттів / А.А. Пługін, А.М. Пługін, І.В. Потележнікова, О.В. Афанасьєв, Ю.М. Горбачова, С.В. Мірошніченко, Д.А. Пługін, О.А. Пługін, О.А. Дудін, О.С. Борзяк; заявник та патентовласник Українська держ. академія залізнич. тр-ту. – № а 2008 11897; заявл. 07.10.2008; опубл. 10.12.2009, Бюл. № 23. *Особистий внесок*: Формулювання критеріїв оцінки електрокорозійної стійкості захисних покриттів.

38. Пат. 94875 UA, МПК G 01 N 27/02. Спосіб вимірювання вологості і визначення вологісного стану ґрунтів, у тому числі на глибині / А.А. Пługін, А.М. Пługін, Л.В. Трикоз, О.С. Герасименко, Д.А. Пługін, О.А. Дудін, В.А. Лютий, О.А. Пługін; заявник та патентовласник Українська держ. академія залізнич. тр-ту. – № а 2010 09447; заявл. 28.07.2010; опубл. 10.06.2011, Бюл. № 11. *Особистий внесок*: Розробка методики тарування датчика залежно від вологості ґрунту.

39. Пługин А.Н. Проектирование долговечности конструкций и сооружений из бетона на основе физико-химических моделей / А.Н. Пługин, А.А. Пługин, О.С. Борзяк, О.А. Калинин, С.В. Мирошниченко, Д.А. Пługин // Компьютерное материаловедение и обеспечение качества. – Одесса: Астропринт, 2006. – С. 10 – 14. *Особистий внесок*: Формулювання теоретичних положень моделі вилуговування бетону при фільтрації води.

40. Пługин А.Н. Проектирование долговечности конструкций и сооружений из бетона на основе физико-химических моделей / А.Н. Пługин, А.А. Пługин, О.С. Борзяк, О.А. Калинин, С.В. Мирошниченко, Д.А. Пługин, В.А. Лютий, А.В. Никитинский // Aktualne problemy naukowo-badawcze budownictwa. – Olsztyn, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski, 2006. – S. 143 – 152. *Особистий внесок*: Розробка моделі вилуговування бетону при фільтрації води.

41. Arkadiy N. Plugin Electro-corrosion of constructions of bridges on electrified by a direct current sections of railways / Arkadiy N. Plugin, Dmitriy A. Plugin, Aleksei A. Plugin, Aleksei A. Dudin // Theory and practice in bridge engineering. – Sofia, Published by Color Studio, 2010. – P. 167 – 172. *Особистий внесок*: Теоретичне обґрунтування методики лабораторних досліджень впливу пульсуючої односпрямованої напруги на бетонні зразки, планування експериментів та аналіз їх результатів.

42. Plugin A.A. Quantitative Theory of Strength of Portland Cement Stone, Including with Mineral Additions / A.A. Plugin, A.N. Plugin, O.A. Kalinin, S.V. Miroshnichenko, D.A. Plugin, L.V. Trikoz // 18 Internationale Baustofftagung. – Weimar: Bauhaus-Universität Weimar, 2012. – Band 1. – P. 0874 – 0881. *Особистий внесок*: Розробка схем реальної поверхні розриву (розколювання) цементного каменю з урахуванням несучільності електрогетерогенних контактів і виведення відповідних виразів для міцності цементного каменю.

43. Plugin D.A. Electro-corrosion of constructions of railway tunnels / D.A. Plugin, A.N. Plugin, Al.A. Plugin, O.S. Borzyak // Aplikovane vědecke novinky – 2013. – Praha, 2013. – P. 52 – 58. *Особистий внесок*: Планування та проведення експериментальних досліджень потенціалів на рейках і конструкціях тунелів, аналіз їх результатів.

44. Нові технології гідроізоляції та підсилення мостів, будівель та інших споруд, що руйнуються / А.М. Пługін, Ю.М. Федюшин, А.А. Пługін, С.В. Мірошніченко, О.А. Калінін, Д.А. Пługін. Реєстраційна картка технології. – УкрІЕНТІ. –

№ 0606U000057. – 2006. – 96 с. *Особистий внесок*: Дослідження властивостей СПЦВС і формулювання вимог для її використання у складі конструкцій в умовах електрокорозії, формулювання критеріїв електрокорозійної стійкості бетону.

45. Нові технології гідроізоляції та підсилення тунелів та інших споруд, що руйнуються / А.М. Плугін, А.А. Плугін, С.В. Мірошніченко, О.А. Калінін, Д.А. Плугін. Реєстраційна картка технології. – УкрІЕНТІ. – № 0606U000058 –2006. – 98 с. *Особистий внесок*: Дослідження властивостей СПЦВС і формулювання вимог для її використання у складі конструкцій в умовах електрокорозії, формулювання критеріїв електрокорозійної стійкості бетону.

АНОТАЦІЯ

Плугін Д.А. Розвиток теорії електрокорозії обводнених конструкцій і розробка електрокорозійностійких матеріалів і способів захисту. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.23.05 – будівельні матеріали та виробу. – Українська державна академія залізничного транспорту МОН України, Харків, 2014.

Дисертація присвячена створенню нових кількісних теоретичних уявлень про електрокорозію обводнених бетонних і залізобетонних конструкцій споруд, що експлуатуються на електрифікованих ділянках залізничної колії, і створенню вискоефективних матеріалів і технологій захисту від електрокорозії. Теоретичною основою при цьому стали основні закономірності колоїдної хімії і фізико-хімічної механіки дисперсних систем і матеріалів.

Виконаний критичний аналіз існуючих даних про електрокорозійний стан бетонних і залізобетонних конструкцій споруд на електрифікованих постійним струмом ділянках колій і теоретичних уявлень про механізм електрокорозії бетону і залізобетону.

Розвинені нові теоретичні уявлення про електрокорозійне руйнування цементного каменю, про залежність електрокорозійної пошкоджуваності залізобетонних опор контактної мережі від гігантських за величиною надлишкових природних та антропогенних зарядів, про ємнісну провідність бетону. Розвинені нові уявлення про основні механізми електрокорозійного зносу і тріщиноутворення сталі в головці рейки, розроблені близькі до реальних принципово нові схеми протікання електрокорозійних струмів через бетонні і залізобетонні конструкції. Виконані лабораторно-експериментальні дослідження бетонних та залізобетонних зразків, що перебували в проточній воді під тривалою дією пульсуючої постійної напруги.

Розроблені нормативні документи галузевого призначення. Розроблені, пройшли експлуатаційну перевірку і упроваджені вискоефективні матеріали і технології для захисту обводнених бетонних, залізобетонних і кам'яних конструкцій від електрокорозії, забезпечення несучої здатності і високої довговічності.

Ключові слова: бетон, залізобетон, конструкції, залізничні, обводнення, струми витоку, заряд, контактна мережа, електрокорозія, теорія, захист, матеріали.

АННОТАЦИЯ

Плугин Д.А. Развитие теории электрокоррозии обводненных конструкций и разработка электрокоррозионностойких материалов и способов защиты. – На правах

рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.23.05 – строительные материалы и изделия. – Украинская государственная академия железнодорожного транспорта МОН Украины, Харьков, 2014.

Диссертация посвящена созданию новых количественных теоретических представлений об электрокоррозии обводненных бетонных и железобетонных конструкций сооружений, эксплуатирующихся на электрифицированных участках железнодорожного пути, и созданию высокоэффективных материалов и технологий защиты от электрокоррозии. Теоретической основой при этом явились основные закономерности коллоидной химии и физико-химической механики дисперсных систем и материалов.

Выполнен критический анализ существующих данных об электрокоррозионном состоянии бетонных и железобетонных конструкций сооружений на электрифицированных постоянным током участках пути и теоретических представлений о механизме электрокоррозии бетона и железобетона. Выполнены натурные исследования обводненных бетонных, каменных, железобетонных и стальных конструкций водопропускных труб, высоких пассажирских платформ, мостов, путепроводов тоннелей, а также рельсов на электрифицированных постоянным током участках пути.

Развиты новые теоретические представления: – о природе тока утечки с рельсов на электрифицированном постоянным током пути, которая заключается в том, что в действительности это пульсирующий однопольный постоянный ток; – об электрокоррозионном разрушении цементного камня в обводненном бетоне, которое заключается в растворении под действием пульсирующего напряжения блоков портландита $Ca(OH)_2$, уменьшении при этом концентрации электрогетерогенных контактов ЭГК с единичными контактами между катионами Ca^{2+} и анионами OH^- , возникновении за счет этого избыточных электрогомогенных контактов ЭГомК между частицами объемного геля и отталкивания между ними, что обуславливает возникновение внутренних растягивающих напряжений; – о зависимости электрокоррозионной повреждаемости железобетонных опор контактной сети от гигантских по величине избыточных природных и антропогенных зарядов; – о емкостной проводимости бетона, обусловленной его гигантской диэлектрической проницаемостью, что в условиях пульсирующего однопольного постоянного тока создает сопоставимую с активной и даже превышающую ее емкостную проводимость $2\pi fC$.

Развиты новые представления об основных механизмах формирования прочности, электрокоррозионного износа и трещинообразования стали в головке рельса с учетом ее микро- и субмикроструктуры. Разработаны близкие к реальным принципиально новые схемы протекания электрокоррозионных токов через бетонные и железобетонные конструкции, в том числе для опор контактной сети, обделки тоннелей, высоких пассажирских платформ, путепроводов и мостов.

Выполнены лабораторно-экспериментальные физико-механические и физико-химические исследования бетонных и железобетонных образцов, находящихся в проточной воде под длительным воздействием пульсирующего однопольного

постоянного напряжения, экспериментальные исследования воздействия пульсирующего напряжения на рельсы, скрепления и бетон под ними в условиях обводнения, а также экспериментальные модельные исследования возникновения электрического поля от контактного провода. Разработана и применена для исследований лабораторная установка по испытанию бетонных и железобетонных образцов в высоковольтном электрическом поле.

Разработаны нормативные документы отраслевого назначения.

Разработаны, прошли эксплуатационную проверку и внедрены комплекс новых методик проведения эксплуатационных исследований электрокоррозионной опасности бетонных, железобетонных, каменных и металлических конструкций сооружений, а также высокоэффективные материалы и технологии для защиты обводненных бетонных, железобетонных и каменных конструкций от электрокоррозии, обеспечения несущей способности и высокой долговечности.

Ключевые слова: бетон, железобетон, конструкции, железнодорожные, обводнение, токи утечки, заряд, контактная сеть, электрокоррозия, теория, защита, материалы.

SUMMARY

Plugin D.A. Development of theory of electro-corrosion of flooding constructions and development of materials with electro-corrosion resistance and methods of protection. – As a manuscript.

Dissertation for the degree of doctor of technical sciences, specialty 05.23.05 – building materials and products. – Ukrainian State Academy of Railway Transport of MES of Ukraine, Kharkov, 2014.

Dissertation is devoted to the creation of new quantitative theoretical notions of electro-corrosion of flooded concrete and reinforced-concrete constructions of structures, which are exploited on the electrified areas of railway and to creation of high-efficiency materials and technologies of protection from electro-corrosion. Theoretical basis for this were the basic laws of colloid chemistry and physical and chemical mechanics of disperse systems and materials.

It is made a critical analysis of existing data of the electro-corrosion state of concrete and reinforced concrete construction on the areas of railway electrified by the direct current and theoretical notions of mechanism of electro-corrosion of concrete and reinforced concrete.

There are developed new theoretical notions of electro-corrosion destruction of cement stone, notions of dependence of electro-corrosion defectiveness of reinforced-concrete supports of contact network on huge excess natural charges, notions of capacity conductivity of concrete.

There are developed new notions of basic mechanisms of electro-corrosive wear and cracking in a rail head, also are developed close to real fundamentally new scheme of flowing of electro-corrosive currents through concrete and reinforced-concrete constructions.

A laboratory experimental researches of concrete standards which were in running water under the protracted action of pulsating direct voltage are done.

A high-efficiency materials and technologies for protecting of flooding concrete, re-

inforced-concrete and stone constructions from electro-corrosion are developed, passed operational test and implementation.

Keywords: concrete, reinforced concrete, constructions, railway, flooding, leakage current, charge, contact network, electro-corrosion, theory, protection, materials.

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

РОЗВИТОК ТЕОРІЇ ЕЛЕКТРОКОРОЗІЇ ОБВОДНЕНИХ КОНСТРУКЦІЙ І РОЗРОБКА ЕЛЕКТРОКОРОЗІЙНОСТІЙКИХ МАТЕРІАЛІВ І СПОСОБІВ ЗАХИСТУ

Плугін Дмитро Артурович

Відповідальний за випуск
Партала Н.М.

Підписано до друку _____._____.2014 р.
Формат паперу 60×84 1/16. Папір офсетний.
Друк офсетний. Умовн.-друк.арк. 1,8.
Замовл. № _____. Тираж 100 пр. Безкоштовно

Видавництво УкрДАЗТ. Свідоцтво ДК № 2874 від 12.06.2007 р.
Типографія УкрДАЗТ: майдан Фейєрбаха, 7, м. Харків, 61050.