

УКРАИНСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ  
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

На правах рукописи

Борзяк Ольга Сергеевна

УДК 620.193.7:691.32

**МЕХАНИЗМ ЭЛЕКТРОКОРРОЗИИ БЕТОНА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ  
КОНСТРУКЦИЙ В СЛОЖНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

Специальность **05.23.05** – строительные материалы и изделия

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
Плугин Аркадий Николаевич,  
лауреат Государственной премии Украины  
в области науки и техники, доктор  
химических наук, профессор

Харьков – 2010

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	.....
РАЗДЕЛ 1 АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ ОБ ЭЛЕКТРОКОРРОЗИИ БЕТОНА В ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ, ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ НА ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ ПОСТОЯННЫМ ТОКОМ УЧАСТКАХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ.....	.....
1.1. Анализ существующих данных о токах утечки и блуждающих токах на электрифицированном ж.д. транспорте и повреждениях бетонных, железобетонных и каменных конструкций.....	.....
1.1.1. Анализ существующих данных о токах утечки и блуждающих токах на электрифицированном ж.д. транспорте.....	.....
1.1.2. Анализ существующих данных о повреждении бетонных конструкций от действия электрического тока на железнодорожном транспорте.....	.....
1.2. Существующие методы оценки электрокоррозионной опасности железобетонных конструкций и сооружений.....	.....
1.3. Анализ существующих представлений об электрокоррозии железобетона..	.....
1.3.1. Особенности электрокоррозии арматуры в железобетонных конструкциях.....	.....
1.3.2. Особенности структуры бетона, как электрохимической системы.....	.....
1.3.3. Существующие коллоидно-химические представления о структуре и электрических свойствах бетона и цементного камня.....	.....
1.3.3.1. Прохождение токов утечки через железобетонную конструкцию.....	.....
1.3.3.2. Электропроводность жидкой фазы бетона.....	.....
1.4. Анализ современных представлений о структуре и прочности цементного камня и бетона.....	.....
1.5. Критический анализ существующих представлений о механизме разрушающего действия токов утечки на бетон.....	.....
1.5.1. Электроосмотический перенос в цементных материалах.....	.....
1.5.2. Коррозия металла и ее связь с возникновением трещин в бетоне.....	.....
1.5.3. Влияние постоянного электрического тока на состав и структуру цементного камня и бетона.....	.....
1.6. Существующие представления об основных элементарных процессах растворения цементного камня.....	.....

1.7. Влияние параметров воздействующего тока на разрушение цементного камня и бетона.....	62
1.8. Вызванная поляризация бетона.....	64
Выводы по разделу 1.....	68
РАЗДЕЛ 2 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	71
2.1. Характеристика материалов используемых при проведении исследований.....	71
2.2. Методы и методики исследований.....	71
2.2.1. Методика измерения параметров воздействующего тока на конструкциях железнодорожного транспорта.....	72
2.2.2. Методика исследования влияния электрического тока на бетон.....	75
2.2.3. Исследование воды, контактирующей с испытываемыми образцами.....	78
2.2.4. Определение физико-механических характеристик образцов бетона, подвергшихся воздействию электрического тока.....	80
2.2.5. Методы физико-химического анализа.....	82
2.2.6. Методы математической обработки результатов экспериментов.....	84
РАЗДЕЛ 3 РАЗВИТИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ ОБ ЭЛЕКТРОКОРРОЗИОННОМ РАЗРУШЕНИИ БЕТОНА.....	86
3.1. Механизм возникновения и распространения токов утечки в железобетонных конструкциях.....	86
3.2. Развитие представлений о прочности и механизме растворения цементного камня и бетона в электрическом поле токов утечки.....	94
3.2.1. Уточнение количественной теории прочности цементного камня с учетом растворения кристаллогидратов портландита при электрокоррозии бетона.....	94
3.2.2. Растворение кристаллогидратов под действием сил латерального электроповерхностного отталкивания потенциалопределяющих ионов в их ДЭС при уменьшении $pH$ .....	113
3.2.3. Вынос потенциалопределяющих ионов ПОИ $Ca^{2+}$ и продуктов растворения $Ca(OH)_2$ в прослойку раствора между его блоками при понижении $pH$ .....	117
3.2.4. Вынос потенциалопределяющих ПОИ ионов $Ca^{2+}$ и продуктов растворения $Ca(OH)_2$ из цементного камня в электрическом поле токов утечки.....	118
3.2.5. Особенности выщелачивания цементного камня из бетона конструкций в реальных условиях их эксплуатации на электрифицированных постоянным током участках пути.....	121

3.2.6. Электромиграционный перенос ионов и продуктов растворения цементного камня через бетон конструкции в электрическом поле токов утечки.....	
3.3. Пример расчета долговечности бетона защитного слоя плит БМП в условиях электрокоррозии.....	
Выводы по разделу 3.....	
<b>РАЗДЕЛ 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О МЕХАНИЗМЕ ЭЛЕКТРОКОРРОЗИИ БЕТОНА.....</b>	
4.1. Разработка методики определения степени развития электрокоррозии цементного камня и бетона в бетонной, железобетонной и каменной конструкции в сложных условиях ее эксплуатации.....	
4.2. Пример определения степени развития электрокоррозии цементного камня, раствора и бетона в конструкции, эксплуатируемой в течение длительного времени в сложных условиях.....	
4.2.1. Эксплуатационная проверка реальности электрокоррозионного повреждения цементного камня, раствора и бетона в железобетонных, каменных и бетонных конструкциях.....	
4.2.2. Исследование цементного камня и раствора в бутовой кладке и швах каменной облицовки мостовой опоры.....	
4.3. Определение степени электрокоррозии бетона от тока утечки по разности электрических потенциалов в нем.....	
4.4. Экспериментальные исследования бетонов конструкций пассажирской платформы, расположенных на электрифицированных постоянным током участках пути.....	
4.5. Экспериментальные исследования механизма действия пульсирующего однонаправленного постоянного тока на фазовый состав, структуру и свойства бетона.....	
4.5.1. Исследование электрических характеристик.....	
4.5.2. Исследование физико-механических свойств образцов.....	
4.5.3. Физико-химические исследования фазового состава цементного камня в бетоне под влиянием пульсирующего однонаправленного постоянного напряжения.....	
4.5.4. Исследование микроструктуры бетона с помощью оптической микроскопии.....	
4.5.5. Исследование макроструктуры бетона с помощью люминесцентной дефектоскопии.....	

4.5.6. Изменение $pH$ воды в ячейке с образцом при подаче на него постоянного напряжения $U = 40 В$ .....	176
4.5.7. Титрование воды из ячейки.....	178
4.6. Развитие представлений о механизме электрокоррозии бетона в обводненных конструкциях.....	181
Выводы по разделу 4.....	186
<b>РАЗДЕЛ 5 ВНЕДРЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ</b> .....	189
5.1. Разработка предложений по усовершенствованию нормативных документов по защите от электрокоррозии проектируемых бетонных и железобетонных конструкций.....	189
5.2. Использование результатов исследований при разработке и внедрении новых материалов и технологий для защиты от электрокоррозии, восстановлении и усилении аварийных конструкций и сооружений.....	193
5.3. Использование рекомендаций автора диссертации при восстановлении аварийных водопропускных труб.....	194
5.4. Использование рекомендаций автора диссертации при восстановлении аварийной мостовой береговой опоры №1 под большое пролетное строение моста через реку Сев. Донец на 284 км участка Основа-Букино.....	197
5.5. Использование методики определения электрокоррозионного состояния бетонных конструкций на пассажирской платформе ст. Зеленый Гай участка Харьков – Мерефа Южной ж.д.....	201
5.6. Разработка нормативных документов.....	202
5.7. Использование результатов исследований в учебном процессе.....	203
5.8. Экономический эффект.....	203
Выводы по разделу 5.....	205
<b>ОБЩИЕ ВЫВОДЫ</b> .....	207
<b>ЛИТЕРАТУРА</b> .....	210
<b>ПРИЛОЖЕНИЯ</b> .....	227

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** Одной из основных проблем эксплуатации электрифицированных железнодорожных путей, бетонных, железобетонных и каменных конструкций искусственных сооружений, подрельсовых оснований, а также конструкций зданий и сооружений, расположенных вблизи электрифицированных железнодорожных путей, является их защита от электрокоррозионного разрушения под влиянием тока утечки и блуждающего тока, возникающих при движении поездов с электротягой.

Несмотря на давность (более 80 лет) и межотраслевой характер указанной проблемы, она по существу остается нерешенной, особенно для железнодорожного транспорта, где эта проблема связана с безопасностью движения поездов и большого количества пассажиров.

Нерешенность этой проблемы относится, в первую очередь, к искусственным сооружениям, эксплуатируемым на электрифицированных током участках в условиях обводнения, влияние которого усиливается просыпающимися из вагонов агрессивными грузами.

Это подтверждается тем, что в некоторых сооружениях, которые эксплуатируются в соответствии с действующими инструкциями, в частности тоннелях, отмечаются непредвиденные значительные коррозионные повреждения. Наиболее интенсивно они происходят в обводненных тоннелях. В последние 50 лет их каменная обделка заменена или будет заменяться на железобетонную. Однако это не останавливает процесс коррозионных повреждений, они происходят, и будут происходить на уже замененных участках. К таким конструкциям относятся в первую очередь тоннели на Львовской железной дороге. Среди железнодорожных мостов к таким конструкциям относятся мосты с ездой по балласту, особенно в случае нарушения их гидроизоляции и повреждения водоотводных трубок [1].

Особое значение указанная проблема приобретает в связи с интенсивным расширением электрификации железнодорожного транспорта, расширением сети метрополитенов. При этом увеличиваются темпы электрокоррозионных повреждений элементов верхнего строения пути, железобетонных конструкций мостов, тоннелей и водопропускных труб и др.

Следует ожидать, что в связи с расширением в последние годы электрификации железных дорог в Украине, электрокоррозионное разрушение этих конструкций на украинских железных дорогах также будет интенсифицироваться.

Одним из недостатков современных представлений об электрокоррозии является то, что большинство ученых, проектировщиков и производителей считали и продолжают считать, что постоянный ток, как и переменный, практически не оказывает влияния на бетон и не вызывает его коррозию. Вместе с тем некоторые ученые отмечают выщелачивание портландита и деструкцию цементного камня и бетона вблизи арматуры, вызванные действием внешнего электрического поля [2-4]. Выполненные по специальным методикам наши исследования [1, 5-10], показали явное разрушающее влияние электрического тока на подрельсовые основания (железобетонные шпалы и плиты безбалластного мостового полотна), бетонные, железобетонные и каменные конструкции мостов, тоннелей, водопропускных труб и

др. При совместном влиянии обводненности конструкций и постоянного тока от движущихся поездов с электротягой часто возникают огромные разрушения, которые приводят конструкции в аварийное состояние, резко сокращают срок их службы.

Существующие нормативные документы [11] содержат требования и меры по защите от электрокоррозии металлических и железобетонных конструкций на электрифицированных путях. Однако, согласно наблюдениям [1, 5-10], это не обеспечивает надежную защиту обводненных конструкций, электрокоррозионное разрушение протекает намного сильнее, причем разрушению подвержены, как установлено УкрГАЗТ, не только арматура железобетонных конструкций, но и бетон в них, а также безарматурный бетон и кирпичная кладка.

В связи с этим имеющиеся представления об электроизоляционных свойствах бетона и о методах их измерения, о механизме протекания постоянного тока через него и о механизме его разрушающего действия оказались, на наш взгляд, крайне несовершенными и не соответствующими действительным механизмам.

Это обусловлено тем, что бетон рассматривался главным образом на основе представлений о нем как о диэлектрике с определенным электрическим сопротивлением, а механизм протекания тока в нем - на основе активной проводимости и активного сопротивления, например, в [2].

Согласно выполненному критическому анализу литературных данных, проблемам электрокоррозии железобетонных конструкций посвящено немного работ, основными из которых являются работы [12-29]. Однако в них, за редким исключением, механизм протекания тока утечки через бетон и железобетон, а, следовательно, механизм электрокоррозии, рассмотрен, на наш взгляд, недостаточно глубоко, особенно в сочетании токов утечки и обводнения. В связи с этим для сложных условий эксплуатации бетонных и железобетонных конструкций (совместного действия обводнения и токов утечки) теоретических знаний и основанных на них решений по указанным литературным источникам недостаточно. Они не позволяют правильно спрогнозировать кинетику изменения состояний бетона и конструкций из него, а применяемые материалы, средства защиты в сложных условиях эксплуатации являются малоэффективными.

Указанное обуславливает необходимость выявления действительного механизма электрокоррозии от блуждающих токов и токов утечки на бетон бетонных и железобетонных конструкций, которые эксплуатируются на (вблизи) электрифицированных постоянным током участках железных дорог, разработки новых теоретических представлений и физико-математических моделей процессов, которые происходят при возникновении на конструкциях электрических потенциалов постоянного тока при прохождении поездов с электротягой, на основе фундаментальных положений коллоидной химии и физико-химической механики дисперсных систем и материалов, электрохимии.

Впервые проблема электрокоррозии бетона в конструкциях стала рассматриваться комплексно на основе современных представлений об электроповерхностных явлениях дисперсных систем лишь в последние годы в работах Плугина А.Н. с соавторами [30-33].

Ими показано, что существующие представления не соответствуют в полной мере действительным процессам, т.к. процессы переноса тока и его действия на бетон в сложных условиях эксплуатации не подчиняются законам обычной электротехники. Вместе с тем эти представления позволяют разработать и описать свойства, явления, процессы и механизмы в максимальной степени соответствующие действительным. Они позволили разработать новые методики измерения, прогнозирования долговечности бетона конструкций в условиях обводнения, новые способы расчета состава бетона повышенной устойчивости в условиях электрокоррозии, новые эффективные способы защиты от электрокоррозии [1, 5-9, 34, 35].

Эти представления положены также в основу настоящей диссертации для раскрытия механизма электрокоррозии бетона в бетонных и железобетонных конструкциях.

***Связь работы с научными программами, планами, темами.*** Работа выполнена на кафедре «Строительные материалы, конструкции и сооружения» Украинской государственной академии железнодорожного транспорта (УкрГАЗТ).

Выполнение работы осуществлялось в рамках госбюджетной научно-исследовательской работы УкрГАЗТ по теме «Розробка теоретичних та експериментальних основ захисту від електрокорозії споруд залізничного транспорту» (№ДР 0108U000076), а также в рамках хоздоговоров с УТОО «Южная железная дорога» и другими организациями (разд. 5).

На основании изложенного диссертация посвящена разработке представлений о механизме электрокоррозии бетона в конструкциях, находящихся в сложных условиях эксплуатации, и их использованию для повышения долговечности бетона в таких конструкциях.

***Цель диссертации*** – разработка представлений о механизме электрокоррозии обводненного бетона под действием постоянного тока на электрифицированном транспорте на основе представлений об электроповерхностных свойствах, явлениях, процессах и взаимодействиях в дисперсных системах и использование этих представлений для повышения долговечности бетонных, каменных и железобетонных конструкций в сложных условиях эксплуатации.

Главными причинами (факторами) преждевременных разрушений конструкций и сооружений, эксплуатируемых на (вблизи) электрифицированных железных дорогах, являются обводненность, действие блуждающих токов и токов утечки от электрифицированного постоянным током транспорта и других источников.

В основе механизмов разрушающего влияния указанных факторов лежат электроповерхностные явления и процессы – капиллярного и осмотического проникания воды внутрь бетонных, железобетонных и каменных конструкций, диффузионного и электромиграционного выноса продуктов растворения и коррозии, электроосмотического переноса, накопления отрицательного заряда в капиллярах цементного камня и др.

Токи утечки, а также электрический потенциал распространяются по обводненным и загрязненным верхним слоям грунта на значительные расстояния



(до 100 м и более), попадая на конструкции расположенных вблизи путей зданий и сооружений, проходят в глубину насыпи и основание под ней, через конструкции тоннелей, водопропускных труб, подземных переходов и мостов в окружающие водонасыщенные грунты, водоток или реку. Проходя через конструкции сооружений, они приводят к электрокоррозии обводненных стальных, бетонных и железобетонных элементов в них, накоплению за счет электроосмотического переноса электрического заряда (отрицательного) в капиллярах цементного камня, возникновению значительных растягивающих напряжений в растворе и бетоне, которые способствуют и даже вызывают трещинообразование и разрушение конструкций.

Кроме того, наибольшие потенциалы на рельсах и конструкциях, а, следовательно, токи утечки через них, возникают лишь при прохождении поездов с электротягой в зоне указанных сооружений.

**Научная гипотеза** – электрокоррозия бетона в бетонных и железобетонных конструкциях обусловлена интенсификацией выщелачивания цементного камня и трещинообразования бетона за счет растворения портландита и электромиграционного выноса продуктов его растворения в воду или водонасыщенный грунт под влиянием пульсирующего однонаправленного постоянного электрического поля на рельсах и конструкциях.

***Задачи исследования:***

1) обобщение и анализ существующих теоретических и экспериментальных исследований с целью выявления механизмов действия блуждающих токов и токов утечки на конструкции;

2) разработка методик исследования электрокоррозионного состояния обводненных бетонных, железобетонных и каменных конструкций в эксплуатационных условиях, а также методик лабораторных исследований;

3) разработка физико-математических моделей электрокоррозии бетона и ее влияния на изменение свойств бетона во времени;

4) проведение на основании разработанных методик обследования разрушающихся конструкций в условиях обводнения и токов утечки;

5) проведение комплексных лабораторных исследований, в т.ч. физико-химических, подтверждающих или уточняющих научную гипотезу и раскрывающих механизм электрокоррозии бетона, ее влияние на прочность, водопроницаемость и другие свойства бетона;

6) установление требований к материалам и способам, обеспечивающим защиту бетона от электрокоррозии, разработка новых защитных материалов и способов с учетом этих требований;

7) внедрение разрабатываемых материалов и способов защиты;

8) разработка рекомендаций по защите от электрокоррозии бетонных, железобетонных и каменных конструкций водопропускных труб и мостов при их капитальном ремонте и усилении;

9) **разработка предложений по усовершенствованию нормативных документов, в т. ч. отраслевых, по защите от электрокоррозии мостов, водопропускных труб, тоннелей и других сооружений.**

**Объект исследования – обводненные бетонные, железобетонные и каменные конструкции, которые эксплуатируются на электрифицированных постоянным током участках железных дорог и разрушаются.**

**Предмет исследования – процессы, явления и взаимодействия в бетоне в лабораторных и эксплуатационных условиях, в т. ч. при обводнении и в электрическом поле.**

**Методы исследования.** Физико-механические свойства бетона определялись по стандартным методикам. Фазовый состав цементного камня в бетоне (исходном и подвергнутому воздействию электрического поля) – с помощью физико-химических методов: дифференциально-термического (ДТ), рентгенографического (РГ) и инфракрасной спектроскопии (ИКС). Микро- и субмикроструктуру цементного камня и бетонных образцов изучали методом люминесцентной дефектоскопии, оптической и электронной микроскопии, структурные элементы надмолекулярного уровня – путём дополнительного увеличения с помощью сканера и ПЭВМ. Химический состав воды в ячейках с обрабатываемыми бетонными образцами – методом *pH*-метрии и методом титрования. Электрические характеристики бетона при воздействии постоянного электрического поля – по оригинальным методикам с помощью специально разработанных и изготовленных датчиков и установок. Для обработки экспериментальных данных использовали математические методы.

**Достоверность результатов** исследований обеспечена использованием в теоретических исследованиях фундаментальных положений и закономерностей коллоидной химии, физико-химической механики дисперсных систем и материалов, применением в экспериментах комплекса стандартных и оригинальных физико-механических, физико-химических и электрометрических методов исследований, методов статистической обработки результатов исследований, а также подтверждением данных теоретических и экспериментальных исследований результатами эксплуатационных исследований и внедрения.

**Научная новизна полученных результатов:**

1. Разработаны критерии оценки электрокоррозионного состояния бетонных, железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в условиях обводнения на электрифицированных постоянным током участках пути.

2. Уточнены уравнения прочности цементного камня с учетом уменьшения количества электрогетерогенных контактов, определяющих его прочность, и возникновения электрогомогенных контактов, обуславливающих возникновение внутренних растягивающих напряжений при электрокоррозионном растворении портландита.

3. Установлен механизм и разработаны физико-математические модели действия внешнего электрического поля на фазовый состав цементного камня, прочность и безнапорную водопроницаемость бетона.

4. Уточнен механизм растворения портландита в цементном камне бетона и выноса продуктов растворения под влиянием пульсирующего однонаправленного постоянного электрического поля; разработаны уравнение стационарного потока

под действием электромиграционных сил и сил вязкостного трения, уравнение равенства электромиграционного давления и капиллярного давления.

5. Впервые разработаны схемы протекания токов утечки и выноса продуктов гидратации в воду, с которой контактирует бетон, разработана схема протекания тока утечки с рельсов в конструкции сооружений.

6. Рассмотрен пример прогнозирования долговечности бетона в конкретных условиях эксплуатации при электрокоррозии.

**Практическое значение полученных результатов.** Теоретическое обоснование и разработка физико-математических моделей электрокоррозии и изменение во времени свойств материалов и конструкций от нее позволят в составе обследований мостов, тоннелей и других железнодорожных сооружений прогнозировать их фактическую долговечность.

Эти представления использованы для проведения корректной оценки электрокоррозионного состояния бетона в конструкции и самой конструкции, выделения свойств бетона, определяющих его электрокоррозионную стойкость, разработки цементно-водных суспензий и бетонов с улучшенной электрокоррозионной устойчивостью в сложных условиях эксплуатации.

Практическими результатами выполненных исследований являются рекомендации по применению новых высокоэффективных недефицитных и недорогих материалов и достаточно простых технологий защиты и восстановления конструкций зданий и сооружений железнодорожного транспорта в сложных условиях эксплуатации, которые были использованы при выполнении работ в рамках планов научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ Укрзалізничниці, Южної залізної дороги и других предприятий по темам: «Капітальний ремонт водопропускної труби на 111 км дільниці Харків - Куп'янськ» (договор № П/П-07587/НЮ от 23.03.2007); «Капітальний ремонт верхньої частини водопропускної труби на 365 км дільниці Основа – Букине» (договор № П/П-07586/НЮ от 23.03.2007); «Капітальний ремонт водопропускної труби на 19 км дільниці Харків - Люботин» (договор № П/П-071913/НЮ от 16.06.2007).

С учетом результатов исследований по диссертации разработаны (в соавторстве) и утверждены нормативные документы «Склади захисні кольорові ЗС-1М і ЗС-3М. Технічні умови»; разработаны предложения по дополнениям к разделу «Особенности защиты железобетонных конструкций от электрокоррозии» в СНиП 2.03.11-85, предусматривающие защиту бетона и раствора в обводненных бетонных, железобетонных и каменных конструкциях от электрокоррозии; подготовлены к изданию и утверждению «Технічні вказівки до захисту конструкцій мостів від корозії, що виникає від блукаючих струмів»; разработаны «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» и т.д.

Оцененный экономический эффект от внедрения результатов исследований составляет 164,569 тыс. грн. Основной экономический эффект от разработок по диссертации заключается в защите от аварий и разрушений, повышении

долговечности бетонных, железобетонных и каменных конструкций, эксплуатируемых в условиях обводнения и постоянных токов утечки.

**Личный вклад соискателя.** Все положения и результаты, которые выносятся на защиту, получены автором самостоятельно, а также в совместных теоретических и практических работах.

Обзор существующих представлений по изучаемым вопросам, формулирование научной гипотезы, вывод зависимостей, расчеты и т.д. выполнены автором лично. Выполнены лично также физико-химические исследования, разработаны представления об основных элементарных процессах механизма электрокоррозионного разрушения цементного камня и бетона, методика определения электрокоррозионного состояния и признаков электрокоррозии бетона.

В соавторстве выведены уравнения стационарного потока и равенства давлений; выполнены эксплуатационные и физико-механические исследования, внедрение результатов исследований. Участие автора в совместных публикациях отражено в перечне опубликованных работ.

Эксплуатационные исследования, разработка и изготовление комплекса оборудования и устройств для лабораторных исследований проводились совместно с Плугиным Ал.А., Плугиным Д.А., Дудиным А.А. Соискатель выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю проф. Плугину А.Н., зав. кафедрой СМКС УкрГАЖТ проф. Плугину А.А. за научные консультации и помощь в организации исследований, а также другим соавторам, совместно с которыми выполнялись экспериментальные и натурные исследования и внедрение их результатов.

**Апробация результатов диссертации.** Основные положения диссертационной работы доложены на 65-72 Международных научно-технических конференциях Украинской государственной академии железнодорожного транспорта и специалистов железнодорожного транспорта и предприятий (2003-10 гг.), а также на международных семинарах и конференциях: 45-м Международном семинаре по моделированию и оптимизации композитов МОК'45, г. Одесса, 28-29 апреля 2006 г.; VIII научно-технической конференции «Aktualne problemy naukowo-badawcze budownictwa», г. Ольштын, Польша, 18-20 мая 2006 г.; 6-м Украинском межотраслевом семинаре «Сучасні проблеми проектування, будівництва та експлуатації споруд на шляхах сполучення», г. Киев, 26-28 июня 2006 г.; 2-й научно-технической конференции «Математичні моделі процесів в будівництві (Залізобетонні конструкції та матеріали)», г. Луганск, 29-30 марта 2007 г.; Международной научно-технической конференции «Сучасні проблеми проектування, будівництва та експлуатації споруд на шляхах сполучення», г. Киев, 21-23 июня 2007 г.; 17 Международной конференции по строительным материалам «17 Ibausil», 23-26 сентября 2009 г., г. Веймар, Германия.

**Публикации.** По результатам исследований опубликовано 16 статей, 10 из них – в изданиях, рекомендованных ВАК Украины, получен один патент Украины на изобретение.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Электрокоррозия железобетонных мостов и других искусственных сооружений / А. Н. Плугин, А. А. Скорик, А. А. Плугин [и др.]. // Залізничний транспорт України. - 2004. - №1. - С. 11-13.
2. Старосельский А. А. Коррозия и долговечность железобетона в условиях электрических воздействий: дисс... докт. технич. наук: 05.23.05 / Старосельский Александр Александрович. - М., 1989. - 282 с.
3. Старосельский А. А. Коррозия приарматурного слоя бетона при воздействии переменного тока/ Старосельский А. А., Ольгинский А. Г. // Повышение долговечности бетона транспортных сооружений: Межвузовский сборник [Под общей редакцией А. Е. Шейкина]. – М., 1980. – Вып. 62. – с. 20-25.
4. Сивцов А. П. Электрокоррозия цементных материалов в зависимости от характеристик электрического тока / Сивцов А. П., Старосельский А. А. // Технологическое обеспечение долговечности железобетонных шпал. – М., 1971. - С. 50-56.
5. Електрокорозія бетону залізобетонних блоків обробки метрополітену / А. М. Плуґін, А. А. Плуґін [та ін.]. // Зб. наук. праць. - Харків, 2003. - Вип.56. - С. 126-135.
6. Экспериментальное определение потенциалов в конструкциях железнодорожных мостов на электрифицированных участках пути / А. Н. Плугин, Д. А. Плугин, В. А. Лютый [и др.]. // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. - К., 2006. - №73.- С. 253-257.
7. Основные факторы трещинообразования и разрушения опор мостов через реки на электрифицированных участках железных дорог / А. Н. Плугин, А. А. Плугин, С. В. Мирошниченко [и др.]. // Дороги і мости: зб. наук. праць. - Київ, 2007. - Вип. 7. - Т.ІІ. - С. 121-127.
8. Механизм электрокоррозии бетонных конструкций пульсирующим однонаправленным блуждающим током или током утечки / А. Н. Плугин,

А. А. Плугин, С. В. Мирошниченко [и др.]. // Научный вестник строительства. - Харьков, 2007. - Вып.42. - С. 106-111.

9. Блуждающие токи на конструкциях, зданиях, и сооружениях, расположенных вблизи электрифицированных постоянным током участков железных дорог / А. Н. Плугин, А. А. Плугин, О. А. Калинин [и др.]. // Проблемы надёжности та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті: Зб. наук. праць. - Харьков, 2009. - Вып. 109. - С. 131-143.

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

11. СНиП 2.03.11-85 Защита строительных конструкций от коррозии. Введ. 01.01.86. – М.: НИИЖБ, 1985. – 77 с.

12. Старосельский А. А. Электрокоррозия железобетона / Старосельский А. А. – К.: Будівельник, 1978. – 168 с.

13. Гусейнов М. Ш. Влияние физико-механических характеристик бетона на стойкость железобетона при электрокоррозии / Гусейнов М. Ш. // Труды АзНИИ стройматериалов и сооружений. – Баку, 1968. - Вып. 33. - С. 100 - 109.

14. Слукин В. Н. Исследование электрокоррозионной обстановки в гидрометаллургических цехах и защита строительных конструкций от коррозии, вызываемой блуждающими токами: дисс... канд. техн. наук: 05.23.05 / Слукин В. Н. - М., 1972. - 274 с.

15. Кравченко Т. Г. Влияние добавок ускорителей твердения бетона на электрокоррозию стальной арматуры / Кравченко Т. Г., Голубовская Е. Е. // Коррозия и стойкость железобетона в агрессивных средах. – 1980. - С. 140-145.

16. Коррозия и защита сооружений на электрифицированных железных дорогах / [А. В. Котельников, В. И. Иванова, Э. П. Селедцов, А. В. Наумов]. - М.: Транспорт, 1986. - 152 с.

17. К исследованию причин электрокоррозии железобетонных шпал / В. Н. Яковлев, С. С. Маторин, А. И. Ясевич [и др.]. // Труды ТашИИТ. - 1974. - Вып. 109. - С. 31-41.
18. Корнфельд И. А. Методика измерения и оценки блуждающих токов на эксплуатируемых промышленных железобетонных конструкциях / Корнфельд И. А. // Сб. трудов НИИЖБ. - 1962. - Вып. 28. - С. 25.
19. Ершов И. М. Коррозия арматуры железобетонных опор и бетонных фундаментов опор контактной сети токами утечки с рельсов / Ершов И. М., Иванова В. И. // ЦНИИ МПС. – М., 1959. – Сообщение № 15.
20. Благинина Е. И. Защита железобетонных конструкций от электрокоррозии бетонами с повышенными электроизоляционными свойствами / Благинина Е. И., Силина Е. С. // Защита строительных материалов и конструкций от коррозии: Всесоюзн. н.- т. совещ. – Киев, 1973. - с. 44-46.
21. Защита сооружений и конструкций метрополитенов от электрокоррозии / [под ред. Н. И. Кудрявцева] // Труды ВНИИЖТ. - М., 1970. - Вып. 620. - 112 с.
22. Инструкция по защите от электрокоррозии арматуры подземных железобетонных напорных трубопроводов. – М.: ОНТИ АКХ, 1970. – 24 с.
23. Котельников А.В. Защита железобетонных конструкций от электрокоррозии / Котельников А. В., Иванова В. И. // Бетон и железобетон. - 1978. - № 8. - С. 15-16.
24. Котельников А. Электрокоррозия железобетонных метромостов и эстакад / Котельников А., Наумов А., Кузнецов А. // Метрострой. - 1980. - № 5. - С. 8-9.
25. Кравченко Т.Г. К вопросу электрокоррозии железобетонных конструкций промышленных зданий / Кравченко Т. Г., Калмыков С. Г., Гузеев Е. А. // Промышленное строительство. – 1972. - № 7. - С. 43-44.
26. Кравченко Т.Г. Коррозионное поведение арматуры железобетонных конструкций при длительном стекании переменного тока промышленной частоты / Кравченко Т. Г., Голубовская Е. Е. // Защита металлических и железобетонных

строительных конструкций от коррозии: тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции. – М., 1978. - т. III. - С. 21-22.

27. Фишман В. П. Оценка опасности электрокоррозии арматуры подземных железобетонных сооружений / Фишман В. П. // Коррозия и защита в нефтегазовой промышленности. – М.: ВНИИОЭНГ, 1974. - С. 28-32.

28. Электрокоррозия подземных железобетонных сооружений горнообогатительных предприятий / С. А. Волотковский, В. П. Фишман, В. М. Письменный [и др.] // Промышленное строительство. - М., 1974. - № 12. - С. 39-40.

29. Притула В. А. Коррозионные разрушения железобетона блуждающими токами / Притула В. А., Корнфельд И. А. // Строительная промышленность. - 1953. - № 6. - С. 30-31.

30. Плугин А. Н. Электрогетерогенные взаимодействия при твердении цементных вяжущих: дисс... докт. хим. наук: 02.00.11. / Плугин Аркадий Николаевич - Харьков: ХИИТ, 1989.- 282 с.

31. Плугин А. Н. Коллоидно-химические аспекты прочности и водостойкости различных вяжущих и композиционных материалов / Плугин А. Н., Плугин А.А. // Modern Building Materials, Structures and Techniques: Proc.of 4th Intern.Conf. - Vilnius, 1995. - V.1. - P.206-211.

**32. The Mechanism of Water and Ionic Permeability of Concrete / [A. N. Plugin, I. G. Prokopova, S. Wild, A. A. Plugin] // Proc. of the 10<sup>th</sup> Intern. Congr. of the Chemistry of Cement. - Goteborg, 1997. - V. 4. - 4iv075. - 8pp.**

33. Бирюков А. И. О механизме электровоздействия на ранней стадии твердения цемента / Бирюков А. И., Плугин А. Н., Чулков И. А. // Повышение долговечности бетона транспортных сооружений. - М., 1980. - Вып. 662. – С.59-66.

34. Электроосмотический перенос, как фактор разрушения железобетонных и каменных опор железнодорожных мостов на водотоках / А. Н. Плугин, А. А. Плугин, С. В. Мирошниченко [и др.]. // Зб.наук.праць ЛНАУ: Серія «Технічні науки». - Луганськ, 2007. - №71 (94). - С. 189-196.



35. Теоретические предпосылки защиты бетонных, железобетонных и каменных конструкций от переменных токов утечки / [Плугин А. А., Дудин А. А., Плугин Ал. А., Плугин А. Н.] // Науковий вісник будівництва. - Харків, 2008. - Вип. 47. - С. 179-184.
36. Справочник по электроснабжению железных дорог. Т.2 / [Под ред. К. Г. Марквардта]. – М.: Транспорт, 1981.– 392 с.
37. Москвин В. М. Коррозия бетона / Москвин В. М. - М.: Госстройиздат, 1952. – 342 с.
38. Шейкин А. Е. Структура, прочность и трещиностойкость цементного камня / Шейкин А. Е. – М.: Стройиздат, 1974. – 192 с.
39. Brown H. P. Serious Injury to a Reinforced-Concrete Building by Electrolysis / Brown H. P. // Engineering News. - 1911. - Vol. 65. - № 23. - P. 684-687.
40. Eltinge O. L. Further Jest on the Effect of Electrolysis in Concrete. / Eltinge O. L. // Engineering News. - 1910. - Vol. 63. - № 11. - P. 327.
41. Further Experiments on the Electrolytic Disintegration of Reinforced Concrete // Engineering News. – 1911. - Vol. 65. - № 23. - P. 687-688.
42. Glauber Mr. M. Electrolysis in reinforced concrete. Tests at Washington University / Glauber Mr. M. // Engineering News. – 1909. - Vol. 61. - № 17. - P. 458.
43. Influence of frequency of alternating or in frequently reversed current on electrolytic corrosion // Technologic Paper. – 1916. - № 72.
44. Speller F. N. Corrosion of structure steel / Speller F. N. / Year-book of the American iron and steel Institute. – 1926. - P. 272.
45. Лютый В. А. Повторяющаяся быстронатекающая ползучесть бутовой кладки мостовых опор при механоэлектрических воздействиях: дисс... канд. техн. наук: 05.23.05 / Лютый Виталий Анатольевич. - Харьков, 2007. - 201 с.
- 46. Восстановление эксплуатационных свойств каменной трубы на 622 км линии Даугавпилс-Бигосово Латвийской железной дороги: Проект производства работ. Харьков: ХарГАЖТ, 2001. – 90 с.**
47. Инструкция по защите железобетонных конструкций от коррозии, вызываемой блуждающими токами. СН 65-76. – М.: Стройиздат, 1977. – 80 с.

48. Защита от коррозии бетонных и железобетонных конструкций транспортных сооружений/ Пособие к МГСН 2.09-03. Введ. 15.07.2004. - М.: Изд-во стандартов, 2004. – 26 с
49. Багоцкий В. С. Основы электрохимии / Багоцкий В. С. - М.: Химия, 1988. - 400 с.
50. Декорирование поверхности твердых тел / [Дистлер Г. И. Власов В. П., Герасимов Ю. Л. и др.]. - М.: Наука, 1976. - 111 с.
51. Берлин В. И. Транспортное материаловедение / Берлин В. И., Мчедлов-Петросян О. П., Шубников А. К. – М.: Транспорт, 1972. – 408 с.
52. Бибик Е. Е. О потенциале частиц многокомпонентных систем / Бибик Е. Е., Соколова Е. А., Лавров И. С. // Коллоидный журнал. – М., 1970. - т. 32, № 2. - с. 301 - 303.
53. Бернацкий А. Ф. Электрические свойства бетона / Бернацкий А. Ф., Целебровский Ю. В., Чунчин В. А.; Под ред. Ю.Н. Вершинина. – М.: Энергия, 1980. – 208 с.
54. Кобранова В. Н. Физические свойства горных пород / Кобранова В. Н. - М.: Гостоптехиздат, 1962. – 490 с.
55. Пархоменко Э. И. Электрические свойства горных пород / Пархоменко Э. И. - М.: Наука, 1965. - 164 с.
56. Бабушкин В. И. Физико-химические процессы коррозии бетона и железобетона / Бабушкин В. И. – М.: Стройиздат, 1968. – 188 с.
57. Ганин В. Г. Электрическое сопротивление бетона в зависимости от его состава / Ганин В. Г. // Бетон и железобетон. – М., 1964. - № 10. - С. 462-465.
58. Ведь Е. И. Исследование жидкой фазы гидратированного портландцемента с добавками неорганических солей / Ведь Е. И., Нгуен Ван Тхиен // Цемент. - М., 1968. - № 5. - с. 6-7.
59. Саснацкас К. И. Исследование электропроводности водных растворов  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  и аморфного кремнезема / Саснацкас К. И., Эльзбутас Г. П., Лескаускас Б. В. // Строительные материалы. - 1967. - № 4. - С. 19-20.

60. Стрелков М. Я. Изменение истинного состава жидкой фазы, возникающей при твердении вяжущих веществ и механизм их твердения / Стрелков М. Я. // Труды совещания по химии цемента. - М., 1956. - С.183-200.
61. Курбатова И. И. Химия гидратации портландцемента / Курбатова И. И. - М.: Стройиздат, 1977. – 159 с.
62. Мчедлов-Петросян О. П. О связи процессов твердения цемента с возникновением условий для его коррозии / Мчедлов-Петросян О. П., Бабушкин В. И. // Труды ХИИТ. - 1962. - Вып. 54. - С. 5-12.
63. Wolkowinski K. Usiomy elektroenergetyczne niektore zagadnienia podataworne / Wolkowinski K. // Zeszyty naukowe Politechniki Wroclawskiej: Elektryka. – Wroclaw, 1964. - № 96. - Vol. XXII. - P. 31-61.
64. Фридрихсберг Д. А. Курс коллоидной химии / Фридрихсберг Д. А. // Учеб. для вузов. [2-е изд., перераб. и доп.] – Л.: Химия, 1984. – 368 с.
65. Вода в дисперсных системах / Дерягин Б. В., Чураев Н. В., Овчаренко Ф. Д. [и др.]. - М.: Химия, 1989. - 288 с.
66. Королев В. А. Связанная вода в горных породах: новые факты и проблемы / Королев В. А. // Соросовский образовательный журнал. - 1996. - №9. - С. 79-85.
67. Плугин Д. А. Создание трещиностойких клееных деревянных брусьев на основе развития представлений о механизме усушки, набухания и склеивания древесины: дисс...канд. техн. наук: 05.23.05 / Плугин Дмитрий Артурович. – Харьков, 2002. – 216 с.
68. Практикум по коллоидной химии / [Барабанова В. И., Бибик Е. Е., Кожевникова Н. М. и др.]. - М.: Высш.школа, 1983. – 216 с.
69. Киселев В. Ф. Адсорбционные процессы на поверхности полупроводников и диэлектриков / В. Ф. Киселев, О. В. Крылов. – М.: Наука, 1978.- 256 с.
70. Le Chatelier H. Cristalloids against colloids in the theory of cements/ Le Chatelier H. // Trans Faraday Sos. - 1919. – Vol. 14. - №8.
71. Le Chatelier H. Rec. experim. sur. la constit des mort. / Le Chatelier H. // Hydr. Parts. - 1907.

72. Michaelis W. Zetschrift / Michaelis W. - 1893. - 982 P.
73. Michaelis W. Kolloidal Zetschrift / Michaelis W. - 1909. - Vol. 5. - №1. - P. 9.
74. Байков А. А. Портландцемент и теория твердения гидравлических цементов / Байков А. А. // Техничко-экономический вестник. - М.; Петроград, 1923. - т. 3, № 4 - 5. - С.206-215.
75. Байков А. А. Гидравлические цементы и гидравлические добавки, их состав, твердение и разрушение в природных условиях / Байков А. А. // Пуццолановые цементы: Труды научно-технического комитета. - М., 1927. - Вып.71. - С. 56-96.
76. Ребиндер П. А. Физико-химические представления о механизме схватывания и твердения минеральных вяжущих веществ / Ребиндер П. А. // Тр. Совещания по химии цемента. - М., 1956. - С. 125.
77. Физико-химические основы гидратационного твердения вяжущих веществ / Ребиндер П. А., Сегалова Е. Е., Амелина Е. А. [и др.]. // Шестой междунар. конгр. по химии цемента, сентябрь 1974 г. – М.: Стройиздат, 1976. - Т.II. - Кн.1. - с. 58.
78. Щукин В. Д. Коллоидная химия / Щукин В. Д., Перцов А. В., Амелина Б. А. – М.: Высшая школа, 2006. - 444 с.
79. Дерягин Б. Теории устойчивости сильно заряженных лиофобных золь и слипания сильно заряженных частиц в растворах электролитов / Дерягин Б., Ландау Л. // Журн. Экспер. и теорет. физики. - М., 1945. - т.15, В. 11, с. 663.
80. Дерягин Б. В. Поверхностные силы. Т.3 / Дерягин Б. В., Чураев Н. В., Муллер В. М. - М.: Наука, 1987. - 399 с.
81. Круглицкий Н. Н. Основы физико-химической механики. Ч.1. / Круглицкий Н. Н. - К.: Вища школа, 1976. – 267 с.
82. Runova R. F. The Colloid-Chemical Principles of the Strength Theory of Contact Hardening Cements / Runova R. F., Plugin A. N. // Cement Hydration: Proceedings of the 10th International Congress of the Chemistry of Cement, June 2-6 1997. - Goteborg, 1997.- Vol.2.- 2ii054.- 4pp.

83. Рой Д. М. Оптимизация прочности цементного камня / Рой Д. М., Гоуда Г. Р. // Шестой междунар. конгр. по химии цемента, сентябрь 1974 г. - М., 1976. - Т. 2. - Кн.1. - С. 310.
84. Краткий справочник физико-химических величин / [Под. ред. А. А. Равделя, А. М. Пономаревой]. - Ленинград: Химия, 1983. - 232 с.
85. Сивцов А. П. Электроосмотическое течение жидкости в цементном камне / Сивцов А. П., Старосельский А. А. // Технологическое обеспечение долговечности железобетонных шпал. – М., 1971. - С. 57-61.
86. Рабинович В. А. Краткий химический справочник / Рабинович В. А., Хавин З. Я. - Л.: Химия, 1978, 392 с.
87. Горчаков Г. И. Строительные материалы / Г. И. Горчаков, Ю. М. Баженов. – М.: Стройиздат, 1986.- 689 с.
88. Nicholas U. J. Tests on the effect of electric current on concrete / Nicholas U. J. // Engineering News. – 1908. - Vol. 60. - № 26. - P. 710-712.
89. Shepard E. R. Abstracts and Summaries of the Bureau of standards publication on stray-current electrolysis / Shepard E. R. // Circular of the Bureau of standards. - 1933. - № 401. - P. 1-23.
90. Rosa E. B. Electrolysis in concrete / Rosa E. B., Mc Collum B., Peters O. // Technologic Paper. - 1913. - № 18.
91. Алексеев С. Н. Коррозия и защита арматуры в бетоне / Алексеев С. Н. – [2-е изд.]. - М.: Стройиздат, 1968. – 232 с.
92. Артамонов В. С. Защита железобетона от коррозии / Артамонов В. С. – М.: Стройиздат, 1967. – 128 с.
93. Wittmann P. H. Observation of an electromechanical effect of hardened cement paste / Wittmann P. H. // Cement and Concrete Research. – 1973. - Vol. 3. - № 5. - P. 601-605.
94. Селедцов Э. П. Эксплуатация опор контактной сети / Селедцов Э. П., Баранов Е. А. – М.: Транспорт, 1970. – 94 с.
95. Бадовска Г. Анतिकоррозионная защита зданий / Бадовска Г., Данилецкий В., Мончинский М. - М: Стройиздат, 1978. - 508 с.

96. Кинд В. А. Действие электрического тока на цементные растворы / Кинд В. А., Малкин Б. З. // Строительная промышленность. – 1925. - № 11. - С. 756-759.
97. Вакуленко Г. А. Исследование процессов коррозии арматуры опорных конструкций контактной сети постоянного тока: Дис...канд. техн. наук: 05.23.05 / Вакуленко Г. А. – Ленинград, 1969. – 183 с.
98. Золотухин Ю. Д. Исследование электротермического метода натяжения арматуры на бетон с применением в контактном слое полимерных материалов / Золотухин Ю. Д. // Труды БелИИЖТ. - Минск, 1969. – 52 с.
99. Исследование свойств автоклавных и пропаренных шлакобетонов в процессе электрокоррозии / Ю. И. Михельсон, В. И. Якубов, В. Н. Яковлев [и др.]. // Строительство и архитектура: изв. вузов. - 1979. - № 4 - С. 71-73.
100. Михельсон Ю. И. Исследование свойств пропаренного и автоклавного бетона в процессе электрокоррозии / Михельсон Ю. И. // Труды Магнитогорского горно-металлургического института. - 1974. - № 139. - С. 82-87.
101. Mole G. Engineering / Mole G. – 1948. - № 5. - P. 453-454.
102. Magnusson C. E. The electrolysis of steel in concrete / Magnusson C. E., Smith G. H. // Proceeding of the American Institute of Electrical Engineer. – 1911. - № 5. - P. 132-138.
103. Кравченко Т. Г. Влияние катодного тока на железобетон / Кравченко Т. Г., Корнфельд И. А., Теслер С. П. // Защита от коррозии строительных конструкций и повышение их долговечности. – М.: Стройиздат, 1969 – С. 130-135.
104. Уткин В. К. Протекторная защита арматуры заглубленных железобетонных резервуаров от почвенной коррозии и коррозии, вызываемой блуждающими токами / Уткин В. К. // Труды ВНИИСТ. - 1968. - Вып. 17. - С. 36-42.
105. Cathodic protection for concrete bridges to be studied // Concrete Construction. – 1978. - Vol. 23. - № 10. - P. 614.
106. Double E. W. The effect of QC and DC Electrolysis upon Reinforced Concrete. / Double E. W. // Technical Report Reference. – 1937. - № 108. - P.84-92.

107. Чалый В. П. Изучение кинетики и механизма ферритообразования в системах  $Zn(OH)_2 - 2FeOOH$  и  $Cu(OH)_2 - \alpha - FeOOH$  при старении / Чалый В. П., Лукачина Е. Н. // Изв. АН СССР: Неорганические материалы. - 1967. - Т. 3. - Вып. 8. - С. 1447-1452.
108. Мчедлов-Петросян О. П. Некоторые проблемы надежности железобетонных подрельсовых оснований / Мчедлов-Петросян О. П., Мельниченко П. А., Старосельский А. А. // Труды ХИИТ. - 1971. - Вып. 135. - С. 5-8.
109. Мчедлов-Петросян О. П. Предпосылки повышения электростойкости цементных бетонов / Мчедлов-Петросян О. П., Старосельский А. А. // Труды ХИИТ. - 1968. - Вып. 101. - С. 52-59.
110. Структура бетона железобетонных шпал в очагах сильной коррозии арматуры / А. И. Ясевич, М. П. Стрельникова, С. С. Маторин [и др.] // Труды ТашИИТ. - 1973. - Вып. 94. - С. 53-63.
111. Anderson G. H. Cathodic protection of a reinforced concrete bridge deck. / Anderson G. H. // Concrete International Design Construction. - 1980. - Vol. 2. - № 6. - P. 32-36.
112. Коррозия бетона и железобетона. Методы их защиты / [В. М. Москвин, Ф. М. Иванов, С. Н. Алексеев, Е. А. Гузеев]. - М.: Стройиздат, 1980. - 408 с.
113. Кравченко Т. Г. Защита железобетонных промышленных предприятий от коррозии, вызываемой блуждающими токами / Кравченко Т. Г., Корнфельд И. А. // Бетон и железобетон. - 1969. - № 4. - С. 15-17.
114. Стрижевский И. В. Коррозия и защита арматуры железобетонных трубопроводов / Стрижевский И. В., Рейзин Б. Л., Иоффе Э. И. - М.: Стройиздат, 1972. - 96 с.
115. Полак А. Ф. Твдение мономинеральных вяжущих веществ / Полак А. Ф. - М.: Стройиздат, 1966. - 208 с.
116. Капранов В. В. Твердение вяжущих веществ и изделий на их основе / Капранов В. В. - Челябинск: Южно-Уральское кн. изд-во, 1976. - 191 с.
117. Бабушкин В. И. Термодинамика силикатов / Бабушкин В. И., Матвеев Г. М., Мчедлов-Петросян О. П. - М.: Стройиздат, 1972. - 351 с.

118. Сычев М. М. Твердение вяжущих веществ / Сычев М. М. - Л.: Стройиздат, 1974. - 79 с.
119. Физико-химические основы формирования структуры цементного камня / [Шпынова Л. Г., Чих В. И., Саницкий М. А. и др.]. - Львов: Вища школа, 1961. - 157 с.
120. Илюхин В. В. Кристаллические структуры природных и синтетических соединений с крупными и средними катионами: автореф. дисс на получение научн. степени докт. физ.-мат. наук: спец. / В. В. Илюхин. - М, 1971. - 26 с.
121. Berendt O. Versuche über den elektrischen Widerstand von unbewehrtem Beton / Berendt O., Wirtz K., Müller W. – Berlin: “Ernst und Sohn”, 1911. (Deutscher Ausschuss für Eisenbeton, Heft 76).
122. Вайнер А. Л. Стеkanie тока с элементов железобетонных фундаментов опор линий электропередач / Вайнер А. Л. // Электричество. – М., 1960. - № 12. - с. 34-40.
123. Коттрелл Т. Л. Прочность химических связей / Коттрелл Т. Л. – М.: Иностранная литература, 1956. – 282 с.
124. Сивцов А. П. Коррозия железобетонных шпал трамвая / Сивцов А. П., Старосельский А. А. // Міське господарство України. - 1976. - № 1. - с. 31.
125. Стрижевский И. В. Методы борьбы с электрокоррозией городских трубопроводов / Стрижевский И. В., Левин В. М., Тарнижевский М. В. – М.: Стройиздат, 1968. – 148 с.
126. Курушин А. Д. Вынужденная поляризация бетонов с противоморозными добавками в постоянном электрическом поле / Курушин А. Д., Афанасьев С. Г., Костяев П. С. // Повышение долговечности бетона транспортных сооружений: Труды институтов инженеров железнодорожного транспорта: Межвузовский сборник. - М., 1980. - вып. 662. - С. 25-31.
127. Ахвердов И. Н. Неразрушающий контроль прочности бетона по электропроводности / Ахвердов И. Н., Маргулис Л. Н. – Минск: Наука и техника, 1975. - 190 с.



128. Духин С. С. Диэлектрические явления и двойной слой в дисперсных системах и полиэлектролитах / Духин С. С., Шилов В. Н. – Киев: Наукова думка, 1972. – 20 с.
129. А.с. № 1158552 СССР. Способ обработки бетонных смесей электротоком критической частоты / И. А. Чулков, А. И. Бирюков, С. С. Духин. и др. - 3568769/29-33; заявл. 25.03.83; опубл. 30.05.85. Бюл. № 20.
130. Вода питьевая. Метод определения общей жесткости: ГОСТ 4151-72 [Дата введения 01.01.74]. М.: Изд-во стандартов, 1972 - 7 с.
131. А.с. № 1561661, 1990. Способ определения водопроницаемости бетона. Способ определения водопроницаемости бетона / А. Н. Плугин, Т. Г. Сацук, А. И. Бирюков, Н. В. Вдовенко.
132. Горшков В. С. Методы физико-химического анализа вяжущих веществ / Горшков В. С., Тимашев В. В., Савельев В. Г. – М.: Высш. школа, 1981. – 335 с.
133. Горшков В. С. Термография строительных материалов / Горшков В. С. – М.: Стройиздат, 1968. – 238 с.
134. Болдырев А. И. ИК- спектры минералов / Болдырев А. И. - М.: Недра, 1976.- 199 с.
135. Леманн Г. Исследование гидратации клинкерных минералов и цементов при помощи ИКС / Леманн Г., Датц Г. // Тр. IV Междунар. конгр. по химии цемента. – М.: Стройиздат, 1964. – С. 383-388.
136. Мчедлов-Петросян О. П. ИК-спектры продуктов гидратации в системе «портландцемент-минерал заполнителя-вода» / Мчедлов-Петросян О. П., Ольгинский А. Г., Фольке К. // Изв. вузов строит. и архит. - 1973. - № 8. - С. 50-55.
137. Ларионова З. М. Петрография цементов и бетонов / Ларионова З. М., Виноградов Б. Н. - М.: Стройиздат, 1974. - 347 с.
138. Ларионова З. М. Фазовый состав, микроструктура и прочность цементного камня и бетона / Ларионова З. М., Никитина Л. В., Гарашин В. Р. - М.: Стройиздат, 1977. - 264 с.
139. Емельянова И. А. Анализ зависимости прочностных характеристик строительных смесей от особенности их приготовления в различных видах

смесителей / И. А. Емельянова, О. В. Доброходова, О. С. Борзяк // Зб. наук. праць УкрДАЗТ: Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті. - Харків, 2009. - Вип. 109. - С.56-66.

140. А. с. 329191 (СССР). Люминесцентная паста для дефектоскопии пористых материалов. / Л. Я. Малкес, А. Г. Ольгинский, Б. М. Красовицкий и др. – Оpubл. в Б. И., 1972, № 7.

141. Определение качества изоляции бетонных и железобетонных конструкций методом люминесцентной дефектоскопии / А. Г. Ольгинский, Ю. П. Либенко, А. А. Старосельский [и др.]. // Защита металлических и железобетонных строительных конструкций от коррозии: Тезисы докладов Всесоюзной Научно-технической конференции. – М., 1978. - С. 46-47.

142. Люминесцентная дефектоскопия неорганических строительных материалов. / Л. Я. Малкес, О. П. Мчедлов-Петросян, А. Г. Ольгинский [и др.]. // Дефектоскопия. - 1973. - № 1. - С. 121-124.

143. Дюженко М. Г. Статистическая обработка опытных данных и оптимальное планирование эксперимента в технологических исследованиях / Дюженко М. Г., Еськов А. С., Мчедлов–Петросян О. П. // Труды отдела водного хозяйства промпредприятий ВНИИ ВодГео: Математические методы в исследованиях технологии бетона. – Харьков, 1971. - Вып. V - С. 4-15.

144. Бранд У. Изучение диэлектрических свойств твердеющих минеральных вяжущих веществ: Дисс...канд. техн. наук: 05.23.05 / Бранд У. - Харьков, 1976.- 94 с.

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

146. Плугин А. А. Долговечность бетона и железобетона в обводненных сооружениях: коллоидно-химические основы: Дисс... докт. техн. наук: 05.23.05 / Плугин Андрей Аркадьевич. - Харьков, 2005. - 420 с.

147. Долговечность конструкций и сооружений из бетона, эксплуатируемых в условиях обводнения / А. Н. Плугин, А. А. Плугин, О. С. Борзяк [и др.]. //

Автомобільні дороги і дорожнє будівництво: (Сучасні проблеми проектування, будівництва та експлуатації споруд на шляхах сполучення). - Київ, 2006. - №73. - С. 248-253.

148. Дерягин Б. В. Теория гетерокоагуляции, взаимодействия и слипания разнородных частиц в растворах электролитов / Дерягин Б. В. // Коллоид. журн. – М., 1964. – т. 16, № 6. - С. 425-430.

149. Ребиндер П. А. О механической прочности пористых дисперсных тел / Ребиндер П. А., Щукин Е. Д., Марголис Л. Я. // ДАН СССР. - 1964. - Т. 154.- №3. - С. 695-698.

150. Быстронатекающая ползучесть и трещинообразование в каменных мостовых опорах / Плугин А. Н., Плугин А. А., Калинин О. А. [и др.]. // Зб.наук.праць ЛНАУ. - Луганськ, 2007.- №71(94). - С.115-121.

151. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела / Ч. Киттель. – М: Наука, 1978. – 792 с.

152. Девис С. Электрохимический словарь / Девис С., Джеймс А.; пер. с англ. С. К. Оганесяна. – М.: Мир, 1979. – 287 с.

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

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

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

156. Ершов Л. Д. Высокопрочные и быстротвердеющие бетоны / Ершов Л.Д. - К.: Будівельник, 1976. - 161 с.
157. Тимашев В. В. Технический анализ и контроль производства вяжущих материалов и асбестоцемента / Тимашев В. В., Каушанский В. Е. - М: Стройиздат, 1974. - 279 с.
158. Таширо Т. Влияние  $Cr_2O_3$  на образование C-S-H (I), тоберморита и сходных фаз в гидротермальных условиях / Таширо Т., Кавагути К. // Тр. VI Междунар. конгр. по химии цемента. – М., 1976. – Т. II. - Кн. 1. - С. 227-232.
159. Губкин А. Н. Физика диэлектриков / Губкин А. Н. – М.: Высшая школа, 1971. - 272 с.
160. Research of influence of leakage currents and stray currents on railways on buildings and constructions / A. N. Plugin, O. Plugin, O. Borzyak [та ін.]. // 17 Internationale Baustofftagung, 23-26 September 2009, Bundesrepublik Deutschland: Tagungsbericht. - Weimar, 2009.- Band 2.- P.1151-1156.
161. Powers. T. C. In Chemistry of Cement / Powers. T. C. // Proceedings of the Fourth International Symposium: National Bureau of Standards [now National Institute of Standards and Technology]: US Department of Commerce. - Washington, 1962. - Vol. 2. - P. 577.
162. Глинка Н. Л. Общая химия / Глинка Н. Л. – Л.: Химия, 1972. – 712 с.
163. Крешков А. П. Курс аналитической химии / Крешков А. П., Ярославцев А.А. – М.: Химия, 1968. – 384 с.
164. Борзяк О. С. Развитие представлений о механизме электрокоррозии бетона в обводненных конструкциях / О. С. Борзяк // Науковий вісник будівництва. - Харків, 2010. - Вип.45. – С. 100-106.
165. Дослідження можливості виробництва залізобетонних шпал за безпропарювальною технологією / А. А. Пługін, А. М. Пługін, О. С. Борзяк [та ін.]. // Зб. наук. праць УкрДАЗТ. - Харків, 2008. - Вип. 91. - С. 211-224.
166. Зменшення та усунення тріщиноутворення дерев'яних шпал і брусів та поліпшення їх електроізолювальних властивостей / [А. М. Пługін, Д. А. Пługін, О. С. Борзяк, А. А. Пługін] // Дороги і мости: Міжнар. наук.-техн. конфер. «Сучасні

проблеми проектування, будівництва та експлуатації споруд на шляхах сполучення», 21-23 червня 2007: Зб. наук. праць. - Київ, 2007. - Т.ІІ, Вип. 7. - С.114-120.

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

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

169. Патент 62613 UA Спосіб визначення складу високоміцного, тріщиностійкого і водонепроникного бетону / А. М. Плугін, О. А.Калінін, С. В.Мірошніченко, А. А.Плугін, С. М. Кудренко, В. А. Лютий, А. В. Никитинський, І. В. Подтележнікова, Г. О. Линник, М. Д. Костюк, В. О. Яковлев; заявник та патентовласник Укр. держ. акад. зал. тр-ту. Заявл. 18.12.00; опубл.15.12.2003, Бюл.№12.