

УДК 624.21.055:693.5

Обоснование возможности и перспектив применения технологии электрохимической защиты от коррозии арматуры, расположенной в теле опор мостовых сооружений

А. А. Антонюк¹, А. А. Белый^{2,3}, Ш. Ш. Кадирова², А. А. Махонько⁴

¹ООО «СИНЕРЭФ-центр», Российская Федерация, 194044, Санкт-Петербург, ул. Смоляčkова, 12, к. 2, лит. А, оф. 403

²Ташкентский государственный транспортный университет, Республика Узбекистан, Ташкент, Мирабадский район, улица Темирийолчилар, 1

³ООО «К2 Инжиниринг», Российская Федерация, 123290, Москва, Шелепихинское шоссе, 11, к. 1

⁴ООО «Оператор скоростных автомагистралей — Север», Россия, г. Санкт-Петербург, 191186, пер. Волынский, д. 3А, лит. А

Для цитирования: Антонюк А. А., Белый А. А., Кадирова Ш. Ш., Махонько А. А. Обоснование возможности и перспектив применения технологии электрохимической защиты от коррозии арматуры, расположенной в теле опор мостовых сооружений // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 4. — С. 1073–1084. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-1073-1084

Аннотация

Цель: Проанализировать технические аспекты, оценить эффективность и экономическую целесообразность применения электрохимической защиты (ЭХЗ) от коррозии для продления срока службы и повышения надежности железобетонных опор мостовых сооружений в условиях хлоридной агрессии. **Метод:** Анализ научных источников (базы Scopus, Web of Science и РИНЦ), нормативно-технической документации (стандарты ISO, отечественные своды правил) и результатов натурных обследований. Применяются математическое моделирование для оценки зависимости скорости коррозии от концентрации хлоридов и плотности защитного тока и метод анализа жизненного цикла (LCCA) для сравнения стратегий содержания объектов с использованием специализированного ПО. Проведены натурные замеры содержания хлор-ионов и характеристик блуждающих токов. **Результаты:** Результаты исследования демонстрируют экспоненциальный рост скорости коррозии при концентрации хлоридов свыше 0,4 % (с 2,43 до 177,01 мкм/год) и возможность подавления коррозии на 99 % при плотности тока 10–15 мА/м². Системы ЭХЗ с внешним источником тока продлевают срок службы опор в 45 раз при начальных инвестициях около 450 у. е./м², снижая NPV затрат до –355 тыс. у. е. (против –510 тыс. у. е. при традиционных ремонтах). Выявлены оптимальные диапазоны плотности катодного тока (5–15 мА/м²) для эффективного подавления коррозии. **Практическая значимость:** Возможность использования ЭХЗ как элемента стратегии управления жизненным циклом инфраструктуры. Технология обеспечивает экономию средств (в 1,5–2,5 раза по сравнению с традиционными подходами), повышает безопасность эксплуатации мостов и способствует рациональному расходованию средств на содержание транспортной сети.

Ключевые слова: Электрохимическая защита, коррозия арматуры, железобетонные опоры, хлоридная агрессия, катодная поляризация.

Введение

Железобетонные опоры мостов — ключевые элементы транспортной инфраструктуры, обеспечивающие ее надежность и безопасность. В процессе эксплуатации они подвергаются воздействию агрессивных факторов: перепадов температуры и влажности, карбонизации бетона, а главное — хлоридной агрессии от реагентов и солевых туманов [1–11].

Проникая в бетон, хлориды разрушают защитную оксидную пленку арматуры, вызывая электрохимическую коррозию (рис. 1). Образующиеся продукты коррозии, значительно превышающие объем металла, создают внутреннее давление. Это приводит к растрескиванию бетона, оголению арматуры и снижению несущей способности конструкции.

Традиционные методы ремонта (удаление и замена поврежденного бетона) малоэффективны, так как не устраняют причину проблемы — хлориды и электрохимические реакции в конструкции.

Поэтому необходимы технологии, способные подавлять коррозионный процесс. Одной из перспективных методик является электрохимическая защита (ЭХЗ), в частности катодная поляризация арматуры. Метод основан на смещении электро-

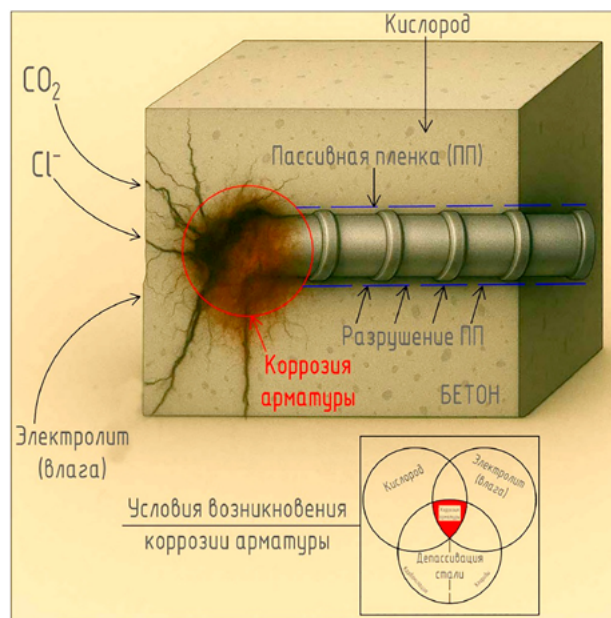


Рис. 1. Условия возникновения коррозии арматуры (автор: А. А. Антонюк)

химического потенциала арматуры в отрицательную сторону, что снижает скорость ее растворения (рис. 2). Это достигается созданием внешнего электрического поля, где арматура становится катодом, а установленный анод — анодом [12–17].

Анализ нормативно-технической документации (EN 1504-2, EN 1504-7, ГОСТ 31384—2017, СП 28.13330.2017, ОДМ 218.4.002—2009) пока-

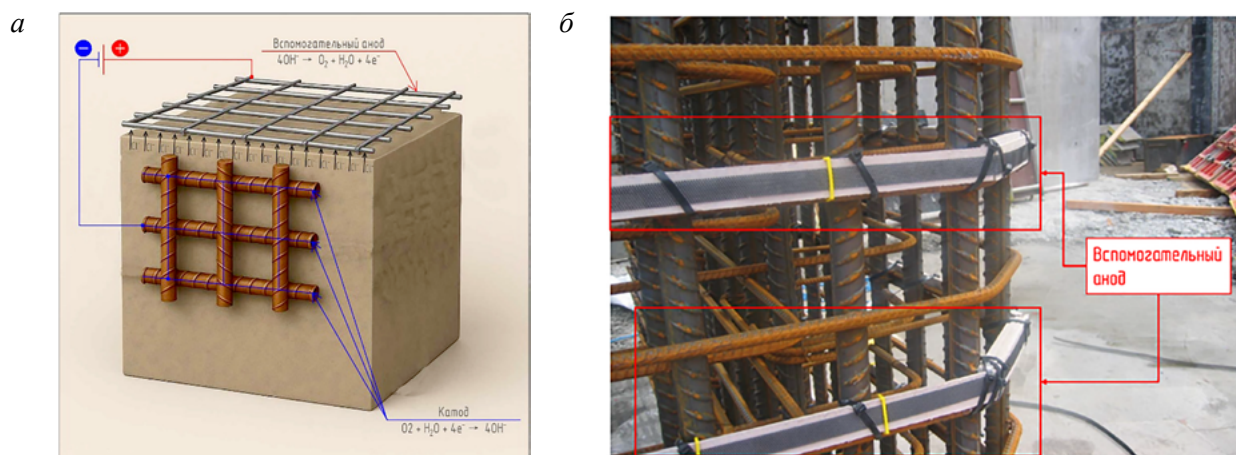


Рис. 2. Катодная защита арматуры от коррозии (автор: А. А. Антонюк):
а — схема работы катодной защиты; б — пример устройства катодной защиты

зывает успешное применение электрохимической защиты (ЭХЗ) для трубопроводов, морских сооружений и резервуаров. Однако для железобетонных опор мостов прямые указания по использованию ЭХЗ отсутствуют, что замедляет внедрение метода в транспортной отрасли.

Статья посвящена обоснованию применения ЭХЗ для защиты мостовых опор от хлоридной агрессии. Цель работы — анализ технических и экономических аспектов внедрения систем ЭХЗ как элемента стратегии управления транспортной инфраструктурой.

Материалы и методы исследования

Исследование основано на комплексном подходе, включающем анализ научных данных, нормативно-технической документации и результатов обследований. Информационная база включает публикации из Scopus, Web of Science и РИНЦ (2005–2025 гг.) по темам электрохимической защиты бетона, коррозии железобетона и катодной поляризации арматуры.

Проанализированы международные стандарты (ISO 12696:2016) и отечественные нормы по защите конструкций от коррозии. Изучен опыт применения ЭХЗ в транспортной инфраструктуре Северной Америки и Европы. Для оценки процессов использован метод математического моде-

лирования, позволяющий прогнозировать эффективность защитных мероприятий.

Аналитическая часть включает создание и проверку моделей, описывающих связь между концентрацией хлоридов в бетоне, скоростью коррозии, параметрами ЭХЗ и увеличением ресурса конструкции.

Для оценки экономической эффективности применен метод анализа жизненного цикла (LCCA), позволяющий сравнить стратегии содержания объекта: отсутствие защиты, традиционные ремонты и ЭХЗ через показатель чистой стоимости (NPV).

Исходные данные для расчетов включали актуальные цены на материалы, оборудование ЭХЗ и работы (третий квартал 2025 г.). Математическая обработка с помощью специализированного ПО дала количественную оценку техническим и экономическим перспективам технологии [18–30].

В разных климатических зонах влага серьезно влияет на бетонные конструкции. Даже при качественном цементе и правильном составе бетона длительный контакт с водой ускоряет образование трещин и проникновение агрессивных сред внутрь материала. Это приводит к накоплению хлоридов в бетоне, которые при наличии тока ускоряют разрушение арматуры [31].



Рис. 3. Объект исследования (автор: А. А. Антонюк)

Для проверки гипотезы о возможном агрессивном электрохимическом воздействии на бетонные элементы инфраструктуры были проведены натурные замеры содержания хлор-ионов и характеристик блуждающих токов на опорах № 12, 10 и 8-3 путепровода на улице Бабура в направлении Ташкентского международного аэропорта имени Ислама Каримова. Объект находится в сложных природно-климатических, техногенных и антропогенных условиях [32].

Концентрацию хлоридов определяли лабораторным анализом проб бетона. Характеристики блуждающих токов измеряли полевым методом с помощью набора «Блуждающие токи» (ООО «КВАЗАР», Уфа) и стальных электродов, входящих в комплектацию набора.

Замеры в контрольных точках (по 4 сечения на опору, всего более 100 измерений) показали наличие блуждающего тока с напряжением 0,008–0,35 В. Лабораторные исследования зафиксировали концентрацию хлоридов в бетоне на уровне 0,04 %.

По ГОСТ 5382—2019 и СП 28.13330.2012 такое сочетание допустимой концентрации хлоридов с высокими значениями блуждающих токов создает агрессивную среду, провоцирующую электрохимическую коррозию железобетона.

Сочетание влаги и других агрессивных факторов значительно сокращает срок службы бетона, вызывает коррозию арматуры и деформацию конструкций. При избыточном увлажнении возрастает риск растрескивания швов и выхода из строя несущих систем, особенно в регионах с перепадами температур. Промедление с ремонтом приводит к более сложным и дорогостоящим работам. Исследование механизмов проникновения влаги и методов защиты актуально для повышения надежности строительных объектов и предотвращения аварий.

Традиционные методы защиты от влаги (оклеочная, обмазочная гидроизоляция, восстановление защитного слоя) ограничены по времени и стоимости. Ремонт длится от нескольких дней



Рис. 4. Натурный поиск и измерения характеристик блуждающего тока (автор: А. А. Белый):
а, б — набор «Блуждающие токи»; в, г — процесс натурных измерений

до недель, а цена зависит от технологии и площади повреждений. Комбинированные решения повышают эффективность, но увеличивают затраты. При реконструкции сложных сооружений стоимость растет из-за труднодоступности отдельных конструктивных слоев. Планирование бюджета необходимо на всех этапах жизненного цикла объекта. Исследование процессов разрушения бетона и совершенствование методов контроля влаги помогают снизить расходы.

Результаты и обсуждение

Ключевая проблема деградации железобетонных опор — нелинейное развитие хлоридной коррозии. До достижения критической концентрации хлоридов коррозия идет медленно, но после депассивации скорость разрушения резко возрастает. Традиционные методы восстановления защитного слоя лишь временно изолируют арматуру, не останавливая электрохимические реакции в бетоне с высоким содержанием хлоридов.

Для оценки потенциала ЭХЗ нужно сравнить скорость коррозии незащищенной конструкции с показателями при работе системы. Первый шаг — установить зависимость скорости коррозии от концентрации хлорид-ионов. На основе исследований создана модель для наиболее распространенного бетона, используемого при строительстве опор мостов (табл. 1).

Таблица 1. Зависимость скорости коррозии арматуры от концентрации хлорид-ионов в поровой жидкости бетона

Концентрация хлорид-ионов, % от массы цемента	Плотность тока коррозии, мкА/см ²	Скорость коррозии, мкм/год
0,20	0,08	0,92
0,40	0,21	2,43
0,80	1,15	13,28
1,20	3,44	39,76
1,60	7,89	91,21
2,00	15,31	177,01

Анализ табл. 1 демонстрирует взрывной рост коррозии при концентрации хлоридов 0,4–0,6 % от массы цемента. При удвоении концентрации с 0,4 % до 0,8 % скорость коррозии возрастает в 5,4 раза (с 2,43 до 13,28 мкм/год), а при 1,6 % — в 37,5 раза. Задержка с защитой приводит к серьезным повреждениям.

При скорости коррозии 0,091 мм/год арматурный стержень диаметром 16 мм теряет 10 % своего сечения (как следствие падает несущая способность) за 9–10 лет. Это подтверждает необходимость применения технологий для снижения скорости коррозии в зараженных хлоридами конструкциях.

Данные табл. 2 показывают прямую зависимость электрохимического эффекта от плотности защитного тока. При 2,55 мА/м² достигается смещение потенциала на 92,3 мВ, что снижает коррозию на 85,7 %. Удвоение плотности тока до 5,10 мА/м² дает смещение 151,8 мВ и снижает коррозию до 6 % от исходной. Наблюдается эффект насыщения: при увеличении тока с 15,30 до 20,40 мА/м² прирост защиты минимален (0,2 %).

Это наблюдение имеет важное практическое значение: оно указывает на существование оптимального диапазона плотности тока — 5–15 мА/м², обеспечивающего подавление коррозии более чем на 99 % при умеренных энергозатратах. Увели-

Таблица 2. Эффективность смещения потенциала арматуры в зависимости от плотности катодного тока

Плотность защитного катодного тока, мА/м ²	Смещение потенциала (относительно исходного), мВ	Степень подавления коррозии, %
2,55	–92,3	85,7
5,10	–151,8	94,2
7,65	–189,4	97,8
10,20	–218,6	99,1
15,30	–255,1	99,7
20,40	–280,9	99,9

чение тока нецелесообразно из-за экономических факторов и риска побочных эффектов, таких как наводороживание арматуры или щелочная деградация бетона. Система ЭХЗ должна поддерживать контролируемую подачу тока в этом диапазоне.

Данные табл. 3 показывают, что системы ЭХЗ с внешним источником тока и распределенным анодом (например, титановой сеткой) обеспечивают максимальное продление срока службы в 45,15 раза. Эффективность достигается за счет гибкого регулирования и равномерного распределения тока. При высоких начальных затратах (450,25 у. е./м²) система имеет минимальную стоимость одного года продления срока службы — 2,26 у. е./м².

Гальванические системы проще в монтаже и не требуют внешнего питания, но имеют низкую нерегулируемую плотность тока. Система с дискретными анодами продлевает срок службы в 7 раз, что меньше, чем у систем с внешним источником. При этом стоимость года продления срока службы сооружения у гальванических систем почти вдвое выше. Для мостовых опор стратегически оправдан выбор систем с внешним источником тока, несмотря на их сложность.

Экономический анализ по данным из табл. 4 подтверждает эффективность превентивного подхода. «Нулевой вариант» с ремонтом только при авариях — самый затратный в долгосрочной перспективе (–758,21 тыс. у. е.) из-за дорогостоящего

Таблица 3. Прогнозируемое увеличение срока службы опоры при использовании различных систем ЭХЗ (для начальной скорости коррозии 40 мкм/год)

Тип системы ЭХЗ	Средняя плотность тока, мА/м ²	Начальные инвестиции, у. е./м ²	Коэффициент продления срока службы	Стоимость года продленной жизни, у. е./м ²
Гальванические аноды (дискретные)	2,75	185,50	6,97	4,45
Гальванические аноды (сплошное покрытие)	4,21	290,70	12,33	4,11
Система с внешним источником тока (титановая сетка)	10,50	450,25	45,15	2,26
Система с внешним источником тока (токопроводящее покрытие)	8,15	380,90	28,62	2,39

восстановления на поздних стадиях разрушения. Стратегия плановых ремонтов лучше, но все равно требует значительных затрат (–510,66 тыс. у. е.) из-за периодической замены бетона.

Стратегия с гальванической ЭХЗ наиболее экономична (NPV –288,43 тыс. у. е.). Система с внешним источником тока имеет больший NPV (–355,19 тыс. у. е.) из-за высоких первоначальных затрат, но обладает лучшей технической эффективностью. Выбор между системами зависит от специфики объекта и условий эксплуатации. Обе

Таблица 4. Сравнительный экономический анализ стратегий содержания железобетонной опоры на горизонте 50 лет (приведенная чистая стоимость затрат, NPV, тыс. у. е.)

Стратегия содержания	Начальные инвестиции	Затраты на ремонты	Затраты на мониторинг и ЭХЗ	NPV затрат (ставка дисконтирования 5 %)
«Нулевой вариант» (только аварийный ремонт)	0	1850,75	0	–758,21
Традиционные ремонты (каждые 10–12 лет)	0	980,50	50,15	–510,66
Установка системы ЭХЗ (гальванической)	95,30	150,20	115,80	–288,43
Установка системы ЭХЗ (внешний источник)	220,10	55,60	180,45	–355,19

стратегии ЭХЗ на 50-летнем горизонте планирования в 1,5–2,5 раза выгоднее традиционных методов.

Анализ данных показывает эффективность электрохимической защиты (ЭХЗ) для борьбы с коррозией. Экспоненциальный рост коррозии при увеличении хлоридов (см. табл. 1) требует активных методов противодействия. ЭХЗ снижает скорость коррозии на 99 % через смещение потенциала арматуры (см. табл. 2).

Техническая эффективность (см. табл. 3) связана с возможностью систем поддерживать оптимальную плотность тока 8–11 мА/м². Это увеличивает ресурс конструкции в десятки раз, переводя ее в состояние стабилизации.

Экономическое обоснование (см. табл. 4) подтверждает окупаемость высоких начальных инвестиций за счет сокращения затрат на ремонты. Показатель NPV демонстрирует выгодность вложений в ЭХЗ в течение жизненного цикла объекта.

В заключение отметим: ЭХЗ — системное решение, технически обоснованное и экономически целесообразное. Технология позволяет выйти из цикла «разрушение — ремонт», обеспечивая надежную защиту конструкций даже в агрессивных условиях. Это ключевой фактор развития транспортной инфраструктуры и рационального использования ресурсов.

Выводы

Технология электрохимической защиты (ЭХЗ) — эффективный метод борьбы с коррозией арматуры в мостовых опорах. В отличие от традиционных методов, катодная поляризация воздействует на причину разрушения, снижая скорость коррозии на 99 %. Системы ЭХЗ с внешним источником тока увеличивают срок службы конструкций в 40–50 раз.

ЭХЗ следует рассматривать как ключевой элемент стратегии управления инфраструктурой, а не просто метод ремонта. Экономический

анализ показывает, что, несмотря на высокие первоначальные затраты, применение ЭХЗ наиболее выгодно на 50-летнем горизонте. Экономия достигается за счет исключения дорогостоящих капитальных ремонтов.

Внедрение ЭХЗ повышает безопасность мостов, сокращает потери от перекрытия движения и оптимизирует расходы на содержание транспортной сети. Широкое применение ЭХЗ — технически и экономически обоснованный шаг к созданию устойчивой инфраструктуры.

Список источников

1. Сурнин Д. А. Использование цинка для антикоррозионной защиты мостов / Д. А. Сурнин // Техническое регулирование в транспортном строительстве. — 2022. — № 2 (53). — С. 60–66.
2. Матюнин Д. Ю. Применение протекторных сплавов для защиты от коррозии морских объектов / Д. Ю. Матюнин, С. А. Казьмин, А. Б. Босов, А. В. Лобанов // Гидротехника. — 2024. — № 1(74). — С. 2–9.
3. Бурков А. К. Комплексные решения электрохимической защиты от коррозии — оборудование и аспекты проектирования / А. К. Бурков, И. И. Попов // Гидротехника. — 2025. — № 2. — С. 69–71.
4. Şirinova A. Y. Metal konstruksiyaların korrozıyadan mühafızasında elektrokimyəvi katod mühafizə qurğuları / A. Y. Şirinova // Elmi xəbərlər. Təbiət və Texniki Elmlər Bölməsi. — 2024. — Vol. 24. — Iss. 3. — Pp. 89–94.
5. Каверинский В. С. Новые методы защиты от коррозии / В. С. Каверинский, Д. В. Каверинский // Лакокрасочные материалы и их применение. — 2020. — № 5. — С. 10–14.
6. Ануфриев Н. Г. Исследование коррозионного поведения алюминия 1980T1 в морской воде и буровом растворе электрохимическими методами / Н. Г. Ануфриев, Ю. А. Кузенков // Практика противокоррозионной защиты. — 2022. — Т. 27. — № 3. — С. 7–30.
7. Заварзин С. В. Высокотемпературная солевая коррозия и защита материалов газотурбинных двигателей (обзор) / С. В. Заварзин, М. С. Оглодков, Д. В. Чесноков,

- И. А. Козлов // Труды ВИАМ. — 2022. — № 3(109). — С. 121–134.
8. Гарашко В. В. Антикоррозионная защита шпунтовых ограждений: технологии, материалы и перспективы / В. В. Гарашко // Молодой исследователь Дона. — 2025. — Т. 10. — № 3(54). — С. 17–21.
9. Бузинер Ю. Л. Антикоррозионное покрытие Ecomast для защиты ГТС в различных условиях эксплуатации / Ю. Л. Бузинер, Н. Н. Шамаков // Гидротехника. — 2024. — № 4(77). — С. 74–75.
10. Михеева О. В. Принципы антикоррозионной защиты трубопроводов / О. В. Михеева, Е. Н. Миркина, В. С. Мавзовин // Экономика строительства. — 2025. — № 1. — С. 356–359.
11. Рева Ю. В. Электрохимическая протекторная защита активных частей электрических машин открытого исполнения для судов ледового класса / Ю. В. Рева // Проблемы управления рисками в техносфере. — 2022. — № 4(64). — С. 104–110.
12. Захарова П. И. Новый перспективный коррозионно-стойкий материал с повышенным ресурсом работы для предупреждения ситуаций техногенного характера / П. И. Захарова, А. В. Хорин // Молодежь и наука. — 2023. — № 9.
13. Пичугова Л. Н. Защита от коррозии на АЭС / Л. Н. Пичугова // Энергетические установки и технологии. — 2023. — Т. 9. — № 4. — С. 74–83.
14. Бочаров В. А. Цинкирование — высокоэффективная защита от коррозии / В. А. Бочаров // Гидротехника. — 2024. — № 1(74). — С. 62–64.
15. Ревин П. О. Исследование долговечности антикоррозионных покрытий для защиты причальных сооружений / П. О. Ревин, А. В. Макаренко // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. — 2022. — Т. 12. — № 5. — С. 470–479.
16. Овчинникова Т. А. Коррозия и антикоррозионная защита железобетонных мостовых конструкций / Т. А. Овчинникова, А. Н. Маринин, И. Г. Овчинников // Интернет-журнал «Науковедение». — 2014. — № 5(24). — № 06KO514.
17. Мигунов В. Н. Экспериментально-теоретическое моделирование армированных конструкций в условиях коррозии: монография / В. Н. Мигунов, И. И. Овчинников, И. Г. Овчинников. — Пенза: ПГУАС, 2014. — 294 с.
18. Степанова В. Ф. Катодная электрохимическая защита арматуры от коррозии в железобетонных конструкциях / В. Ф. Степанова, Н. К. Розенталь, Н. А. Моисеева // Промышленное и гражданское строительство. — 2023. — № 12. — С. 46–50.
19. Dang V. Q. Effects of chloride ions on the durability and mechanical properties of sea sand concrete incorporating supplementary cementitious materials under an accelerated carbonation condition / V. Q. Dang, Y. Ogawa, P. T. Bui, K. Kawai // Construct. Build. Mater. — 2021. — Vol. 274. — P. 122016. — DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.122016.
20. Шалый Е. Е. Долговечность морских сооружений при комбинированной коррозии железобетона / Е. Е. Шалый, С. Н. Леонович, Л. В. Ким // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Материалы. Конструкции. Технологии. — 2018. — № 1(5). — С. 65–72.
21. Леонович С. Н. Долговечность бетона при хлоридной агрессии: монография / С. Н. Леонович, А. В. Степанова, В. Г. Цуприк, Л. В. Ким и др.; Инженерная школа ДВФУ. — Владивосток: Дальневост. федерал. ун-т, 2020. — 90 с.
22. Карпенко Н. И. О современных методах обеспечения долговечности железобетонных конструкций / Н. И. Карпенко, В. Н. Ярмаковский, В. Т. Ерофеев // Academia. Архитектура и строительство. — 2015. — № 1. — С. 93–102.
23. Прогнозирование долговечности железобетонных конструкций при комбинированном воздействии карбонизации и хлоридной агрессии и их восстановление / С. Н. Леонович и др.; под общ. ред. С. Н. Леоновича. — Минск: БНТУ, 2021. — 353 с.
24. Leonovich S. N. Reinforced Concrete under the Action of Carbonization and Chloride Aggression: a Probabilistic Model for Service Life Prediction / S. N. Leonovich, E. E. Shalyi, L. V. Kim // Science and Technique. — 2019. — Vol. 18. — Iss. 4. — Pp. 284–291.

25. Шалый Е. Е. Совместное действие карбонизации и хлоридной агрессии на конструкционный бетон: вероятностная модель / Е. Е. Шалый и др. // Вестник гражданских инженеров. — 2018. — Т. 68. — № 3. — С. 123–131.
26. Duan Y. Corrosion prevention of steel bars in concrete using amine and epoxy compounds / Y. Duan, J. Y. Wang, L. Wang // Construction and Building Materials. — 2018. — Vol. 170. — Pp. 692–700.
27. Liu Y. Corrosion inhibition of reinforcing steel in concrete by plant exudates / Y. Liu, Y. Wang, W. Li // Materials and Corrosion. — 2022. — Vol. 73. — Iss. 6. — Pp. 1536–1544.
28. Li Y. Corrosion inhibition of Graphene oxide for steel in concrete / Y. Li, X. Zou, F. Zhao, L. Ma // Corrosion Science. — 2019. — Vol. 153. — Pp. 240–249.
29. Afrasiyabi M. Corrosion of steel in concrete: A review / M. Afrasiyabi, A. A. Ramezaniapour, M. Ghanbari // Construction and Building Materials. — 2017. — Vol. 141. — Pp. 835–851. — DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.02.186.
30. Daniyal M. Corrosion assessment and control techniques for reinforced concrete structures: a review / M. Daniyal, S. Akhtar // Journal of Building Pathology and Rehabilitation. — 2020. — Vol. 5. — P. 1. — DOI: 10.1007/s41024-019-0067-3.
31. Geiker M. R. Experimental support for new electro active repair method for reinforced concrete / M. R. Geiker, R. B. Polder // Material Corrosion. — 2016. — Vol. 67. — Pp. 600–606.
32. Белый А. А. Мониторинг инженерных конструкций путепровода по улице Бабура к Ташкентскому международному аэропорту имени Ислама Каримова / А. А. Белый, У. З. Шермухамедов, М. М. Собирова, Ш. Ш. Кадилова и др. // Путевой Навигатор. — 2025. — № 64(90). — С. 46–55.

Дата поступления: 12.09.2025

Решение о публикации: 23.10.2025

Контактная информация:

АНТОНЮК Анатолий Анатольевич — инженер-исследователь, инженер; aaa.12.03.1992@mail.ru

БЕЛЫЙ Андрей Анатольевич — д-р техн. наук, проф. кафедры «Мосты и тоннели»²; технический директор³; академик Международной академии транспорта, академик Российской академии транспорта; andbeliy@mail.ru

КАДИРОВА Шарофат Шавкатовна — старший преподаватель кафедры «Мосты и тоннели»; irana_scorpion@mail.ru

МАХОНЬКО Андрей Андреевич — канд. техн. наук, начальник дорожно-эксплуатационной службы; Makhonkoaa@mail.ru

Feasibility and Prospects of Applying Electrolytic Protection Against Corrosion of Reinforced Concrete Bridge Supports

A. A. Antonuk¹, A. A. Belyi^{2, 3}, Sh. Sh. Kadirova², A. A. Makhonko⁴

¹SINEREF-center LLC, 12, bld. 2, lit. A, office 403, Smolyachkova str., Saint Petersburg, 194044, Russia

²Tashkent State Transport University, 1, Temiryulchilar str., Mirabad District, Tashkent, Republic of Uzbekistan

³K2 Engineering LLC, 11, bld. 1, Shelepihenskoe shosse, Moscow, 123290, Russian Federation

⁴Highway Operator Nord LLC, 3A, lit. A, Volynsky per., Saint Petersburg, 191186, Russian Federation

For citation: Antonuk A. A., Belyi A. A., Kadirova Sh. Sh., Makhonko A. A. Feasibility and Prospects of Applying Electrolytic Protection Against Corrosion of Reinforced Concrete Bridge Supports // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 4, pp. 1073–1084. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-1073-1084

Summary

Purpose: To analyze the engineering aspects, assess the effectiveness, and evaluate economic feasibility of implementing electrolytic protection (ELP) to mitigate corrosion, thereby prolong the service life and enhance the reliability of reinforced concrete bridge support structures subjected to chloride aggression. **Methods:** The research relies on a comprehensive review of scientific literature from databases such as Scopus, Web of Science, and RSCI, alongside with an analysis of regulatory and technical documents including ISO standards and national codes of practice, as well as results from field surveys. Mathematical modelling was utilized to determine the relationship between the corrosion rate, chloride concentration, and protective current density. Life Cycle Cost Analysis (LCCA) was conducted using specialized software to compare maintenance strategies. Field measurements of chloride ion content and stray current characteristics were performed. **Results:** The research illustrates an exponential increase in the corrosion rate at chloride concentrations above 0.4%, escalating from 2.43 to 177.01 $\mu\text{m}/\text{year}$. A corrosion reduction of up to 99% has been achieved at the current density of 10–15 mA/m^2 . ELP systems, which use an external current source, can prolong the service life of supports by a factor of 45, with an initial investment of approximately 450 USD/ m^2 . The Net Present Value (NPV) of costs decreases to USD 355 thousand, in contrast to USD 510 thousand allocated for conventional repairs. The optimal range for cathodic current density necessary for effective corrosion suppression has been determined to be between 5–15 mA/m^2 . **Practical significance:** The potential for integrating ELP into an infrastructure lifecycle management strategy has been demonstrated. This technology not only offers significant cost savings (1.5–2.5 times less than traditional methods) but also enhances bridge operational safety and facilitates a more efficient allocation of resources for the maintenance of transportation networks.

Keywords: Electrolytic protection (ELP), reinforcement corrosion, reinforced concrete supports, chloride aggression, cathodic polarization.

References

1. Surnin D. A. Ispol'zovanie tsinka dlya antikorroziionnoy zashchity mostov [The use of zinc for anticorrosion protection of bridges]. *Tekhnicheskoe regulirovanie v transportnom stroitel'stve* [Technical regulation in transport construction]. 2022, Iss. 2 (53), pp. 60–66. (In Russian)

2. Matyunin D. Yu., Kaz'min S. A., Bosov A. B., Lobanov A. V. Primenenie protektrornykh splavov dlya zashchity ot korrozii morskikh ob'ektov [Application of

sacrificial alloys for corrosion protection of marine structures]. *Gidrotekhnika* [Hydraulic Engineering]. 2024, Iss. 1(74), pp. 2–9. (In Russian)

3. Burkov A. K., Popov I. I. Kompleksnye resheniya elektrokhimicheskoy zashchity ot korrozii — oborudovanie i aspekty proektirovaniya [Integrated solutions for electrochemical corrosion protection — equipment and design aspects]. *Gidrotekhnika* [Hydraulic Engineering]. 2025, Iss. 2, pp. 69–71. (In Russian)

4. Şirinova A. Y. Metal konstruksiyaların korroziyadan mühafizəsində elektokimyəvi katod mühafizə qurğuları. Elmi xəbərlər. Təbiət və Texniki Elmlər Bölməsi, 2024, vol. 24, Iss. 3, pp. 89–94.
5. Kaverinskiy V. S., Kaverinskiy D. V. Novye metody zashchity ot korrozii [New methods of corrosion protection]. *Lakokrasochnye materialy i ikh primeneniye* [Paint and Varnish Materials and Their Application]. 2020, Iss. 5, pp. 10–14. (In Russian)
6. Anufriev N. G., Kuzenkov Yu. A. Issledovanie korrozionnogo povedeniya alyuminiya 1980T1 v morskoy vode i burovom rastvore elektrokhimicheskimi metodami [Study of the corrosion behavior of aluminum 1980T1 in seawater and drilling fluid using electrochemical methods]. *Praktika protivokorroziionnoy zashchity* [Practice of Anticorrosion Protection]. 2022, vol. 27, Iss. 3, pp. 7–30. (In Russian)
7. Zavarzin S. V., Oglodkov M. S., Chesnokov D. V., Kozlov I. A. Vysokotemperaturnaya solevaya korroziya i zashchita materialov gazoturbinnnykh dvigateley (obzor) [High-temperature salt corrosion and protection of gas turbine engine materials (review)]. *Trudy VIAM* [Proceedings of VIAM]. 2022, Iss. 3(109), pp. 121–134. (In Russian)
8. Garashko V. V. Antikorroziionnaya zashchita shpuntovykh ograzhdeniy: tekhnologii, materialy i perspektivy [Anticorrosion protection of sheet pile walls: technologies, materials, and prospects]. *Molodoy issledovatel' Dona* [Young Researcher of the Don]. 2025, vol. 10, Iss. 3(54), pp. 17–21. (In Russian)
9. Buziner Yu. L., Shmakov N. N. Antikorroziionnoe pokrytie Ecomast dlya zashchity GTS v razlichnykh usloviyakh ekspluatatsii [Anticorrosion coating Ecomast for protection of hydraulic structures under various operating conditions]. *Gidrotekhnika* [Hydraulic Engineering]. 2024, Iss. 4 (77), pp. 74–75. (In Russian)
10. Mikheeva O. V., Mirkina E. N., Mavzovin V. S. Printsipy antikorroziionnoy zashchity truboprovodov [Principles of anticorrosion protection of pipelines]. *Ekonomika stroitel'stva* [Construction Economics]. 2025, Iss. 1, pp. 356–359. (In Russian)
11. Reva Yu. V. Elektrokhimicheskaya protektornaya zashchita aktivnykh chastey elektricheskikh mashin otkrytogo ispolneniya dlya sudov ledovogo klassa [Electrochemical sacrificial protection of active parts of open-type electrical machines for ice-class vessels]. *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere* [Problems of Risk Management in the Technosphere]. 2022, Iss. 4 (64), pp. 104–110. (In Russian)
12. Zakharova P. I., Khorin A. V. Novyy perspektivnyy korrozionnostoykiy material s povyshennym resursom raboty dlya preduprezhdeniya situatsiy tekhnogennogo kharaktera [A new promising corrosion-resistant material with increased service life for preventing man-made situations]. *Molodezh' i nauka* [Youth and Science]. 2023, Iss. 9. (In Russian)
13. Pichugova L. N. Zashchita ot korrozii na AES [Corrosion protection at nuclear power plants]. *Energeticheskie ustanovki i tekhnologii* [Energy Installations and Technologies]. 2023, vol. 9, Iss. 4, pp. 74–83. (In Russian)
14. Bocharov V. A. Tsinkirovanie — vysokoeffektivnaya zashchita ot korrozii [Zinc plating — highly effective corrosion protection]. *Gidrotekhnika* [Hydraulic Engineering]. 2024, Iss. 1 (74), pp. 62–64. (In Russian)
15. Revin P. O., Makarenko A. V. Issledovanie dolgovechnosti antikorroziionnykh pokrytiy dlya zashchity prichal'nykh sooruzheniy [Study of durability of anticorrosion coatings for protection of berthing structures]. *Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefi i nefteproduktov* [Science and Technologies of Pipeline Transportation of Oil and Oil Products]. 2022, vol. 12, Iss. 5, pp. 470–479. (In Russian)
16. Ovchinnikova T. A., Marinin A. N., Ovchinnikov I. G. Korroziya i antikorroziionnaya zashchita zhelezobetonnykh mostovykh konstruksiy [Corrosion and anticorrosion protection of reinforced concrete bridge structures]. *Internet-zhurnal "Naukovedenie"* [Internet journal "Naukovedenie"]. 2014, Iss. 5 (24). (In Russian)
17. Migunov V. N., Ovchinnikov I. I., Ovchinnikov I. G. *Eksperimental'no-teoreticheskoe modelirovanie armirovannykh konstruksiy v usloviyakh korrozii: monografiya* [Experimental and theoretical modeling of reinforced structures under corrosion conditions: monograph]. Penza: PGUAS Publ., 2014, 294 p. (In Russian)
18. Stepanova V. F., Rozental' N. K., Moiseeva N. A. Katodnaya elektrokhimicheskaya zashchita armatury ot korrozii v zhelezobetonnykh konstruksiyakh [Cathodic electrochemical protection of reinforcement against corrosion in reinforced concrete structures]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering]. 2023, Iss. 12, pp. 46–50. (In Russian)
19. Dang V. Q., Ogawa Y., Bui P. T., Kawai K. Effects of chloride ions on the durability and mechanical properties of sea sand concrete incorporating supplementary cementitious

materials under an accelerated carbonation condition. *Construction and Building Materials*, 2021, vol. 274, p. 122016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.122016.

20. Shalyy E. E., Leonovich S. N., Kim L. V. *Dolgovechnost' morskikh sooruzheniy pri kombinirovannoy korrozii zhelezobetona* [Durability of marine structures under combined corrosion of reinforced concrete]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Ser.: Materialy. Konstruktsii. Tekhnologii* [Bulletin of the Volga Region State Technological University. Series: Materials. Structures. Technologies]. 2018, Iss. 1 (5), pp. 65–72. (In Russian)

21. Leonovich S. N., Stepanova A. V., Tsuprik V. G., Kim L. V. et al. *Dolgovechnost' betona pri khloridnoy agressii: monografiya* [Durability of concrete under chloride aggression: monograph]. Vladivostok: Dal'nevostochnyy federal'nyy universitet Publ., 2020, 90 p. (In Russian)

22. Karpenko N. I., Yarmakovskiy V. N., Erofeev V. T. *O sovremennykh metodakh obespecheniya dolgovechnosti zhelezobetonnykh konstruktsiy* [On modern methods of ensuring durability of reinforced concrete structures]. *Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo* [Academia. Architecture and Construction]. 2015, Iss. 1, pp. 93–102. (In Russian)

23. Leonovich S. N. et al. *Prognozirovanie dolgovechnosti zhelezobetonnykh konstruktsiy pri kombinirovannom vozdeystvii karbonizatsii i khloridnoy agressii i ikh vosstanovlenie* [Prediction of durability of reinforced concrete structures under combined effect of carbonation and chloride attack and their rehabilitation]. Minsk: BNTU Publ., 2021, 353 p. (In Russian)

24. Leonovich S. N., Shalyi E. E., Kim L. V. Reinforced Concrete under the Action of Carbonization and Chloride Aggression: a Probabilistic Model for Service Life Prediction. *Science and Technique*, 2019, vol. 18, Iss. 4, pp. 284–291.

25. Shalyy E. E. et al. *Sovmestnoe deystvie karbonizatsii i khloridnoy agressii na konstruktsionnyy beton: veroyatnostnaya model'* [Combined effect of carbonation and chloride attack on structural concrete: probabilistic model]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov* [Bulletin of Civil Engineers]. 2018, vol. 68, Iss. 3, pp. 123–131. (In Russian)

26. Duan Y., Wang J. Y., Wang L. Corrosion prevention of steel bars in concrete using amine and epoxy compounds.

Construction and Building Materials, 2018, vol. 170, pp. 692–700.

27. Liu Y., Wang Y., Li W. Corrosion inhibition of reinforcing steel in concrete by plant exudates. *Materials and Corrosion*, 2022, vol. 73, Iss. 6, pp. 1536–1544.

28. Li Y., Zou X., Zhao F., Ma L. Corrosion inhibition of Graphene oxide for steel in concrete. *Corrosion Science*, 2019, vol. 153, pp. 240–249.

29. Afrasiyabi M., Ramezani pour A. A., Ghanbari M. Corrosion of steel in concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 2017, vol. 141, pp. 835–851. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.02.186.

30. Daniyal M., Akhtar S. Corrosion assessment and control techniques for reinforced concrete structures: a review. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 2020, vol. 5, p. 1. DOI: 10.1007/s41024-019-0067-3.

31. Geiker M. R., Polder R. B. Experimental support for new electro active repair method for reinforced concrete. *Material Corrosion*, 2016, vol. 67, pp. 600–606.

32. Bely A. A., Shermukhamedov U. Z., Sobirova M. M., Kadirova Sh. Sh. et al. Monitoring inzhenernykh konstruktsiy puteprovoda po ulitse Babura k Tashkentскому mezhdunarodnomu aeroportu imeni Islama Karimova [Monitoring of engineering structures of the overpass along Babur Street to Tashkent International Airport named after Islam Karimov]. *Putevoy Navigator* [Track Navigator]. 2025, Iss. 64 (90), pp. 46–55. (In Russian)

Received: September 12, 2025

Accepted: October 23, 2025

Author's information:

Anatoliy A. ANTONYUK — Research Engineer, Engineer; aaa.12.03.1992@mail.ru

Andrey A. BELYI — Dr. Sci. in Engineering, Professor, Department of Bridges and Tunnels²; Technical Director³; Member of International Transport Academy, Member of Russian Transport Academy; andbelyi@mail.ru

Sharofat Sh. KADIROVA — Senior Lecturer, Department of Bridges and Tunnels; irana_scorpion@mail.ru

Andrey A. MAKHONKO — PhD in Engineering, Head of the Road Maintenance Service; Makhonkooa@gmail.com