

На правах рукописи

БОНДАРЬ Виктор Александрович

**ЗАЩИТА ОТ КОРРОЗИИ АРМАТУРЫ НАДЗЕМНЫХ
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ КАТОДНОЙ
ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ**

Специальности: 05.23.05- строительные материалы
и изделия;

05.17.14- химическое сопротивление
материалов и защита от коррозии

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук

Харьков - 1994



Диссертация является рукописью.

Работа выполнена в Полтавском инженерно-строительном институте

Научный консультант - докт.техн.наук, профессор БАБУШКИН В.И.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор А.А.СТАРОСВЯЛЬСКИЙ

доктор технических наук, профессор Б.И.БАДРАЧНЫЙ

доктор технических наук, профессор Е.В.ГОРХОВ

Ведущая организация - Харьковский ПромстройНИИпроект

Защита состоится "28" июня 1994 г. в 14 часов на заседании специализированного совета Д.068.33.01 Харьковского государственного технического университета строительства и архитектуры по адресу: 310002, г.Харьков, ул.Сумская, 40

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Харьковского государственного технического университета строительства и архитектуры

Автореферат разослан "26" мая 1994 г.

Учебный секретарь

специализированного совета, д.т.н. И.А.Емельниова

ЛНБ ім. В. Стефаніка
АН України

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

А к т у а л ь н о с т ь. Известный специалист по коррозии и защите железобетона С.Н.Алексеев в одной из своих публикаций отмечает, что широко распространённое мнение об абсолютной защите арматуры бетоном неправильно. Снижение запасов прочности, сопровождавшее совершенствование методов расчёта конструкций, экономия цемента, уменьшение сечений, применение железобетона в зданиях и сооружениях с агрессивными средами - всё это привело к тому, что усилились случаи повреждения конструкций в результате возникновения и развития в них коррозии арматуры.

Сложившиеся условия не позволяют решить проблему защиты железобетона только традиционными методами. Широкое распространение в развитых зарубежных странах получил эффективный метод защиты арматуры в бетоне за счёт её катодной поляризации постоянным током. К сожалению в отечественной практике этот метод нашёл ограниченное применение (в основном только для конструкций в почве и воде). И это не случайно. Разработка систем катодной защиты надземных железобетонных конструкций связана с определёнными трудностями.

В отличие от систем катодной защиты конструкций в почве и воде на решение систем катодной защиты надземных конструкций решающее влияние оказывают сами защищаемые конструкции, специфика коррозии их арматуры, условия эксплуатации. Поэтому решение проблемы возможно только на базе комплексных исследований коррозионных характеристик железобетонных конструкций, их строения, эксплуатации и защиты.

В данной работе сделана первая попытка проведения таких исследований, результаты которых дают возможность значительно расширить методы защиты от коррозии арматуры надземных железобетонных конструкций.

Ц е л ь р а б о т ы. В решении научной и практической проблемы - защиты арматуры надземных железобетонных конструкций катодной поляризацией в отечественной практике.

А в т о р з а щ и щ а е т:

- общую методику, положения и принципы решения задач защиты арматуры надземных железобетонных конструкций катодной поляризацией;
- математические модели и экспериментальные данные исследований коррозии арматуры, усложнённой действием макрогальванических пар;
- методику аналитического описания и результаты экспериментальных исследований образования манжетной жидкости на арматуре периодического профиля;

- ногу и коррозионную характеристику железобетонного элемента - модуль поверхности;
- математические модели электрополя в бетоне при линейных анодах, изменяющихся характеристиках бетона, при различной форме поперечного сечения железобетонного элемента;
- методику и результаты производственных испытаний по выявлению анодных участков на арматуре железобетонных конструкций;
- рекомендации по разработке отечественных систем катодной защиты арматуры надземных железобетонных конструкций;
- новые системы и элементы катодной защиты арматуры надземных железобетонных конструкций.

Методика исследований. В работе использованы аналитические, численные и экспериментальные методы исследований. Методы математического моделирования и экспериментальные методы применены при исследовании распределения электродных участков на арматуре при её коррозии. Вопросы распределения защитного потенциала на арматуре исследованы также методами математического и физического моделирования. При расчёте параметров катодной защиты применены численные и экспериментальные методы. При проверке предлагаемых систем и элементов катодной защиты применены экспериментальные методы исследований. Решение математических моделей проводилось методами разделения переменных, изучением симметричных свойств уравнений, конформным преобразованием координат и др.

Научную новизну работы составляют:

- системный подход в оценке защитных мероприятий для арматуры надземных железобетонных конструкций, которые работают в условиях действия агрессивных сред, основанной на изучении влияния геометрических характеристик железобетонных конструкций, конструктивных признаков железобетонных конструкций, характеристик бетона и арматуры на распределение электродных участков на арматуре;
- математическая модель атмосферной коррозии, определяющая процессы на арматуре в условиях диффузионной кинетики, которая позволила выявить неравномерность распределения коррозионных токов по окружности сечения арматурного стержня в зависимости от типа железобетонной конструкции, расположения арматуры в ней, характеристик бетона;
- аналитические представления и результаты экспериментальных исследований влияния периодического профиля на явление манжетной жидкости на арматуре;

-математическая модель, описывающая поведение манжетной жидкости на поверхности арматурного стержня периодического профиля;

-математическая модель и результаты экспериментальных исследований распределения электродных участков на арматуре периодического профиля при низкопотенциальной коррозии, которая позволила оценить коррозионные процессы на арматуре в зависимости от геометрии её профиля;

-математическая модель работы протяжённых макрогальванических элементов на арматуре линейных железобетонных конструкций, особенностью которой является то, что реальная поверхность арматуры условно разбивается на участки с постоянными электрохимическими параметрами, а возникающие уравнивающие токи в бетоне рассматриваются как внешний полярирующий ток;

-новая коррозионная характеристика - модуль поверхности (отношение площади поверхности арматуры к площади поверхности самой железобетонной конструкции), которая позволяет увязать прочностные и коррозионные характеристики железобетонного элемента;

-установленные обобщенные принципы создания систем катодной защиты арматуры надземных железобетонных конструкций, выполнение которых позволяет обеспечить их оптимальный синтез;

-математическая модель электрополя протяжённого анода в бетоне, основанная на строгой постановке задач электрохимической защиты как краевой задачи математической физики, в результате решения которой получены простые инженерные формулы для расчёта защитного потенциала по окружности сечения арматурного стержня;

математическая модель, позволяющая получить распределение электрического потенциала на арматуре методом суперпозиции полей при работе нескольких протяжённых анодов;

-установленные закономерности, которые позволяют использовать математические модели электрополя протяжённых анодов для расчёта потенциала на арматуре при распределённом на поверхности конструкции аноде;

-математическая модель электрического поля в условиях неоднородных электрических характеристик бетона конструкции;

-математическая модель электрополя в бетоне при групповом расположении анодов на поверхности сечения железобетонного элемента, позволяющая добиться равномерного распределения защитного потенциала по окружности сечения арматурного стержня с учётом формы поперечного сечения железобетонного элемента;

-экспериментальные методики и результаты экспериментальных исследований распределения защитного потенциала на поверхности арматурного стержня при линейных анодах, которые позволили установить адекватность математических моделей описываемым процессам;

- разработанные методики и результаты производственных испытаний по определению анодных участков вдоль арматурных стержней железобетонных конструкций, позволяющих выбрать систему катодной защиты и правильно распределить аноды (или протекторы).

Д о с т о в е р н о с т ь результатов подтверждается адекватностью результатов расчёта на математических моделях и действующих систем катодной защиты, хорошей сходимостью результатов теоретических, лабораторных исследований с опытом эксплуатации разработанных систем катодной защиты,

П р а к т и ч е с к а я ц е н н о с т ь. Выполненные исследования позволили создать простые и надёжные системы катодной защиты надземных железобетонных элементов на существующей приборной базе. Их использование позволяет снизить затраты на ремонт конструкций в 2 и более раз, расширяет возможности защитных мероприятий в условиях действующих производств. Разработаны рекомендации по изменению конструктивных решений железобетонных элементов, способствующие повышению их коррозионной стойкости и снижению затрат при их электрохимической защите. Полученные результаты могут служить основой для разработки нормативных документов по защите от коррозии арматуры железобетонных конструкций, расширения разделов СНиП по защите строительных конструкций от коррозии.

В е л и з а ц и я р а б о т ы. Работа выполнена на основании Постановления Совета Министров УССР от 11 июля 1985 года №272, по заказам предприятий, а также научно-технической программы Госкомитета Украины по вопросам науки и технологий 05.52.01 "Противокоррозионная защита металлофонда Украины" (Приказ №15 от 01.03.93).

Внедрение разработанных систем осуществлено рядом организаций и предприятий: П/О "Химволокно" г.Черкассы, П/О "Химпром" г.Сумы, Черкасская фабрика гигроскопической ваты, Полтавский гормолокозавод, завод газорозрядных ламп г.Полтава, Полтавский Облавтодор.

А п р о б а ц и я р а б о т ы. Результаты исследований докладывались и обсуждались на:

Республиканском семинаре "Повышение долговечности и снижение материалоемкости конструкций" (Полтава, 1984 г.);

Республиканской научно-технической конференции "Повышение эффективности сельскохозяйственного строительства на основе механизации и сокращения затрат ручного труда" (Полтава, 1985 г.);

Республиканской научно-технической конференции "Совершенствование железобетонных конструкций, работавших на сложные виды деформаций и их внедрение в строительную практику" (Полтава, 1989 г.);

III Всесоюзной научно-практической конференции "Коррозия и защита строительных конструкций производственных зданий и сооружений" (Донецк, 1990 г.);

У-й Украинской конференции по электрохимии (Ужгород, 1990 г.);

Всесоюзном семинаре-презентации "Защита от коррозии в строительстве" (Челябинск, 1991 г.);

Научно-практической конференции "Оценка состояния и методы усиления строительных конструкций зданий и сооружений" (Караганда, 1992г.);

Научных конференциях профессоров, преподавателей, научных работников, аспирантов и студентов Полтавского инженерно-строительного института (Полтава, 1985 - 1994 г.г.)

П у б л и к а ц и и. Основные положения диссертации изложены в 35 публикациях, имеется 5 авторских свидетельств.

Ст р у к т у р а и о б ъ ъ м р а б о т ы. Диссертация состоит из введения, восьми глав и заключения. Содержит 280 страниц машинописного текста, 94 рисунков, 25 таблиц и приложения на 100 страницах. Список использованных литературных источников включает 304 наименований.

2.ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

В первой главе "Состояние вопроса и задачи исследований" излагается состояние науки о коррозии арматуры в бетоне и существующих методах защиты, приведены общие сведения об электрохимической коррозии и защите металлов, дана характеристика катодной защиты арматуры в бетоне. В заключении главы сформулированы задачи исследований.

Защита железобетонных конструкций является важной народнохозяйственной задачей. Достижения в области защиты железобетонных конструкций, во многом опирающиеся на фундаментальные исследования ученых в области коррозии и защиты железобетона, отражены в работах С.Н.Алексеева, В.С.Артамонова, Н.А.Александрова, В.И.Бабужкина, Б.Г.Батракова, Л.А.Вандаловой, С.Б.Бнишерова, В.И.Новгородско-

го, О.П.Медлова-Петросяна, М.П.Мокрицкой, А.А.Старосельского, В.П.Шевякова, их сотрудников и коллег.

Практика эксплуатации надземных железобетонных конструкций показывает, что темпы разрушения конструкций превышают темпы восстановительных работ. Это, во многом, обусловлено тем, что не все направления по защите железобетонных конструкций используются. Из трёх основных направлений защиты арматуры железобетонных конструкций - улучшение свойств металла арматуры, снижение коррозионной активности бетона как среды, защита металла арматуры - в отечественной практике наибольшее развитие получило второе направление, наименьшее - последнее (защитные покрытия на поверхности арматуры, катодная защита).

Развитие электрохимических методов защиты, теоретические и экспериментальные исследования по катодной защите подземных конструкций и конструкций в воде позволили более широко взглянуть на этот метод, найти области применения, где раньше он не применялся. К этой области, в первую очередь, можно отнести надземные железобетонные конструкции.

Основной причиной ограниченного применения катодной защиты (только для подземных конструкций и конструкций в воде) по мнению профессора С.Н.Алексеева является отсутствие теоретических и практических проработок этого вопроса для отечественных условий строительства и эксплуатации конструкций из железобетона.

Катодная защита арматуры значительно расширяет применяемые для надземных железобетонных конструкций методы защиты. К преимуществам этого способа можно отнести его универсальность и простоту. Защита катодной поляризацией арматуры может быть применена как на новых, так и в конструкциях с уже прокорродировавшей арматурой, поддается простому регулированию и контролю, позволяет прекратить коррозию арматуры независимо от причин, её вызывавших и др.

Бытующее мнение о нарушении сцепления арматуры с бетоном при её катодной поляризации опровергается опытом эксплуатации систем с катодной поляризацией арматуры в зарубежной практике.

Для электрохимической (катодной) защиты важное значение имеет вопрос распределения электродных участков на арматуре при её коррозии. Анализ исследований показывает, что коррозионные процессы на арматуре изучались, главным образом, с точки зрения, когда бетон представлялся как коррозионная среда, а арматура - как металл, погруженный в бетон.

Однако конструктивные особенности надземных железобетонных элементов (многообразие, разные формы, разный процент армирования, расположение в здании и др.) во многом определяют места и величину анодных участков на арматуре. В отличие от постоянно действующих сред при коррозии металла в грунте, коррозия арматуры надземных железобетонных конструкций протекает под воздействием среды разной по фазовому, химическому составу, структуре и другим свойствам. В защитном слое бетон может содержать многообразные вещества за счёт сорбции из паровоздушной среды производственных помещений, непосредственного контакта с технологическими проливами. Все это приводит к образованию разных коррозионных систем на поверхности арматуры железобетонных конструкций и требует учёта при защите.

Существует достаточно разработанная теория расчёта электрических полей гальванических систем, работающих в проводящих средах, на основании которой могут быть разработаны методы определения параметров катодной защиты любых металлических элементов, эксплуатируемых в любых токопроводящих средах. В этих работах показано, что потенциал электрического поля гальванической системы "защитаемая поверхность - аноды" удовлетворяет уравнению Лапласа, а граничные условия определяются электрохимическими процессами на границе металл - среда. Работ, рассматриваемых аналогичные вопросы применительно непосредственно к расчёту защитных полей в бетоне отечественных надземных железобетонных конструкций до сих пор не имелось.

Особенности надземных железобетонных конструкций, характер распределения электродных участков на их арматуре не даёт права механически перенести системы катодной защиты, используемые в условиях подземных конструкций и конструкций в воде.

Обзор состояния вопроса коррозии и защиты арматуры в бетоне надземных железобетонных конструкций позволяет сформулировать основные задачи исследований:

1. Изучить коррозионное состояние надземных железобетонных конструкций с учётом их вида, условий эксплуатации, действующих сред.
2. Провести анализ применяемых систем катодной защиты.
3. Разработать методы расчёта электрополя в бетоне.
4. Разработать методику проектирования и расчёта систем катодной защиты надземных железобетонных конструкций.
5. Создать экспериментальные системы катодной защиты и провести их апробацию на практике.
6. Провести технико-экономическую оценку систем катодной защиты надземных железобетонных конструкций.

Вторая глава "Особенности работы надземных железобетонных конструкций в условиях воздействия эксплуатационных сред" посвящена установлению взаимосвязи коррозионных процессов с конструктивными параметрами арматуры, железобетонных элементов, условиями эксплуатации железобетона.

Изучение конструкций массового строительства из железобетона, действующих сред, натурные исследования условий возникновения и видов гальванических элементов на арматуре железобетонных конструкций зданий и сооружений показали, что скорость коррозии управляется процессами, спонтанно протекающими между металлом арматуры и средой, действием токов макрогальванических пар, токов внешнего электрического силового поля. Электрохимическое поведение металла арматуры в конструкции в большой степени зависит от конструктивных особенностей железобетонных элементов, условий эксплуатации, объёмно-планировочного решения здания.

Для индустриального строительства характерно большое количество разнотипных конструктивных элементов. Это в свою очередь приводит к различным условиям коррозии их арматуры. В железобетонных балках, толстых плитах доступ деполяризатора через бетон обеспечивается, главным образом, односторонний. В тонкостенных плитах, линейных железобетонных элементах - двухсторонний. Через торцы и рёбра плит, боковую поверхность тонкостенных балок доступ деполяризатора к арматуре обеспечен трёхсторонний. Все железобетонные элементы с точки зрения доступности их арматуры для деполяризатора, агрессивной среды разделены на элементы с односторонним, двухсторонним и трёхсторонним фронтом доступности.

Предложено все гальванические элементы на арматуре надземных железобетонных конструкций для учета их влияния и взаимосвязи классифицировать на: протяжённые макрогальванические элементы (вызванные воздействием различающихся внешних сред на одну и ту же конструкцию, изменением характеристик бетона), макрогальванические элементы (вызванные расположением арматуры в бетоне, профилем арматуры, трещинами в бетоне, макронеоднородностью бетона), микрокоррозионные элементы (вызванные микрогетерогенностью бетона и арматуры).

Основываясь на принятой классификации, разработаны модели коррозии арматуры надземных железобетонных конструкций, структурными составляющими которых являются: внешняя среда, бетон, арматура

На математических моделях и экспериментально изучены наиболее характерные гальванические элементы, возникающие на арматуре железобетонных конструкций согласно установленного представления о процессах коррозии.

Учитывая то, что атмосферная коррозия металла в нейтральных и щелочных средах протекает с кислородной деполяризацией, в работе проведен теоретический анализ состояния арматуры железобетонных элементов в этих условиях. В качестве базовой была принята модель коррозии арматурного стержня в полупространстве заполненном бетоном при диффузионном контроле процесса и одностороннем фронте поступления деполяризатора (кислорода) к поверхности арматуры через бетон.

Процесс стационарного массопереноса по диффузионному механизму описан следующим дифференциальным уравнением

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial C(\rho, \theta)}{\partial \rho} \right) + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 C(\rho, \theta)}{\partial^2 \theta} = 0, \quad (1)$$

где $C = f(\rho, \theta)$ — концентрация кислорода в произвольной точке $M(\rho, \theta)$.

В качестве граничных условий приняты: начальная концентрация кислорода в бетоне (C_n) и концентрация кислорода на поверхности арматуры ($C=0$).

Решение дифференциального уравнения с принятыми граничными условиями имеет вид:

$$i_{\text{нк}} = F \cdot D \cdot C_n (a^2 - 1) / [M_k \cdot z \cdot (1 + a^2 - 2a \cdot \cos \theta) \ln a] \quad (2)$$

где $i_{\text{нк}}$ — плотность тока; $a = \frac{h + \sqrt{h^2 + z^2}}{z}$; θ — полярная координата; h — расстояние от поверхности бетонного элемента до центра сечения арматурного стержня; z — радиус арматурного стержня; D — коэффициент диффузии кислорода в бетоне; F — число Фарадея; $F/M_k = 1.91 \times 10^{-4}$.

Установлено, что плотность коррозионного тока на поверхности арматуры в бетоне пропорциональна коэффициенту диффузии деполяризатора (кислорода) и начальной концентрации его в бетоне. Распределение тока по окружности сечения арматуры носит не равномерный характер. Большая плотность тока наблюдается в местах более доступных для деполяризатора.

На рис. I.2 представлены графики распределения токов коррозии по окружности сечения арматурного стержня для различных элементов из железобетона. Наиболее равномерное распределение коррозии по окружности сечения в тонких плитах. Во всех остальных случаях коррозионные процессы имеют ярко выраженную неравномерность. На арматуре меньшего диаметра плотность коррозионного тока, как правило, выше. Чем больше фронт, обеспечивавший доступ кислорода, тем эта разница больше.

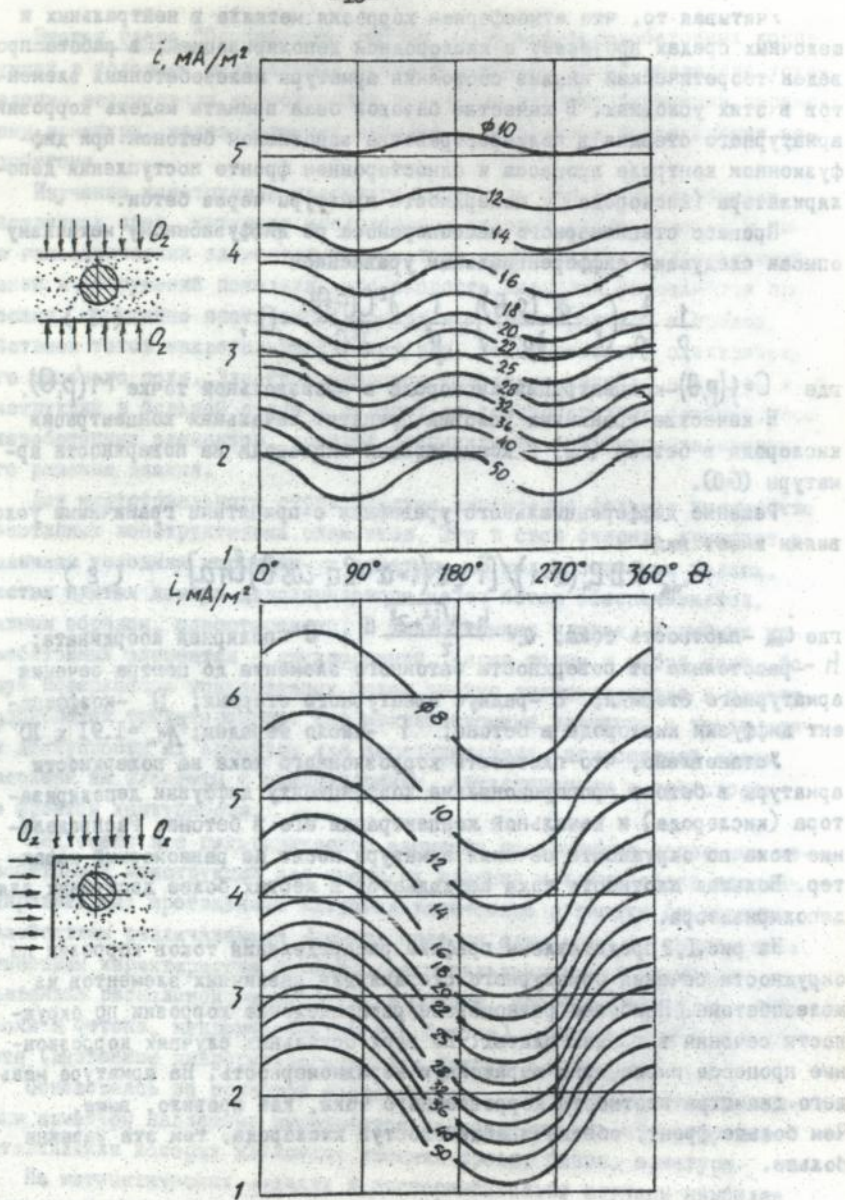


Рис. 1 Распределение токов коррозии на арматуре с двухсторонним фронтом поступления кислорода

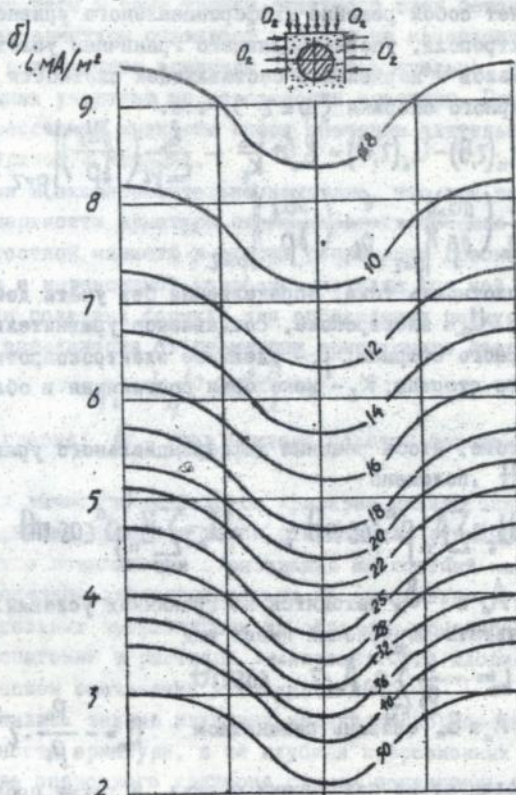
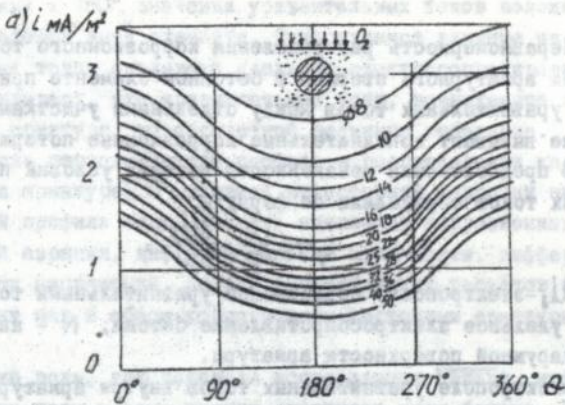


Рис. 2 Распределение токов коррозии на арматуре с односторонним (а) и трёхсторонним фронтом поступления кислорода (б)

Неравномерность распределения коррозионного тока по окружности сечения арматурного стержня в бетонном элементе приводит к возникновению уравнивающих токов между отдельными участками поверхности, которые вызывает дополнительные коррозионные потери.

В предположении неизменности внешних условий плотность уравнивающих токов определяли по формуле

$$i_y = -\frac{1}{\rho_s} \cdot \frac{\partial U_s}{\partial N} \quad (3)$$

где U_s - электрополе, создаваемое уравнивающими токами в бетоне; ρ_s - удельное электросопротивление бетона; N - направление нормали к наружной поверхности арматуры.

Электрополе уравнивающих токов внутри арматурного стержня представляет собой решение дифференциального уравнения для стационарного электрополя, удовлетворяющего граничным условиям непрерывности потенциалов и нормальной составляющей плотности тока на поверхности арматурного стержня ($\rho = z$), т.е.

$$U_a(z, \theta) - U_s(z, \theta) = b_2 \ln \frac{r_m}{K_2} - \frac{b_2}{r_m \rho_s} \left(\frac{\partial U_s}{\partial \rho} \right) \Big|_{\rho=z};$$

$$\frac{1}{\rho_a} \left(\frac{\partial U_a}{\partial \rho} \right) \Big|_{\rho=z} = \frac{1}{\rho_s} \left(\frac{\partial U_s}{\partial \rho} \right) \Big|_{\rho=z} \quad (4)$$

где $i_{ак}$ - плотность тока, определяемая без учёта действия уравнивающих токов; U_a - электрополе, создаваемое уравнивающими токами внутри арматурного стержня; ρ_a - удельное электросопротивление металла арматурного стержня; K_2 - некоторая постоянная в области диффузионной кинетики.

Для того, чтобы решения дифференциального уравнения были периодичны по θ , положено

$$U_s = \sum_{n=0}^{\infty} A_n \cdot \rho^n \cdot \cos n\theta; \quad U_a = \sum_{n=0}^{\infty} B_n \cdot \rho^n \cdot \cos n\theta. \quad (5)$$

Константы A_n и B_n находятся из граничных условий.

Результаты вычислений имеют вид

$$i_n = -\frac{1}{\rho_s} \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot A_n \cdot z^{-n-1} \cdot \cos n\theta. \quad (6)$$

Константы A_n и B_n связаны равенством $B_n = -\frac{\rho_a}{\rho_s} \cdot z^{-2n} \cdot A_n$.

Как следует из полученных формул, а также проведенных по ним численным расчётам, при θ близких к нулю плотность уравнивающих токов отрицательна, т.е. здесь расположен катод элемента и, наоборот,

рот, при θ близких к 180° значения уравнильных токов положительные, т.е. здесь расположен анод элемента. Существенное влияние на плотность уравнильных токов оказывает удельное электросопротивление бетона. Расчёты показывают, что уравнильные токи, возникающие в поперечном сечении на арматуре, по абсолютной величине небольшие.

Выявлена роль периодического профиля в распределении коррозионных процессов на арматуре. В условиях атмосферной коррозии на арматуре периодический профиль может вызвать появление коррозионных пар дифференциальной аэрации, дифференциальной щёлочности, дифференциальных растягивающих напряжений. Анализ аналитических расчётов показывает, что роль этих пар в общем коррозионном состоянии арматуры незначительная.

Определённую роль, как показали исследования НИИЖБа, играют макрокоррозионные пары в зоне трещин защитного слоя бетона. Установлено, что профиль арматуры оказывает влияние на накопление агрессивной жидкости на поверхности арматуры, а, следовательно, и на распределение электродных участков на поверхности арматуры. При коррозии под плёнками агрессивной жидкости имеет значение длительность пребывания её на поверхности металла.

Теоретически и экспериментально доказано, что под защитным слоем бетона на поверхности арматуры периодического профиля возможно образование жидкостной манжеты в местах сопряжения гребней профиля с телом стержня и интенсивной коррозии металла под ней. Теоретически была получена формула для определения радиуса кривизны такой манжеты в зависимости от геометрии арматурного стержня

$$\rho_1 = h_r / 2 \sin^2 \frac{\theta}{2}, \quad (7)$$

где h_r - высота гребня; θ - угол наклона боковой поверхности гребня к телу стержня.

Аналитически вычисленные радиусы кривизны манжет оказались больше радиусов сопряжений гребня с телом стержня для стандартной арматуры, что говорит о возможности образования жидкостной манжеты. Это было также доказано экспериментально на специальных установках путём съятия продольных профилограмм на образцах арматурных стержней до и после испытаний в растворе 3-х процентного хлористого натрия при периодическом смачивании и высушивании.

Так как ставилась задача изучения характера коррозионных процессов на поверхности арматуры, а не глубина коррозионных повреждений, то в качестве оценочного критерия служил показатель профилограммы, который определялся по формуле:

$$\Delta = \delta_1 / \delta_2, \quad (8)$$

где δ_1 - высота гребня после испытаний; δ_2 - тоже, до испытаний.

Для всех случаев и сроков испытаний Δ оказалось больше 1. Таким образом экспериментально было подтверждено допущение об интенсификации локальных коррозионных процессов в местах образования жидкостных манжет.

Аналитически удалось более точно определить форму плёнки на поверхности арматурного стержня и проследить её изменение во времени в процессе сушки. Построена математическая модель, описывающая поведение формы плёнки влаги на поверхности образца, основанная на том, что скорость испарения влаги с поверхности плёнки пропорциональна её площади, т.е. $\sigma = kS$ или $\partial V / \partial t = kS$.

Здесь V - объём; σ - скорость испарения; S - площадь поверхности; k - коэффициент пропорциональности.

После подстановки в формулу функции поверхности $u = u(t, x, y)$,

$$V = \iint_D u dx dy, \quad S = \iint_D (1 + u_x^2 + u_y^2)^{1/2} dx dy$$

получили:

$$\frac{1}{k^2} u_t^2 - u_x^2 - u_y^2 = 1, \quad (9)$$

где $u_t = \partial u / \partial t$; $u_x = \partial u / \partial x$; $u_y = \partial u / \partial y$.

Таким образом функция, описывающая форму пленки на поверхности образца в процессе испарения, является решением уравнения эйконала. Для случая, когда достаточно рассмотреть только продольное сечение образца, можно считать, что функция u зависит только от двух переменных $x_0 = kt$, $x_1 = x$.

При этом уравнение эйконала преобразуется к виду: $u_0^2 - u_1^2 = 1$, (10)
где $u = u(x_0, x_1)$; $u_0 = \partial u / \partial x_0$; $u_1 = \partial u / \partial x_1$.

Найдены решения уравнения, основанные на его симметричных свойствах, в виде анзацев (подстановок), для чего выписано 14 инвариантов. Решение полученное в форме, позволяющей удовлетворить конкретным начальным и граничным условиям. Так как диффузионная плотность коррозионного тока связана известной зависимостью с толщиной плёнки жидкости на поверхности образца, то решения позволяют описать коррозионные процессы на нём и прогнозировать их развитие во времени.

Проведен теоретический анализ коррозионных процессов на арматуре периодического профиля в условиях низкпотенциальной коррозии на математической модели, в которой граница фаз "жидкость - металл" представлена в виде синусоидального слабовыгнутого профиля $y = H \cdot \sin kx$, где H - амплитуда; L - период; $k = 2\pi/L$; x, y - текущие координаты. При составлении математической модели принято, что массоперенос

анодных и катодных деполяризаторов у поверхности корродирующей арматуры определяется диффузией, что на достаточно больших расстояниях от границы раздела фаз плотность тока постоянна, а линии электрического тока параллельны между собой и перпендикулярны поверхности арматурного стержня.

При таких допущениях в стационарных условиях задача сводится к совместному решению двумерных дифференциальных уравнений Лапласа, описывающих диффузионное поле анодных и катодных деполяризаторов:

$$\Delta \bar{C} = 0 \quad (II)$$

при следующих граничных условиях:

-уравнение границы фаз $y = H \sin kx$;

-условие постоянства плотности тока на больших расстояниях от границы фаз (регулярность на ∞)

$$i = \epsilon_1 \frac{\partial C^1}{\partial y} = i_{кор} \text{ при } y \rightarrow \infty; \quad i = \epsilon_2 \frac{\partial C^2}{\partial y} = i_{кор} \text{ при } y \rightarrow -\infty;$$

-условие сопряженности процессов на поверхности раздела фаз

$$\epsilon_1 \frac{\partial C^1}{\partial n} = \epsilon_2 \frac{\partial C^2}{\partial n};$$

-условие эквипотенциальности поверхности арматурного стержня (при высокой проводимости электролитической среды и слабевыпуклом синусоидальном профиле), потенциал которой равен стационарному.

В уравнениях:

C^1 и C^2 - концентрации анодного и катодного деполяризаторов;

$$\epsilon_1 = z_1 D_1 F; \quad \epsilon_2 = z_2 D_2 F;$$

z - заряд диффундирующих ионов; D - коэффициент диффузии;

F - число Фарадея; $i_{кор}$ - плотность тока коррозии; $\partial C / \partial n$ - производная по нормали к профилю.

Учитывая, что $kH < 1$, уравнение Лапласа решалось методом возмущения, представляя концентрации в виде рядов по малому параметру kH . Получено следующее решение уравнения:

$$i_2(x) = i_{кор} [1 + h(A \sin kx + B \cos kx)]. \quad (12)$$

Постоянные A и B определяются из граничных условий.

Когда катодная и анодная реакции регулируются диффузией, распределение коррозионного тока на синусоидальном профиле может быть определено по формуле:

$$i_2(x) = i_{кор} (1 + Hk \sin kx). \quad (13)$$

Анализ полученного уравнения показывает, что коррозионные процессы на арматурном профиле в условиях низкопотенциальной коррозии приводят к его сглаживанию. С ростом скорости коррозии возрастает неравномерность распределения тока. Кроме того, геометрия профиля

также оказывает влияние на распределение коррозионного тока.

Изменение амплитуды профиля во времени может быть представлено уравнением

$$-dH = \frac{M}{\rho \cdot z_n \cdot F} (i_{\wedge} - i_{\vee}) dt, \quad (14)$$

где M и ρ - молекулярная масса и плотность растворяющегося металла; i_{\wedge} и i_{\vee} - плотность тока растворения металла на выступах и впадинах профиля.

После решения данного дифференциального уравнения при начальных условиях $H|_{t=0} = H_0$, получим

$$H = H_0 \cdot e^{-At}, \quad (15)$$

где $A = \frac{M}{\rho \cdot z_n \cdot F} \cdot i_{\text{пер}} \cdot K$.

Экспериментальная проверка показала, что полученное уравнение отражает реальные коррозионные процессы на арматурном профиле.

После 4-х месячного испытания арматурных стержней в 3-х процентном растворе хлористого натрия теоретические расчеты изменения амплитуды арматурных стержней Э36 и замеренные результаты отличались в среднем на 6%.

Неравномерность распределения коррозионного тока вдоль арматурного стержня приводит к образованию протяженных макрокоррозионных пар. По причине множества типов железобетонных конструкций, условий в которых они находятся, возникает трудности учёта действия уравнивающих токов, которые при этом возникают на арматуре.

В работе для изучения действия протяженных макрогальванических пар приняты приближенные численные методы. Разбив условно арматурный стержень в продольном направлении на ряд участков, в которых электрохимические характеристики принимаются постоянными, возникающие уравнивающие токи между участками рассматриваются как внешние поляризующие токи.

Потенциал U_i отрезка с номером i определяется как разность электрического потенциала между металлом арматуры и бесконечно удаленной точкой

$$U_i = \varphi_{ci} + \Delta\varphi_i + J_i(R_{\rho i} + \tau_{ii}) + \sum_{k=1}^{i-1} (\tau_{ki} + \eta_{ki}) J_k + \sum_{k=i+1}^m (\tau_{ki} + \eta_{ki}) J_k, \quad (16)$$

где m - число участков; J_i, J_k - ток, приходящийся на i -ый и k -ый участки; φ_{ci} - потенциал коррозии отрезка с номером i ;

$\Delta\varphi_i = J_i R_{\rho i} / S_i$ - изменение потенциала коррозии под действием поляризующего тока; $R_{\rho i}$ - удельная поляризуемость металла, зависящая от поляризующего тока J_i ; $R_{\rho i}$ - сопротивление растекания тока;

η_{ki}, τ_{ki} - функции влияния, численно равные потенциалу, который

возникает на отрезке с номером i под действием единичного тока, соответственно стекающего с отрезка K и его зеркального отражения относительно поверхности конструкции.

Так как ток J_i гальванического происхождения, то можно записать ещё одно уравнение:

$$\sum_{i=1}^m J_i = 0. \quad (17)$$

Удовлетворяющее по точности решение системы уравнений получено при допущении, что всегда

$$J_i \left(R_{pi} + \tau_{ii} + \frac{R_{ni}}{S_i} \right) > \sum_{k=1}^{i-1} (\tau_{ki} + \eta_{ki}) \cdot J_k + \sum_{k=i+1}^m (\tau_{ki} + \eta_{ki}) \cdot J_k,$$

тогда

$$J_i = \frac{S_i}{S_i (R_{pi} + \tau_{ii}) + R_{ni}} \cdot \frac{\sum_{i=1}^m \frac{\varphi_{ci} \cdot S_i}{S_i (R_{pi} + \tau_{ii}) + R_{ni}}}{\sum_{i=1}^m \frac{S_i}{S_i (R_{pi} + \tau_{ii}) + R_{ni}}}. \quad (18)$$

Скорость же электрохимической коррозии различных участков может быть описана формулой

$$i = i_{ок} + \frac{J_i}{S_i} \quad (19)$$

Проведенные расчёты по полученным зависимостям показывают, что токи протяжённых микрогальванических пар играют большую роль в коррозионных процессах на арматуре. На коррозионные потери решающее влияние оказывает соотношение площадей анодных и катодных участков. При малых анодных участках и больших катодных участках плотность коррозионных токов в результате действия протяжённых микрогальванических пар может быть в десятки раз больше плотности токов при общей коррозии арматуры.

Установлено, что потери массы арматурой периодического профиля при одной и той же скорости равномерной коррозии будет больше, чем гладкой. Причём, для арматурных профилей малых диаметров потери массы более значительные, чем для профилей больших диаметров. Относительная потеря сечения также значительнее для профилей малых диаметров.

Так как коррозия связана с поверхностными процессами, то считается целесообразным ввести как один из оценочных критериев коррозии площадь поверхности арматурных профилей.

Расчёты поверхности гладкой арматуры выполнены по формуле

$$S_r = \frac{5128 Q}{d}, \quad (20)$$

где S_r - боковая поверхность погонного метра стержня; Q - масса одного погонного метра стержня; d - номинальный диаметр стержня.

Получены также формулы для расчёта поверхности стандартной арматуры периодического профиля (обычного и специального исполнения). Для арматуры обычного исполнения расчёт проводился по формуле

$$S = 6S_1 + 7S_2 + 7S_3 - 2S_{np}, \quad (21)$$

$$\text{где } S_1 = \frac{\pi}{\cos \beta} \left[p \sqrt{p^2 + (k \cos \beta)^2} + (k \cos \beta)^2 \ln \left(p + \sqrt{p^2 + (k \cos \beta)^2} \right) \right] \begin{cases} p = R_2 \\ p = R_1 \end{cases}$$

- площадь поверхности боковых граней гребней;

$$S_2 = 3(2\pi R_2 z_0 - 2\ell_0 h) \quad \text{- площадь поверхности верхних граней гребней;}$$

$$S_3 = 3(2\pi R_1 z_0 - 2\ell_0 h) \quad \text{- площадь поверхности впадин между гребнями;}$$

S_{np} - площадь поверхности продольных рёбер;

$$k = \frac{7t}{2\pi}; \quad R_1 = d/2; \quad R_2 = d/2 + h; \quad \beta = 90^\circ - \alpha;$$

d - диаметр стержня по впадинам; h, t, α - соответственно, высота, шаг, наклон гребней.

Для профиля специального исполнения расчёт проведен по аналогичной формуле, в которой

$$S'_3 = 4\pi \int_{z_1}^{z_2} \sqrt{k^2 + \frac{(p + d/2 - z_1)^2 \cdot p^2}{z_1^2 - (p - d/2 - z_1)^2}} dz$$

где $0 \leq \varphi \leq 2\pi$; $d/2 \leq p \leq d/2 + h_r$; z - радиус выгиба впадин;

h_r - высота гребня.

Доказано, что прилирование арматуры приводит к увеличению поверхности, а следовательно, к большей склонности к коррозионным поражениям.

Однако, важно было выявить не только склонность арматуры к коррозии, но и определить потери рабочих свойств при совместной работе её с бетоном. Для этого введен новый показатель K (модуль поверхности) - отношение площади поверхности рабочей арматуры к площади поверхности рассматриваемого железобетонного элемента. Согласно расчётам значение этого показателя колеблется в широких пределах для различных железобетонных элементов.

Для установления связи между показателем K и прочностными характеристиками элемента были получены специальные формулы. Для сматых элементов прямоугольного сечения с симметрично расположенной арматурой после введения в известную формулу для подбора сечения арматуры

$$A_s = d_s \frac{R_s \cdot b \cdot h_0}{R_s}$$

значений площадей боковых поверхностей арматуры и бетона, получена зависимость

$$K = d_s \frac{R_s}{R_s} \cdot \frac{h_0}{d}. \quad (22)$$

В данной формуле приняты следующие обозначения:

R_c, R_s — соответственно, расчётные сопротивления бетона сжатия и арматуры растяжения при предельных состояниях первой группы;
 b — размер поперечного сечения элемента из железобетона;
 h_0 — размер высоты поперечного сечения элемента;
 d — диаметр рабочей арматуры.

При равномерной коррозии арматуры железобетонных элементов значение их модуля поверхности K будет уменьшаться со временем, главным образом, за счёт уменьшения поверхности арматуры. Следовательно, зная среднюю линейную скорость коррозии арматуры, можно определить значение K через интересующий нас срок эксплуатации элемента. Это даёт возможность, используя известные характеристики R_c, R_s, h_0 , найти d_s , по которому к рассматриваемому сроку определяется несущая способность (N^{max}, M^{max}), например, из таблиц приложения 3 Пособия по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из тяжёлых и лёгких бетонов без предварительного напряжения арматуры (к СНиП 2.03.01-84).

Подобная связь между показателем K и прочностными характеристиками найдена для изгибаемых элементов из железобетона. Проведя аналогичные подстановки в формулу для определения площади сечения рабочей арматуры, была получена формула, связывающая показатель K с прочностными характеристиками изгибаемого элемента

$$K = \frac{2M}{R_c \xi h_0 (b+h) \cdot d^2} \quad (23)$$

где $\xi = 1 - 0,5\xi$; $\xi = \frac{R_s \cdot A_s}{R_c \cdot b \cdot h_0}$; $\xi = 1 - 0,5 \frac{R_s \cdot A_s}{R_c \cdot b \cdot h_0}$;

M — изгибающий момент; b и h — размеры сечения элемента.

Зная среднюю линейную скорость коррозии арматуры, можно также определить значение K через интересующий нас срок эксплуатации элемента. По известным значениям K и прочностным характеристикам элемента возможно определить значение изгибающего момента. В работе проведены расчёты изменения несущей способности основных железобетонных элементов при коррозии их арматуры.

В третьей главе "Анализ технических решений систем катодной защиты арматуры железобетонных конструкций" сформулированы основные требования при назначении параметров катодной защиты, определены критерии катодной защиты, обобщён опыт проектирования и применения систем катодной защиты, разработаны принципы создания устройств защиты.

Вычисленные термодинамические значения защитных потенциалов показывают, что электрохимическая защита арматуры в принципе возможна в средах с различными pH (от кислых до щелочных). Однако механизм катодной защиты существенно зависит от природы электролита и металла. Так, при низкой поляризации металла в данном электролите, когда процесс коррозии определяется химическими реакциями, катодная защита не эффективна.

Признано наиболее целесообразным применение катодной защиты арматуры в нейтральных и слабощелочных средах, при электрокоррозии и при нейтрализации токов макрогальванических пар. Техническая и экономическая целесообразность катодной защиты определяется необходимой плотностью тока для сдвиги потенциала до защитного.

Для определения эффективности защиты большое внимание уделяется выбору критериев. Общепринятый потенциальный критерий $U_{\min} = -0.85$ В относительно медносульфатного электрода сравнения (Критерий I). Может быть принят критерий, рекомендованный стандартом GSA (RP-01-69) и некоторыми отечественными специалистами, который предусматривает необходимость сдвиги защитного потенциала от стационарного на 300 мВ (Критерий II). Скорость коррозии уменьшается до технически допустимой, если смещение потенциала коррозии стали в первоначальный момент после отключения катодной защиты, составляет не менее 100 мВ (Критерий III). Этот критерий рекомендован стандартом GSA.

Выбор того или другого критерия зависит от условий контроля, имеющейся приборной базы и др. При затруднении контроля потенциала защиты относительно медносульфатного электрода сравнения может быть рекомендован метод, предложенный американскими специалистами. Если потенциал, измеренный над арматурой в процессе катодной защиты более отрицательный, чем потенциал в стороне от нее, то арматура рассматривается как катодно защищена. Не вызывает больших трудностей также замеры потенциалов на арматуре без использования специальных электродов сравнения относительно анода, считая его потенциал постоянным. Правда, при этом не гарантируется высокая точность результата замеров.

Вопросы катодной защиты арматуры надземных железобетонных конструкций рассмотрены, в основном, по зарубежным источникам. Было установлено, что системы катодной защиты могут применяться как для защиты арматуры надземных железобетонных элементов в условиях общей коррозии, так и для защиты на локальных участках. Эффективны системы катодной защиты в борьбе с электрокоррозией и при действии протяженных макрогальванических пар на арматуре.

Системы катодной защиты могут быть использованы при профилактических работах по удалению хлоридов из железобетонных элементов, при работе железобетонных элементов в условиях исключительного воздействия среды и др.

Нерегулируемые системы выгодны при защите в стабильных коррозионных условиях, автоматические - в изменяющихся условиях, импульсные системы и системы периодического действия дают возможность сэкономить в расходовании электроэнергии, смешанные системы позволяют одновременно вести защиту арматуры железобетонных элементов, которые находятся в разных коррозионных условиях от одного источника тока.

Выявлено, что при использовании протекторной защиты соблюдаются следующие принципы выбора протекторных сплавов: в нейтральных и слабощелочных средах используют чаще цинковые сплавы, в щелочных средах - магниевые сплавы. В средах с хлоридами лучше применять магниевые сплавы. Ставится предпочтение нерегулируемым короткозамкнутым протекторным системам. Изготавливают протекторы в виде различных дискретных элементов, лент. Устанавливают протекторы в специальные каналы, щели или непосредственно на поверхность конструкции. Крепление поверхностных протекторов выполняют на анкерах, клеях и др.

Питание систем катодной защиты осуществляется от выпрямителя, гальванического анода (протектора). Находят применение также солнечные батареи. Источник питания подбирается в зависимости от условий эксплуатации железобетонных элементов.

Разнообразные условия коррозии, действующих сред, конструкций потребовали разработки в зарубежной практике различных систем катодной защиты. Однако, при всем своем разнообразии системы катодной защиты основываются на одних и тех же принципах, хотя выполнение их в каждом конкретном случае может быть разным.

Выше было сказано, что критерием защиты является обеспечение минимального защитного потенциала на арматуре. В связи с этим можно назвать первый принцип создания систем катодной защиты - возможность поддержания на арматуре железобетонной конструкции минимального защитного потенциала. Выполнение этого принципа достигается подбором соответствующего по мощности и току источника питания (или протектора).

В центре внимания разработчиков систем катодной защиты находится вопрос равномерности распределения защитного потенциала на арматуре. Игнорирование этим параметром приводит к перезащите в бли-

жайших от анода местах и недозащите в удалённых местах конструкций. Таким образом, вторым принципом будем считать возможность обеспечения равномерного распределения потенциала на защищаемой поверхности. Техническое осуществление второго принципа связано с распределением на поверхности конструкции анодов и др.

Необходимость обеспечения защиты на протяжении всего срока службы конструкции требует стабильности работы систем катодной защиты. Всё это приводит к формулировке третьего принципа - стабильность работы систем катодной защиты. Обобщённое понятие стабильности включает в себя и надёжность, и ремонтпригодность, и долговечность, и др. Техническое обеспечение стабильной работы может быть разным. Это: применение долговечных элементов системы в данных средах, надёжной защитой самих элементов и т.д.

Вместе с тем, конструкция систем катодной защиты должна быть простой в обслуживании, монтаже. Это будет четвёртым принципом создания систем катодной защиты.

Все же большое разнообразие систем катодной защиты делает их дорогими, тормозит заводское их изготовление. Таким образом, пятым принципом является создание унифицированных систем катодной защиты.

В качестве шестого принципа назовём обеспечение минимального расходования электроэнергии. Этот принцип чаще всего обеспечивается рациональным распределением токов, снижением переходных сопротивлений, прерывистой подачей электричества, применением протекторов и др.

В практике катодной защиты надземных железобетонных конструкций большое внимание уделяется выбору анодов. Они отличаются техническими характеристиками, формой, размерами, применяемыми материалами, способом изготовления и монтажа, сроком службы и др. По типу аноды можно классифицировать на: дискретные (локальные), линейные, сеточные, комбинированные, покрытия. Для изготовления анодов применяют: высококремниевый чугун, графит, проволоча из углеродистой стали, меди, платинированного никобия, платинированной меди, платинированного титана, титановые листы и сетки, цинковые покрытия, электропроводящие лакокрасочные покрытия и т.п.

При выборе анодов учитывают особенности и условия эксплуатации защищаемых элементов, материал анода, значение защитного тока, срок службы. Кроме того, при выборе конструкции анода стремятся, чтобы он был прост в изготовлении, монтаже, восстановлении.

Если железобетонные элементы эксплуатируются в условиях, когда бетон защитного слоя сохраняет высокое омическое сопротивление,

то применяют рассредоточенные аноды в виде различных электропроводных покрытий. Основными компонентами таких покрытий являются: коксовая мелочь, электропроводящие крашки, лаки, мастики, графит, сажа и т.п. Одним из лучших вариантов для защиты железобетонных элементов признан вариант, когда инертный анод помещается в токопроводящее покрытие. При этом высокое омическое сопротивление мало влияет на режим защиты. Кроме того, ток с анода стекает в токопроводящее покрытие по механизму электронной проводимости, не вызывая растворения самого анода.

Применение различных поверхностных искусственных и композиционных анодов позволяет получить большую силу тока с единицы массы анода, что способствует их применению для наземных железобетонных конструкций.

Для защиты линейных железобетонных элементов применяют проволочные аноды из различных материалов, а плоских железобетонных элементов - аноды из просечных титановых листов, сеток, металлических напылений, композиционных покрытий и др. Для улучшения работы анодов используют покрытие их электрохимически активными составами.

В четвертой главе "Разработка математической модели для расчета распределения защитных электрических полей" изложен метод поиска распределения потенциала на арматурном профиле при его защите.

По известному распределению защитного потенциала (или тока) могут быть определены все основные параметры катодной защиты. Поэтому расчеты систем электрохимической защиты, по существу, сводятся к расчету стационарного электрического поля при данных условиях, определяемых как геометрической формой защищаемой поверхности, так и механизмом протекающих на ней электрохимических процессов.

Анализ существующих методов расчета стационарного электрополя показывает, что наиболее приемлемым является метод математического моделирования, основанный на строгой постановке задачи как краевой задачи математической физики.

В виду сложности расчета было сделано ряд допущений: о постоянстве проводимости среды (бетона); об отсутствии влияния границы раздела "бетон - воздух" на распределение поля в бетоне; об отсутствии градиента потенциала на арматуре. Исходя из того, что электросопротивление арматуры на несколько порядков меньше сопротивления бетона, поле анода и защищаемой арматуры принято плоским. Кроме того, в полученных соотношениях для расчета электрических полей сделано допущение о линейности поляризационных кривых во

всем рассматриваемом диапазоне плотностей тока. При этом, источник тока (анод) рассматривается как точечный источник постоянного тока J , расположенный в однородной среде (бетоне) с удельной проводимостью γ . (Рис. 3).

В строгой постановке сформулированная задача сводится к интегрированию уравнения Лапласа для потенциала электрического поля

$$\Delta U = 0 \quad (24)$$

с граничным условием, которое имеет вид:

$$\left(U - K \frac{\partial U}{\partial n} \right)_S = 0, \quad (25)$$

где U — сдвиг защитного потенциала от значения стационарного потенциала металла в условиях эксплуатации; $K = b_k \cdot \gamma$ — параметр поляризации; b_k — поляризационное сопротивление (катодная поляризация); γ — удельная электропроводность электролита (бетона); S — поверхность электрода (арматуры); n — внешняя нормаль к S .

Потенциал стационарного электрополя представлен выражением

$$U = -J \cdot K \cdot V_3 / 4\pi\gamma,$$

$$\text{где } V_3 = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{n \cdot Q_n \cdot \cos \theta}{z + kn} \cdot \left(\frac{z}{\rho} \right)^n; \quad z = \frac{r^2}{R};$$

R — координата точки расположения источника тока; ρ, θ — полярные координаты; $Q_n(t)$ — полином Лежандра второго рода.

После вычислений получили следующее приближённое значение потенциала

$$U \approx \frac{J}{4\pi\gamma} \left\{ \frac{z \cdot z}{\rho^2} \left(\frac{z}{z+2k} - \frac{2\rho \cdot \cos \theta}{z+k} \right) - \ln \left(1 + \frac{z^2}{\rho^2} - 2 \frac{z}{\rho} \cos \theta \right) \right\},$$

Воспользовавшись тем, что $\ln(1+x) \approx x$, а также подставив $\rho = z$, формула для вычисления потенциала стационарного электрополя принимает более простой вид

$$U = \frac{Jzk}{2\pi\gamma z(z+k)} \left[\cos \theta - \frac{z}{z} \cdot \frac{z+k}{z+2k} \right]. \quad (26)$$

Полученная формула позволяет определить распределение защитного потенциала по окружности поперечного сечения арматурного стержня, выявить влияние тех или других параметров на распределение потенциала. Из графика (Рис. 4) видно, что с ростом z неравномерность распределения потенциала усиливается. Определённое влияние на распределение потенциала по окружности сечения арматурного стержня оказыва-

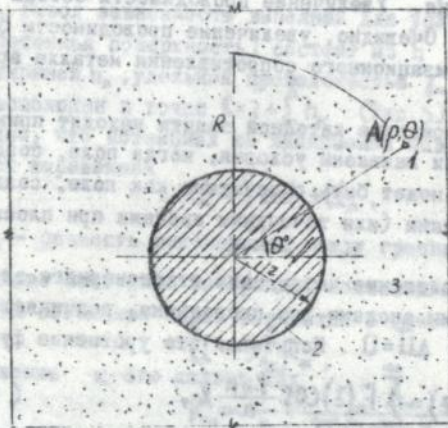


Рис. 3 К расчёту защитного потенциала на арматуре
1-точечный анод; 2-арматурный стержень; 3-бетон

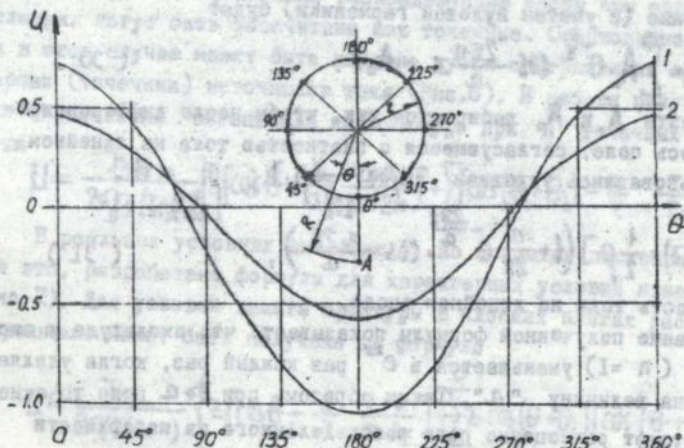


Рис. 4 Кривые распределения потенциалов по окружности сечения арматурного стержня при стекании тока с анода 0.03 А/м
1- при $R = 0.08$ м ; 2- при $R = 0.15$ м

ет показатель K . Увеличение его значения в целом неблагоприятно сказывается на равномерности распределения потенциала по окружности сечения арматурного стержня. Увеличение проводимости бетона улучшает распределение потенциала. Очевидно, увеличение проводимости бетона будет повышать роль поляризационного сопротивления металла арматурного стержня.

Учитывая то, что в практике катодной защиты находят применение распределенные аноды, были выявлены условия, когда поле, создаваемое распределенными анодами, может быть рассчитано как поле, создаваемое отдельными линейными анодами (или точечными анодами при плоской задаче).

Известно, что распределение потенциала стационарного электрополя, создаваемого точечными анодами вне проводника, подчиняется дифференциальному уравнению $\Delta U = 0$. Испытывая это уравнение функцией

$$U(x, z) = \sum_{n=0}^{\infty} F_n(z) \cos \frac{2\pi n}{a} x, \quad (27)$$

получили
$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{\partial^2 F_n}{\partial z^2} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4\pi^2 n^2}{a^2} F_n, \quad (28)$$

где a - расстояние между линейными анодами; n - число колебаний.

Решение полученного дифференциального уравнения имеет вид

$$F_n = A_n \cdot e^{-\frac{z}{a}}. \quad (29)$$

Полное же решение (с учетом нулевой гармоники) будет

$$U(x, z) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot e^{-\frac{z}{a}} \cdot \cos \frac{2\pi n}{a} x + A_0 z. \quad (30)$$

Коэффициенты A_0 и A_n выбираются так, чтобы после дифференцирования получалось поле, согласующееся с плотностью тока на линейном аноде. Воспользовавшись условием $\frac{\partial U}{\partial z} \Big|_{z=0} = \rho_n J$; $J \Big|_{x=0} = 0$,

получили
$$U(x, z) = \frac{1}{2} \rho_n J \left(1 + \frac{a}{2z} e^{-\frac{2z}{a}} \cdot \cos \frac{x \cdot 2\pi}{a} \right), \quad (31)$$

где J - плотность тока на линейном аноде.

Исследование полученной формулы показывает, что амплитуда у первой гармоники ($n=1$) уменьшается в $e^{\frac{2z}{a}}$ раз каждый раз, когда удаляемся от анода на величину " a ". Таким образом, при $z \gg a$ поле точечного анода действует равноценно полю распределенного на поверхности ($z=0$) анода.

Выведены зависимости, позволяющие получить распределение защитного потенциала на арматуре когда удельная проводимость бетона не постоянна. Вывод зависимости выполнен для условий, когда среда (окружающая бетонная поверхность) состоит из n кольцевых однородных участков шириной h_k , удельной проводимостью γ_k , а точечный источник тока J расположен в точке $R = r + \sum_{k=1}^n h_k$ (Рис.5). Из рассматриваемой модели видно, что потенциал на защищаемой поверхности арматуры будет определяться выражением

$$U = \sum_{k=1}^n \Delta U_k + U_n, \quad (32)$$

где $\sum_{k=1}^n \Delta U_k$ - разность потенциалов между границами однородных колец; U_n - потенциал источника на границе контакта со средой (бетоном).

Выразив потенциал через сопротивление κ точечного анода так

$$U = J \sum_{k=1}^n R_k,$$

а сопротивление κ -ого кольца $R_k = \frac{h_k}{\gamma_k}$, возможно привести неоднородную среду к эквивалентной однородной

$$\frac{1}{\gamma_0} = \frac{h_1}{\gamma_1 a(z+h_1)} + \frac{h_2}{\gamma_2 a(z+h_1+h_2)} + \dots + \frac{h_n}{\gamma_n a(z+h_1+\dots+h_n)}$$

Подставляя эквивалентную проводимость γ_0 в формулу для расчёта потенциала, возможно получить распределение потенциала по окружности сечения арматурного стержня в данных условиях.

Как было доказано выше распределённые аноды при определённых условиях могут быть рассчитаны как точечные. Стационарное электрополе в этом случае может быть найдено путём суперпозиции полей элементарных (точечных) источников тока (Рис.6). В работе получена формула для определения потенциала на арматуре при n точечных источниках тока

$$U = \frac{J_k z}{2\pi \gamma z(z+k)} \left\{ \left[\cos \theta - \frac{z}{r} \cdot \frac{z+k}{z+2k} \right] + \sum_{i=0}^n \left[\cos(\theta + \theta_i) - \frac{z}{r} \cdot \frac{z+K}{z+2k} \right] \right\} \quad (33)$$

В реальных условиях значение z не остается постоянным. Учитывая это, разработаны формулы для характерных условий изменения z (Рис.7). Для условий защиты арматуры в плоских плитах распределение потенциала может быть получено по формуле

$$U = \frac{J_k}{2\pi \gamma z(z+k)} \left\{ z \left[\cos \theta - \frac{z}{r} \cdot \frac{z+k}{z+2k} \right] + \sum_{i=1}^0 z \cos(\theta + \theta_i) \left[\cos(\theta + \theta_i) - \frac{z \cos(\theta + \theta_i)}{r} \cdot \frac{z+k}{z+2k} \right] \right\} \quad (34)$$



Рис. 5 Модель переходного сопротивления "точечный источник тока - защищаемая поверхность"

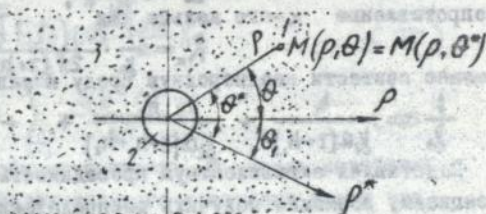


Рис. 6 К расчёту задитного потенциала на арматуре при 2-х точечных анода ; 1 - точечный анод, 2 - арматурный стержень, 3 - бетон

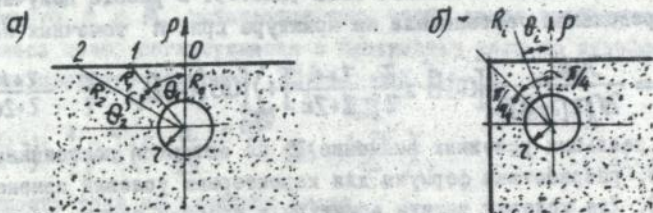


Рис. 7 Схемы для расчёта потенциалов на арматуре при изменяющемся значении ξ
 а - для плоского сечения; б - для углового сечения

Для линейных конструкций при расположении арматуры по углам сечения

$$U = \frac{J_k}{2\pi r(z+k)} \left\{ z \left[\cos \theta - \frac{z}{r} \frac{z+k}{z+2k} \right] + \sum_{i=0}^n z \cos(\theta + \theta_i) \left[\cos(\theta + \theta_i) - \frac{z \cos(\theta + \theta_i)}{r} \frac{z+k}{z+2k} \right] \right\}; \quad (35)$$

$$U = \frac{J_k}{2\pi r(z+k)} \left\{ z \left[\cos \theta - \frac{z}{r} \frac{z+k}{z+2k} \right] + \sum_{i=0}^n z \sin(\theta + \theta_i) \left[\cos(\theta + \theta_i) - \frac{z \sin(\theta + \theta_i)}{r} \frac{z+k}{z+2k} \right] \right\}.$$

В каждом конкретном случае закон изменения Z может быть определен аналитически через геометрические параметры сечения элемента.

Экспериментальными исследованиями доказано, что принятая математическая модель для расчёта электрических полей в бетоне с достаточной точностью описывает моделируемый процесс.

В пятой главе "Разработка методики и устройств для поиска анодных участков на арматуре" получены закономерности, позволяющие найти распределение электродных участков вдоль арматурного стержня, разработаны устройства для измерения необходимых параметров на железобетонных элементах, проведена экспериментальная и производственная проверка метода и устройств.

При преобладающей роли протяжённых макрогальванических пар на железобетонных элементах возникает задача поиска их анодов для электрохимической защиты. В практике коррозионных изысканий имеется целый ряд методов, позволяющих определить с той или иной точностью коррозионное состояние арматуры на участках железобетонных элементов. Разработанные методы основываются, главным образом, на нахождении связи тех или иных физико-химических параметров рассматриваемых систем от коррозионного состояния арматуры.

Наиболее простым считается метод измерения стационарного потенциала на арматуре. Однако он не всегда может служить однозначной характеристикой коррозионного состояния арматуры.

Более современные методы связаны с замерами поляризационных сопротивлений, импеданса, но они требуют сложных устройств и оборудования.

При наработке материала для составления калибровочных диаграмм этот метод может найти широкое практическое применение. Отличается простотой метода определения коррозионного состояния арматуры при помощи различных датчиков. Однако этот метод локален и требует установки заранее датчиков.

Другие методы, (например, использование электромагнитных полей, различных излучателей и т.п.) пока единичны из-за сложного аппаратурного оформления и отсутствия необходимых приборов и устройств.

Анализ методов показывает, что более достоверные сведения о коррозионном состоянии арматуры получают при одновременном замере ряда параметров или комбинации различных методов.

Принимая во внимание то, что имеющиеся простые методы определения анодных участков не всегда дают точные результаты, а более точные методы малодоступны для использования их в цехах и сооружениях, нами разработан метод, основанный на одновременном замере ряда электрических параметров на железобетонных элементах с использованием простых устройств.

Достаточно точное распределение анодных участков может дать изучение распределения потенциалов на арматуре и электросопротивлений защитного слоя бетона железобетонных конструкций. Если принять, что через элемент dS площади поперечного сечения конструкции протекает составляющая тока j_x , то ток гальванопары может быть определен по следующей формуле:

$$I_x = \int j_x \cdot dS. \quad (36)$$

Выразив плотность тока через напряженность электрополя при условии, что проводимость бетона изменяется только в продольном направлении (вдоль оси x) на линейной железобетонной конструкции, а затем, умножив напряженность электрополя с его потенциалом U , получили

$$I_x = \int \frac{dU}{dx} \cdot S.$$

Перейдя к конечным разностям

$$I_x = \frac{S}{kR} \cdot \frac{\Delta U}{\Delta X}. \quad (37)$$

В формулах:

\int — проводимость бетона межэлектродного пространства;

k — коэффициент пропорциональности между сопротивлением межэлектродного пространства и сопротивлением защитного слоя бетона;

S — площадь поперечного сечения линейной железобетонной конструкции;

ΔU — приращение потенциала на участке ΔX ;

ΔX — длина элементарного линейного участка вдоль арматурного стержня;

R — сопротивление бетона защитного слоя.

Связь токов на i -ом и n -ом отрезках конструкции может быть выражена формулой
$$J_i = C \cdot J_n, \quad (38)$$

где $C = a/b$; $a = \Delta U_i / \Delta U_n$; $b = R_i / R_n$.

Приращение тока на i -ом участке может быть определено по формуле:

$$\Delta J_i = \Delta C \cdot J_n, \quad (39)$$

где $\Delta J_i = J_{i+1} - J_{i-1}$; $\Delta C = C_i - C_n$; J_{i+1}, J_{i-1} - токи на участках смежных с i -ым участком.

В точках, где ток стекает из арматуры, приращение тока будет положительным. Если точку N взять в том месте, где $(U_{n+1} - U_n) > 0$, то в ней и $J_n > 0$. Тогда знак ΔJ , судя по вышеприведенной формуле, будет зависеть только от ΔC .

Таким образом функция ΔC будет определять расположение анодных и катодных участков по длине рассматриваемого арматурного стержня в бетоне. Разбив условно конструкцию на равные участки и выполнив в них замеры потенциалов на арматуре и электросопротивлений бетона защитного слоя, возможно аналитически определить значение и знак функции ΔC , а, следовательно, найти анодные участки.

С целью опытной проверки метода проведены замеры стационарных потенциалов и сопротивлений бетона защитного слоя на существующих железобетонных балках. При хранении балки подверглись местному воздействию растворов хлоридов и поэтому представляли интерес для апробации метода. После окончания замеров балки были разрушены и определены места свежих очагов коррозии на продольных арматурных стержнях. Экспериментальная установка и графики распределения анодных участков показаны на рис. 8.

Было установлено, что имеется достаточно хорошее согласование между положением очагов коррозии, которые определяли теоретическими расчётами по предложенной методике и коррозией арматуры непосредственно наблюдаемой. Подтверждена правильность допущения о пропорциональности сопротивления межэлектродного пространства сопротивлению бетона защитного слоя. Наиболее интенсивная коррозия на арматуре наблюдалась в местах максимума положительных значений функции ΔC .

Замеры необходимых для выявления анодных участков параметров проводятся с использованием медносульфатного электрода сравнения. Практика замеров показала, что выпускаемые промышленностью электроды не приспособлены для условий работы по обследованию железобетонных элементов эксплуатируемых зданий и сооружений. Учитывая это нами разработана новая конструкция медносульфатного электрода сравнения. Чтобы повысить эксплуатационные качества динде электрода

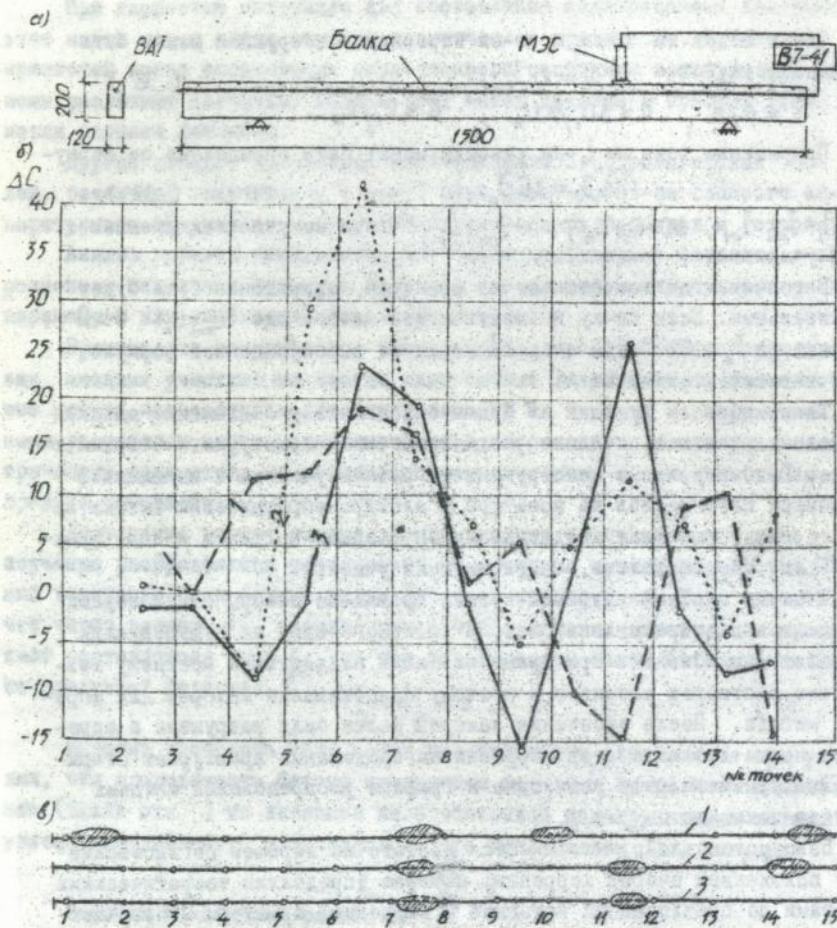


Рис. 8 Экспериментальные исследования распределения анодных участков на арматуре железобетонных балок
 а-схема установки; б-графики распределения функции ΔC вдоль арматурных стержней балок; в-распределение очагов коррозии на арматуре после разрушения балок

выполнено под углом 45° к оси сосуда. Такое решение делает электрод более универсальным. Обеспечивается более однородный контакт электрода как с горизонтальными, так и с вертикальными поверхностями конструкций за счёт одинакового напора через диафрагму раствора.

При апробации метода поиска анодных участков на арматуре конструкций в действующих цехах возникли сложности установки электрода сравнения в удалённых, малодоступных точках. Для проведения измерений в данных условиях нами была разработана методика замеров и специальная измерительная установка (Рис. 9). Основными элементами установки являются спаренные электроды сравнения, закреплённые на телескопической штанге. На штанге также закреплён регистрирующий прибор. Положительный эффект был достигнут за счёт вынесения дна электродов за их пределы.

Переставляя установку из одной пары точек конструкции на другую, получают данные, после введения в ЗВМ которых, строят график распределения анодных участков вдоль арматуры исследуемых железобетонных конструкций.

Вес установки в рабочем положении 2 кг. Минимальный габарит $I \times 0.4$ м. Максимальный габарит $5,4 \times 0.4$ м. Это позволяет оператору легко маневрировать установкой и вести измерения на большей высоте с пола цеха. Одним касанием возможно замерить в двух точках на расстоянии шага контактных дна стационарный потенциал на арматуре конструкции, сопротивление задатного слоя бетона над арматурой, а также сопротивление бетона между точками касания контактных дна. Применение устройства при обследовании конструкций зданий ряда предприятий показало, что разработанный метод и устройство даёт возможность повысить производительность труда и получить достоверные результаты при поиске анодных участков на арматуре железобетонных конструкций.

В шестой главе "Разработка методики проектирования и расчёта систем катодной защиты" изложены рекомендации по разработке и устройству систем катодной защиты на отечественной приборной базе и материалах, приведены необходимые сведения по расчёту систем катодной защиты.

Анализ показывает, что многие элементы систем катодной защиты имеются в отечественной практике или есть материалы для их изготовления. В качестве источников питания катодной защиты арматуры наземных железобетонных конструкций могут быть использованы катодные станции, преобразователи и т.п., выпускаемые промышленностью, с ре-

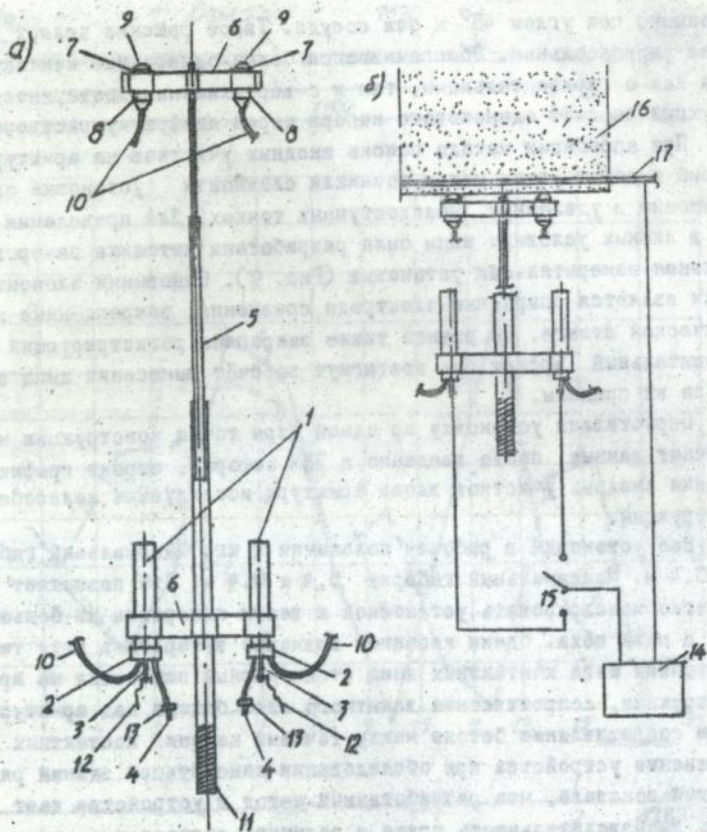


Рис. 9 Устройство для коррозионных обследований железобетонных конструкций а-схема устройства; б-схема подключения
1-цилиндрические сосуды электродов сравнения; 2-крышки электродов сравнения; 3-медные стержни электродов сравнения; 4-дренажные трубки; 5-телескопическая штанга; 6-свинные вилки; 7-контактные днища электродов сравнения; 8-стаканы; 9-контакты; 10-гибкие соединительные шланги; 11-ручка для оператора; 12-выводы к измерительному прибору; 13-затворы; 14-измерительный прибор (В7-41); 15-переключатель; 16-обследуемая конструкция; 17-арматура

гулируемым или фиксируемым выходным напряжением, технические характеристики которых подходят для защиты железобетонных элементов. Нет больших проблем и в использовании выпускаемых протекторных материалов.

Много различных анодных материалов, конструкций анодов уже разработано в отечественной практике для катодной защиты подземных трубопроводов, конструкций в воде и др., которые могут быть использованы при защите арматуры надземных железобетонных элементов.

При выборе того или другого материала для анода, его конструкции необходимо руководствоваться следующими правилами. Аноды должны:

- обеспечивать наиболее равномерное распределение защитного потенциала на арматуре;

- иметь малое сопротивление растеканию;
- стабильно работать на протяжении всего времени;
- минимально растворяться под действием анодного тока;
- быть простыми по устройству, по обслуживанию и экономичными;
- обеспечивать возможность быстрой ликвидации коротких замыканий;
- отличаться универсальностью;
- иметь высокую токоотдачу и малое электросопротивление;
- быть устойчивыми к механическим повреждениям.

Во многих случаях в отечественных конструктивных решениях зданий и сооружений из сборного железобетона обеспечить непрерывность электрической цепи удастся через уже имеющиеся металлические закладные детали в железобетонных элементах. При разрыве электрической цепи вводятся электроперемычки. В случае необходимости регулирования тока, подаваемого на отдельные железобетонные элементы или участки на них, перемычки могут быть регулируемые по электросопротивлению. В отдельных случаях (для исключения перетекания тока с одного железобетонного элемента или участка на другой) устанавливаются вентильные электроперемычки.

Для контроля защиты, подключения питающих установок от арматуры железобетонных элементов предусматриваются изолированные выводы.

Проанализированы возможности обеспечения установленных выше принципов при создании отечественных систем катодной защиты. Обращено внимание на важность поддержания минимального защитного потенциала на арматуре. Следует, однако, иметь в виду, что в некоторых случаях можно использовать неполную катодную защиту, основанную на том, что смещение поляризационного потенциала на $O, I B$ снижает скорость коррозии на 80-90%. Часто определяющую роль в коррозионных

процессах на арматуре играет не общая электрохимическая коррозия, а действие токов протяжённых макрогальванических пар и положительный эффект защиты будет достигнут уже в подавлении токов этих гальванопар.

Обеспечение стабильности работы систем катодной защиты требует дополнительных расходов. Новидимо, разработку и внедрение систем необходимо вести в несколько этапов. Первые устройства должны иметь простые решения, не требующие больших вложений, максимально увязанные с существующей приборной базой, с использованием доступных материалов, существующих технологий при изготовлении элементов катодной защиты.

Принцип обеспечения простоты монтажа, обслуживания для отечественных систем рекомендуется развивать в направлении максимальной увязки их с защищаемыми конструкциями, использования особенностей сборного строительства. Например, применение монтажных щелей для установки анодов, использование закладных деталей для крепления анодов и др.

Особенно важным для отечественных систем катодной защиты становится принцип минимального расходования электроэнергии. Если обеспечение рационального распределения токов, снижение переходных сопротивлений, прерывистая подача электричества требует определённых дополнительных расходов, то значительный эффект в экономии электроэнергии возможно получить выбором условий применения защиты. Например, при высокой поляризуемости защищаемой арматуры, для нейтрализации анодных участков протяжённых гальванопар, при защите от электрокоррозии.

Заслуживает внимания идея снижения расходования электроэнергии за счёт рационального конструирования самого защищаемого элемента.

Принцип унификации на период начала внедрения катодной защиты должен проявиться в возможности использования оборудования, материалов из других отраслей хозяйства.

Анализ полученных выше формул показал, что обеспечить равномерность распределения защитного потенциала по контуру сечения арматурного стержня возможно следующими приемами: установкой дополнительных анодов в местах, где не достигается защитный потенциал на поверхности; применением распределённых на поверхности железобетонных элементов анодов; удалением анода от арматуры и др.

Полученные расчётные формулы при решении задачи защиты для наиболее характерных сечений железобетонных элементов с установкой до-

полнительных анодов представлены в таблице I. На рис. 10 показаны графики распределения защитного потенциала, рассчитанные по выведенным формулам.

Как видно из графиков дополнительные аноды улучшают распределение потенциала по окружности сечения арматурного стержня во всех случаях. Положительным является и то, что характер распределения защитного потенциала соответствует характеру распределения коррозионного тока на арматуре при атмосферной коррозии.

Для расчёта мощности преобразователя или катодной станции выполнена оценка сопротивления внешней цепи системы защиты. Сопротивление внешней цепи определено переходным сопротивлением анод-бетон и поляризационным сопротивлением катода. Переходное сопротивление оценено сопротивлением растекания. Определены направления снижения сопротивления растекания (погружением анода в бетон или специальную смесь - активатор и др.).

Показано, что в качестве активаторов могут быть использованы те же составы, которые нашли применение для улучшения работы анодных заземлителей, протекторов при защите подземных конструкций. Это: коксовая мелочь, сажа и др. Значительно снизить сопротивление растекания позволяет применение рассредоточенных анодов в виде различных токопроводящих покрытий.

При известной расстановке анодов на конструкции, подставив в формулы для расчёта распределения потенциала нормируемое значение сдвигки потенциала защиты, находится необходимый ток на анодах.



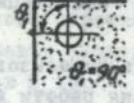
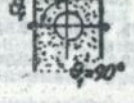




При расчёте протекторной защиты последовательно определяются: переходное сопротивление протектора, сила тока протектора, число протекторов, расстояние между ними, срок их службы.

В заключение главы приводятся основы проектирования защиты в условиях общей и локальной коррозии арматуры, от токов утечки, проектирования совместной защиты нескольких элементов, регулирования режима катодной защиты, размещения контрольно-измерительных пунктов. Описан порядок монтажа устройств защиты и технические требования к отдельным элементам катодной защиты.

В седьмой главе "Опытно-промышленное внедрение разработанных систем катодной защиты" изложены результаты применения разработанных систем катодной защиты в конкретных производственных условиях, приведены описания отдельных предлагаемых систем катодной защиты.

Выдвинутые теоретические положения, подтверждённые экспериментами, обобщение опыта применения катодной защиты для наземных кон-

Расчётные формулы для наиболее характерных сечений сборных железобетонных элементов при катодной защите с установкой дополнительных линейных анодов

Схема	Расчетная формула
	$U = \frac{JKZ}{2\pi r(z+k)} \left\{ \left[\cos\theta - \frac{z}{z+k} \cdot \frac{z+k}{z+2k} \right] + 2 \left[\cos\theta_1 - \frac{z}{z+k} \cdot \frac{z+k}{z+2k} \right] \right\}$
	$U = \frac{JKZ}{2\pi r(z+k)} \left[\cos\theta - \frac{z}{z+k} \cdot \frac{z+k}{z+2k} \right] + \left[\cos\theta_1 - \frac{z}{z+k} \cdot \frac{z+k}{z+2k} \right]$
	$U = \frac{JKZ}{2\pi r(z+k)} \left[\cos\theta - \frac{z}{z+k} \cdot \frac{z+k}{z+2k} \right] + \left[\cos\theta_1 - \frac{z}{z+k} \cdot \frac{z+k}{z+2k} \right]$
	$U = \frac{JKZ}{2\pi r(z+k)} \left\{ \left[\cos\theta - \frac{z}{z+k} \cdot \frac{z+k}{z+2k} \right] + 2 \left[\cos\theta_1 - \frac{z}{z+k} \cdot \frac{z+k}{z+2k} \right] \right\}$
	$U = \frac{JKZ}{2\pi r(z+k)} \left[\cos\theta - \frac{z}{z+k} \cdot \frac{z+k}{z+2k} \right] + \frac{JKZ}{2\pi r(z+k)} \left[\cos\theta_1 - \frac{z}{z+k} \cdot \frac{z+k}{z+2k} \right]$
	$U = \frac{JKZ}{2\pi r(z+k)} \left[\cos\theta - \frac{z}{z+k} \cdot \frac{z+k}{z+2k} \right] + \frac{JKZ}{2\pi r(z+k)} \left[\cos\theta_1 - \frac{z}{z+k} \cdot \frac{z+k}{z+2k} \right]$
	$U = \frac{JKZ}{2\pi r(z+k)} \left\{ \left[\cos\theta - \frac{z}{z+k} \cdot \frac{z+k}{z+2k} \right] + \left[\cos\theta_1 - \frac{z}{z+k} \cdot \frac{z+k}{z+2k} \right] \right\} + \frac{JKZ}{2\pi r(z+k)} \left[\cos\theta_2 - \frac{z}{z+k} \cdot \frac{z+k}{z+2k} \right]$
	$U = \frac{JKZ}{2\pi r(z+k)} \left\{ \left[\cos\theta - \frac{z}{z+k} \cdot \frac{z+k}{z+2k} \right] + 2 \frac{JKZ}{2\pi r(z+k)} \left[\cos\theta_1 - \frac{z}{z+k} \cdot \frac{z+k}{z+2k} \right] \right\}$

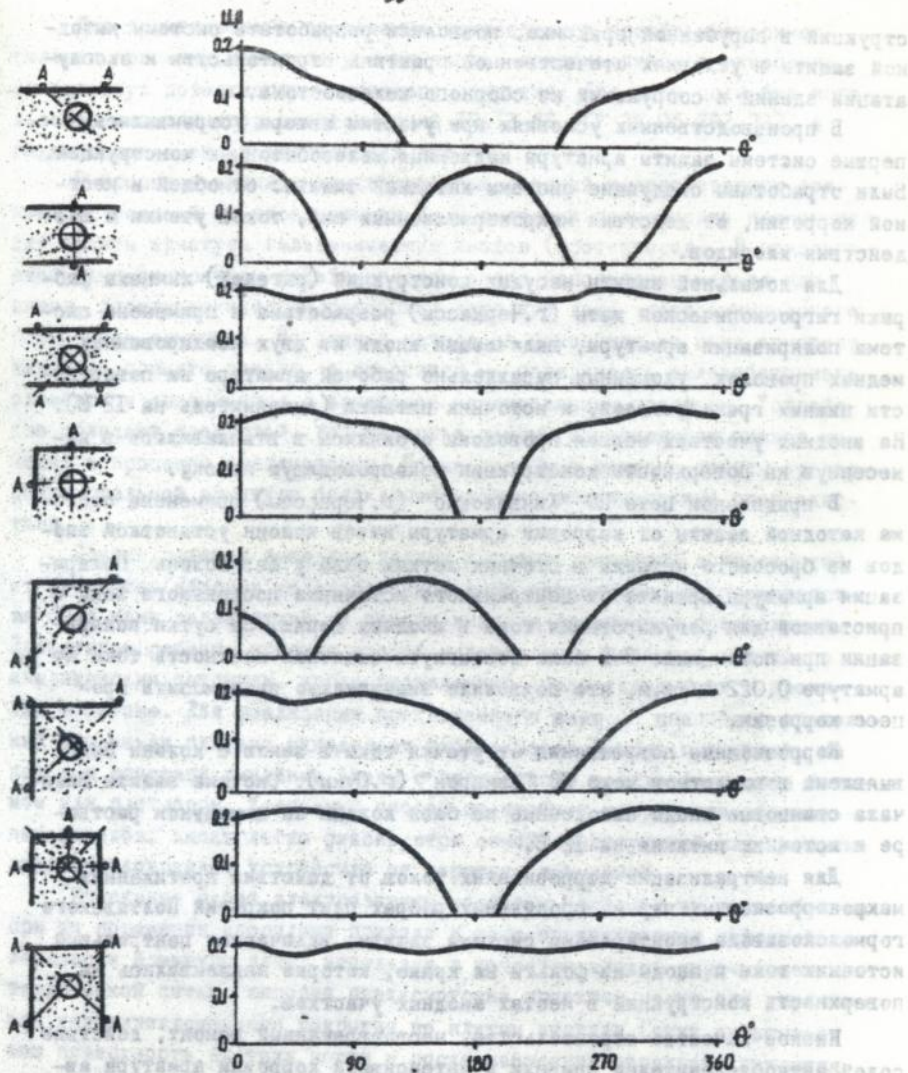


Рис. 10. Графики распределения потенциалов по окружности сечения арматурного стержня для различных железобетонных элементов при различном распределении линейных анодов

$$j = 0.01 \text{ А/м}, \quad \gamma = 4.79 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}, \quad \beta = 11 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2, \quad d_n = 40 \text{ мм}$$

струкций в зарубежной практике, позволили разработать системы катодной защиты в условиях отечественной практики строительства и эксплуатации зданий и сооружений из сборного железобетона.

В производственных условиях при участии автора устраивались первые системы защиты арматуры надземных железобетонных конструкций. Были отработаны следующие системы катодной защиты: от общей и местной коррозии, от действия макрокоррозионных пар, токов утечки и воздействия хлоридов.

Для локальной защиты несущих конструкций (ригелей) химцеха фабрики гигроскопической ваты (г.Черкассы) разработана и применена система поляризации арматуры, включающая аноды из двух изолированных медных проволок, уложенных параллельно рабочей арматуре на поверхности нижних граней ригелей, и источник питания (выпрямитель на I2 В). На анодных участках медная проволока оголяясь в втапливалась в нанесенную на поверхность конструкции токопроводящую краску.

В прядильном цехе ПО "Химволокно" (г.Черкассы) применена система катодной защиты от коррозии арматуры низов колонн установкой анодов из бросового металла в сточных лотках пола у баз колонн. Поляризация арматуры принята от центрального источника постоянного тока с приставкой для регулирования тока в анодных цепях. За сутки поляризации при потенциале 3 В была достигнута защитная плотность тока на арматуре 0.022 А/кв.м, что позволило значительно затормозить процесс коррозии.

Коррозионные повреждения от утечки тока в землю с колонн была выявлена в кислотном цехе ПО "Химпром" (г.Сумы). Система защиты включала свинцовые аноды наложенные на базы колонн на цементном растворе и источник питания на I2 В.

Для нейтрализации коррозионных токов от действия протяженных макрокоррозионных пар на продольных ребрах плит покрытий Полтавского гормолокозавода смонтирована система защиты, включающая центральный источник тока и аноды из фольги на краях, которые наклеивались на поверхность конструкций в местах анодных участков.

Низкое качество строительства, несвоевременный ремонт, действие солей антиобледенителей привели к интенсивной коррозии арматуры автомобильного моста на автодороге Решетилівка-Н.Санжары-Нехворота (Полтавская обл.). В процессе его реконструкции нами разработан проект катодной защиты арматуры железобетонных настилов. В качестве анодов предложено использовать металлические распределительные сетки на настилах, а также токопроводящие покрытия по бетонной поверхности на основе саженаполненной краски.

Для практического применения исследован и прошёл экспериментальную проверку метод получения анода, заключающийся в нанесении на бетонную поверхность цинкового покрытия. Для этой цели был использован металлизатор электрический ЭМ-12-67 (ТУ 26-05-292-72), а также газопламенный распылитель МГИ-4А.

В процессе анализа конструктивных решений железобетонных элементов, условий их эксплуатации была выявлена возможность применения для защиты арматуры гальванических анодов (протекторов). В предлагаемом нами дискретном гальваническом аноде использован металл или сплав, электрохимический потенциал которого выше электрохимического потенциала арматуры. Но данный металл не наносится на саму арматуру, как было принято раньше, а вносится на поверхность железобетонного элемента и связывается с арматурой изолированным проводом. Устройство обладает простотой, возможностью замены износившихся анодов на месте в процессе эксплуатации. Позже подобное решение защиты от коррозии стальной арматуры было запатентовано американскими специалистами.

Другое решение катодной защиты арматуры покрытий и перекрытий из ребристых сборных железобетонных плит отечественного производства было нами разработано на основе анализа зарубежных предложений. Прототипом решения признан способ изготовления катодной защиты по американским патентам, когда проволоочные аноды укладывают в проплахах в бетоне. Для реализации предложенного нами способа в продольные швы между плитами укладывают гибкие изоляционные прокладки, на которые помещают линейные аноды с последующим заполнением швов бетоном или раствором. Указанный способ не требует устройства специальных каналов; аноды легко фиксируются самой конструкцией шва, а прокладки предохраняют устройство от коротких замыканий.

Изыскание путей электрозащиты мостовых настилов из железобетона при их поражении хлоридами привели к идее осуществления катодной поляризации арматуры плит, используя в качестве анодов упрочняющей металлической сетки, которая предусмотрена проектом моста для упрочнения гидроизоляционного покрытия по плитам настила. Сетка охватывает всю поверхность настила моста и после нанесения дорожного покрытия оказывается в толще защитно-механического слоя. Таким образом, в покрытиях настилов равномерно распределённый анод в принципе существует. После проверки коротких замыканий достаточно присоединить источник постоянного тока отрицательным полюсом к арматуре, а положительным - к сетке и защита готова к работе. Данный метод защиты предложен для применения при реконструкции путепровода автодороги Полтава-Александрия (г.Кременчуг).

Исследования опытных систем катодной защиты показали, что катодная защита тем эффективнее, чем раньше она осуществляется. Следовательно, целесообразно выполнить защиту или устроить её отдельные элементы в процессе изготовления сборных конструкций, когда известно, что она будет эксплуатироваться в тяжёлых коррозионных условиях. При заводском изготовлении железобетонных элементов наиболее просто решается вопрос устройства изолированных выводов, которые затем могут быть использованы для присоединения источников питания катодной защиты или протекторов, а также для диагностики коррозионного состояния арматуры в процессе эксплуатации.

Учитывая то, что эффект катодной защиты во многом определяется распределением защитного потенциала на поверхности арматуры, а форма железобетонного элемента часто препятствует этому, пришли к выводу, что улучшить работу катодной защиты возможно и более рациональным конструированием самого катода — защищаемой арматуры. В работе предложены защищённые авторскими свидетельствами арматурные стержни, позволяющие более равномерно распределить на них защитный потенциал или уменьшить расход тока для защиты.

В восьмой главе "Технико-экономическая оценка эффективности электрохимической защиты железобетонных конструкций от коррозии" приведена методика технико-экономической оценки эффективности защиты железобетонных конструкций от коррозии, разработана методика экономического сравнения средств защиты эксплуатируемых железобетонных конструкций, приведен пример расчёта экономической эффективности применения электрохимической защиты железобетонных колонн цеха.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных теоретических и экспериментальных исследований в диссертации разработаны научные и практические основы повышения коррозионной устойчивости арматуры в бетоне катодной поляризацией, что является современным решением актуальной проблемы и имеет важное народнохозяйственное значение.

1. Натурными обследованиями установлено, что во многих случаях условия эксплуатации приводят к локальным поражениям арматуры надземных железобетонных конструкций и, главным образом, в результате действия макрокоррозионных пар. Это затрудняет применение пассивных методов защиты арматуры и выдвигает на первый план электрохимические методы защиты, которые не зависят от действующей среды, могут работать в изменяющихся условиях и не требуют больших затрат.

2. Предложены и исследованы математические модели коррозии арматуры, усложнённой действием макрокоррозионных гальванических пар, которые позволяют увязать основные характеристики надземных железобетонных конструкций с коррозионными процессами на ней: зависимость распределения коррозионных токов от типа конструкции и формы её поперечного сечения, от положения конструкции в здании или сооружении, от профиля и диаметра арматуры, от физико-химических характеристик бетона.

Предложены оценочные критерии взаимодействия арматуры железобетонных конструкций со средой, которые дают возможность оценить петерв рабочих свойств конструкции в процессе коррозии её арматуры.

3. Анализ применения катодной защиты показал большие возможности, заложенные в этом методе, и особенно, при применении на конструкциях, подвергшимся коррозионным поражениям в процессе эксплуатации. Сформулировано шесть принципов создания систем катодной защиты арматуры надземных железобетонных конструкций, выполнение которых позволяет обеспечить их оптимальный синтез. Принципы содержат требования обеспечения минимального защитного потенциала на арматуре, равномерности его распределения, стабильности работы системы, простоты монтажа и обслуживания, минимального расходования электроэнергии и унификации систем. Показано, что выбор систем катодной защиты должен быть осуществлён исходя из особенностей конструктивного решения железобетонного элемента, действующей среды, распределения электродных участков на арматуре.

4. Установлено, что при расчётах электрохимической защиты подземных железобетонных конструкций или конструкций в виде бетонное покрытие не рассматривается как область распространения электрического поля и известные расчетные формулы не могут быть применены при расчёте электрохимической (катодной) защиты надземных железобетонных конструкций.

5. Разработаны и экспериментально проверены математические модели распределения защитных электрических полей в бетоне от единичного линейного анода, группы линейных анодов, распределённых анодов, решения которых позволяет получить простые инженерные формулы для расчёта защитного потенциала на арматуре надземных железобетонных конструкций. Изучены пути оптимизации полей. Показано, что на равномерность распределения потенциала на арматуре оказывает влияние электрические характеристики бетона, электрохимические характеристики арматуры, форма конструкции.

6. Предложена, разработана и исследована новая методика и новые устройства (авт. свид. №1762191, полож. решен. ВНИИГПЗ №5028079/28 от 27.07.92) для поиска анодных участков макрокоррозионных пар на арматуре железобетонных конструкций зданий и сооружений неразрушающим способом в условиях действующих производств. Методика основана на установлении связи между коррозионным состоянием арматуры и физико-химическими параметрами бетона и арматуры в замеряемых местах.

7. Выявлены направления проектных проработок, связанных с созданием и внедрением отечественных систем катодной защиты арматуры надземных железобетонных конструкций. Установлено, что обеспечение необходимого защитного потенциала может быть достигнуто при использовании серийных источников питания, преобразователей, катодных станций, а также анодов из имеющихся материалов.

Получены формулы для расчёта защитных полей на применяемых железобетонных конструкциях при различном расположении анодов, для подбора элементов систем катодной защиты.

8. Показано, что дальнейшее совершенствование систем катодной защиты надземных железобетонных конструкций должно основываться на накоплении опыта их эксплуатации, создании универсальных систем, рациональном конструировании железобетонных элементов с точки зрения возможностей использования катодной защиты.

9. Разработаны и применены в действующих цехах экспериментальные системы катодной защиты приспособленные к отечественным конструкциям, условиям их эксплуатации, имеющейся приборной базе. Предложен новый способ локальной защиты арматуры железобетонных конструкций гальваническими анодами (авт. свид. №694608), который отличается простотой, технологичностью монтажа. Предложены и использованы системы с саженаносными анодными покрытиями, цинковым напылением анодов и др. Даны рекомендации по конструктивным изменениям в железобетонных элементах, позволяющие максимально приспособить их к применению катодной защиты, более равномерно распределить защитный потенциал, получить экономии электроэнергии при их защите (полож. реш ВНИИГПЗ №4871251/33 от 17.09.91; авт. свид. №638698)

10. Разработана методика и проведен расчёт технико-экономического эффекта от применения катодной защиты железобетонных конструкций.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Эффективные методы защиты от коррозии строительных конструкций складов минеральных удобрений /Реферативная информация ЦИНИС, серия IV, вып. 4.-М., 1977.-С. 12-14.

2. К вопросу исследования коррозии складов минеральных удобрений /Проектирование, строительство и реконструкция предприятий в системе "Союзсельхозтехника" : Экспресс-информация, ЦНИИТЭИ, 1977, вып. 4.-С. 19-20.

3. Как повысить долговечность стен складов минеральных удобрений /Проектирование, строительство и реконструкция предприятий в системе "Союзсельхозтехника" : Экспресс-информация, ЦНИИТЭИ, 1977, вып. 5.-С. 12-14.

4. А.с. 694608 СССР, УКИ В 04В, Э 04С 5/00. Устройство для защиты от коррозии арматурных каркасов железобетонных изделий.

5. Пути снижения ручного труда при защите строительных конструкций от коррозии //Повышение эффективности сельскохозяйственного строительства на основе механизации и сокращения затрат ручного труда : Тезисы докладов Республиканской научно-технической конференции.-Полтава, 1985.-С. 73-74.

6. Повышение коррозионной стойкости железобетонных конструкций за счёт поляризации арматуры //"Достижение НТП - строительному производству" : Тезисы докладов областной научно-практической конференции.-Полтава, 1988.-С. 24.

7. Особенности коррозии железобетонных конструкций кислотного цеха.-Полтава, 1989.-Эс.- Деп. в БНИИИС, №9117.

8. Коррозия арматуры периодического профиля //Совершенствование железобетонных конструкций, работающих на сложные виды деформаций и их внедрение в строительную практику : Тезисы докладов Республиканской научно-технической конференции.-Полтава, 1989.-С. 19-20.

9. Электрохимическая защита арматуры надземных железобетонных конструкций //Информационный листок о передовом производственном опыте, №103-89.-Харьковский ЦНТИ.-Харьков, 1989,-2с.

10. Опыт катодной защиты железобетонных колонн на предприятиях химической промышленности //Материалы УШ Всесоюзной научно-практической конференции "Коррозия и защита строительных конструкций производственных зданий и сооружений" -Донецк, 15-17 мая 1990г., ч.П.-С. 65.

11. Коррозионные процессы на саморастворяющемся арматурном стержне периодического профиля //Тезисы докладов У-ой Украинской конференции по электрохимии.-Ужгород: 1990, вып. I,-С. 94(в соавторстве).

12. Кинетика коррозионных процессов на поверхности арматуры // Строительные материалы и конструкции. - 1991. - №1. - С. 35-36.
13. Коррозия арматуры при повреждении защитного слоя бетона // Строительные материалы и конструкции. - 1991. - №2. - С. 28.
14. Защита арматуры железобетонных конструкций в прядильном цехе // Промышленное строительство. - 1991. - №5. - С. 35-36.
15. Катодная защита мостов // Автомобильные дороги. - 1991. - №8. - С. 23.
16. Неразрушающий коррозионный контроль железобетона в производственных условиях // Материалы Всесоюзного семинара-презентации "Защита от коррозии в строительстве". - Челябинск. - 1991. - С. 2.
17. Коррозионная стойкость фундаментов в пробитых скважинах // Эффективные фундаменты, сооружаемые без выемки грунта: Сб. докладов научно-техн. конференции. - Полтава. - 1991. - С. 37-42, (в соавторстве).
18. Особенности коррозии арматуры периодического профиля // Известия вузов. Строительство. - 1992. - №4. - С. 114-115.
19. Определение коррозиоактивных участков на арматуре железобетонных покрытий химцеха // Промышленное строительство. - 1991. - №12. - С. 29.
20. Контроль коррозионного состояния железобетонных конструкций // Промышленное строительство и инженерные сооружения. - 1992. - №3-4. - С. 35.
21. Арматурный профиль повышенной коррозионной устойчивости // Строительные материалы и конструкции. - 1992. - №3-4. - С. 36.
22. Инвариантные решения уравнения эйконала, описывающего некоторые процессы коррозии // Доклады АН Украины. Математика, естествознание, технические науки. - 1992. - №5. - С. 24-27 (в соавторстве).
23. Расчёт защитного потенциала на арматуре линейных железобетонных конструкций // Известия вузов. Строительство. - 1992. - №7-8. - С. 132-135.
24. Катодная защита арматуры железобетонных конструкций // Автомобильные дороги. - 1992. - №9. - С. 13.
25. А.с. 1762191 СССР, МКИ G 01N 17/00. Медносульфатный электрод сравнения, -2с.
26. Метод коррозионного обстеження залізобетонних плит молокозаводу // Будівництво України. - 1993. - №1. - С. 44.

27. А.с. 638698 СССР, МКИ В 04С 3/02. Железобетонная балка.-2с.

28. Арматурный стержень повышенной коррозионной устойчивости // Положительное решение ВНИИГПЗ №487I25I/33 от 17.09.91 на выдачу авторского свидетельства.

29. Медносульфатный электрод сравнения для коррозионного контроля железобетонных конструкций // Положительное решение ВНИИГПЗ №5028079/28 от 27.07.92 на выдачу авторского свидетельства.

30. Коррозионная характеристика линейных железобетонных конструкций, Сб.: Строительные конструкции, вып. 45-46, Киев, НИИСК, 1993.-С.37 (в соавторстве).

31. Склады минеральных добив.-К.: Урожай, 1987.-80с. (в соавторстве).

32. Сельскохозяйственные здания и сооружения, -М.: "Агропромиздат", 1985.-480с. (в соавторстве).

33. Конструкции сельскохозяйственных зданий.-Кишинёв: "Штиинца", 1987.-137с. (в соавторстве).

34. Трубобетонные арки повышенной коррозионной устойчивости // Будівництво України, №5-6, 1993,-С.22 (в соавторстве).

35. Особенности электрохимической коррозии арматуры периодического профиля // Бетон и железобетон.-1993.- №7.-С.29-30.

Гонимов

457849

AB 30.457