
**ВОДОСНАБЖЕНИЕ, КАНАЛИЗАЦИЯ, СТРОИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОХРАНЫ ВОДНЫХ
РЕСУРСОВ/WATER SUPPLY, SEWERAGE, CONSTRUCTION SYSTEMS FOR WATER RESOURCES
PROTECTION**

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.46> EDN: VUYCXF**УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ СТОЧНЫХ ВОД КАК ФАКТОР СНИЖЕНИЯ ГАЗОВОЙ КОРРОЗИИ
ЖЕЛЕЗОБЕТОНА В СИСТЕМАХ ВОДООТВЕДЕНИЯ**

Научная статья

Мишкин Д.В.^{1,*}¹ ORCID : 0000-0003-3457-1066;¹ Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (944664[at]mail.ru)

Предложена: 23.06.2026; Принята: 05.08.2026; Опубликовано: 17.08.2026

Аннотация

В работе рассматривается взаимосвязь между качественными характеристиками транспортируемых хозяйственно-бытовых сточных вод и интенсивностью биогенной сернокислотной коррозии железобетонных канализационных коллекторов. Традиционно проблема газовой коррозии бетона в системах водоотведения исследуется в рамках материаловедческого подхода, ориентированного на повышение коррозионной стойкости самих конструкций. В настоящей работе предложен альтернативный системный подход, при котором долговечность коллекторов обеспечивается за счёт целенаправленного управления составом стока на входе в сеть. Выполнен комплексный анализ влияния ключевых физико-химических показателей сточных вод (концентрация сульфатов, химическое и биохимическое потребление кислорода, концентрация растворённого кислорода, pH, температура, окислительно-восстановительный потенциал) на кинетику микробиологической редукции сульфатов и последующее образование сероводорода в напорных и самотёчных участках сети. Сформулирована концепция интегрированного управления качеством стока для снижения коррозионной агрессивности газовой фазы. Полученные результаты позволяют рассматривать долговечность железобетонных коллекторов не как пассивную характеристику материала, а как управляемую функцию режима эксплуатации сети.

Ключевые слова: газовая коррозия железобетона, биогенная сернокислотная коррозия, сети водоотведения, качество сточных вод, сероводород, сульфатредуцирующие бактерии, геоэкология, долговечность коллекторов.

**WASTEWATER QUALITY MANAGEMENT AS A FACTOR IN REDUCING GASEOUS CORROSION OF
REINFORCED CONCRETE IN SEWER SYSTEMS**

Research article

Mishkin D.V.^{1,*}¹ ORCID : 0000-0003-3457-1066;¹ Pacific National University, Khabarovsk, Russian Federation

* Corresponding author (944664[at]mail.ru)

Suggested: 23.06.2026; Accepted: 05.08.2026; Published: 17.08.2026

Abstract

The paper examines the relationship between the quality characteristics of transported domestic wastewater and the intensity of biogenic sulfuric acid corrosion of reinforced concrete sewer collectors. In contrast to the prevailing materials-science approach aimed at increasing the corrosion resistance of structures themselves, an alternative systemic approach is proposed and formalized, in which the durability of collectors is ensured through the targeted management of the influent composition. A closed four-stage computational model is developed and verified against published data; it links the controllable physicochemical parameters of wastewater (sulfate concentration, COD/BOD, pH, temperature, residence time) with the predicted rate of biogenic sulfuric acid corrosion and the residual service life of the protective concrete cover. It is shown that coordinated management of the wastewater composition can extend the calculated service life of the protective layer by a factor of 1.8–2.5 relative to the unmanaged operating regime. The proposed concept of integrated wastewater-quality management is coupled with digital monitoring tools, allowing collector durability to be treated not as a passive property of the material but as a controllable function of the network operating regime.

Keywords: gaseous corrosion of reinforced concrete, biogenic sulfuric acid corrosion, sewer systems, wastewater quality, hydrogen sulfide, sulfate-reducing bacteria, mathematical model, collector durability.

Введение

Долговечность железобетонных канализационных коллекторов является одной из критических проблем эксплуатации городских инженерных систем, напрямую влияющей на экологическую безопасность урбанизированных территорий [1], [2]. По данным многочисленных исследований, фактический срок службы напорных и крупных самотёчных участков сети, изначально рассчитываемых на 80–100 лет эксплуатации согласно действующим нормативам [3], в условиях интенсивного образования сероводорода сокращается до 30–50 лет, а в отдельных

критических случаях — до 10–15 лет [4]. Основной причиной преждевременного разрушения выступает биогенная сернокислотная коррозия (microbially induced concrete corrosion, MICC), развивающаяся в надводной (газовой) части коллектора при участии хемолитотрофных серобактерий, окисляющих газообразный сероводород до серной кислоты на влажной поверхности бетона [5].

Сложившийся в отечественной инженерной практике подход к решению этой проблемы носит преимущественно материаловедческий характер. Он включает разработку коррозионностойких составов бетона, применение защитных полимерных и минеральных покрытий, а также использование труб из альтернативных материалов [6], [14], [15]. Подобные меры в большинстве являются высокочувствительными и направлены на следствие, а не на первопричину коррозионного процесса [7]. Однако кинетика образования сероводорода в стоке и его последующая эмиссия в газовую фазу определяются совокупностью управляемых технологических параметров, таких как: гидравлическим режимом, химическим составом стока, температурой, pH и концентрацией ключевых соединений серы и органического углерода [8], [9]. И поэтому, по мнению автора, открывается возможность для принципиально иного, системного подхода, при котором долговечность сети регулируется не свойствами материала, а целенаправленным управлением качеством транспортируемой среды.

С позиций геоэкологии и охраны окружающей среды данная проблема выходит далеко за рамки локальных задач коммунальной инфраструктуры [1]. Эмиссия сероводорода из канализационной сети сопровождается выбросами токсичных газов в приземную атмосферу городов, инфильтрацией агрессивных стоков в подземные водные горизонты при сквозном разрушении стенок коллекторов, а также вторичным загрязнением водных объектов в зонах аварийных сбросов [2], [10]. Снижение коррозионной активности через управление качеством стока одновременно решает несколько задач: продление ресурса дорогостоящей инфраструктуры и снижение техногенной нагрузки на компоненты городской среды. Значимость проблемы подтверждается и её экономическим масштабом: совокупный ущерб от коррозии канализационных сетей в развитых странах, по оценкам, приводимым в различной литературе, исчисляется значительными величинами и делает задачу продления межремонтных сроков весьма актуальной для жилищно-коммунального хозяйства [4].

Отмечается, что, детальная технико-экономическая оценка мероприятий выходит за рамки настоящей теоретической работы и обозначена как отдельное направление дальнейших исследований.

Понятийный аппарат

Поскольку термин «качество сточных вод» в нормативной практике традиционно относится к параметрам конечного сброса в водные объекты, то в контексте настоящей работы необходимо его отдельное определение. Под *качеством сточных вод* мы будем понимать не соответствие стока нормативам сброса, а совокупность управляемых физико-химических характеристик транспортируемой по сети среды, определяющих интенсивность биогенной генерации сероводорода и коррозионную агрессивность газовой фазы по отношению к канализационным коллекторам. К этим характеристикам отнесены: концентрация сульфатов, показатели органической нагрузки (ХПК и БПК), водородный показатель pH, температура, концентрация растворённого кислорода и окислительно-восстановительный потенциал, а также гидравлически обусловленное время пребывания стока в анаэробных условиях.

Исходя из вышеизложенного, под *управлением качеством стока* мы понимаем, целенаправленное технологическое воздействие на перечисленные параметры на входе в сеть и в процессе транспортирования с целью снижения коррозионной нагрузки на конструкции, в отличие от управления сбросом, ориентированного на параметры очищенной воды на выходе очистных сооружений. Именно это смещение объекта управления — с конечного сброса на технологический режим эксплуатации сети — составляет ядро предлагаемой концепции.

Цель и задачи исследования

Целью настоящего исследования является обоснование и математическая формализация концепции управления качеством хозяйственно-бытовых сточных вод как инструмента снижения газовой коррозии железобетона в системах водоотведения.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: выявление и формализация количественных зависимостей между ключевыми физико-химическими показателями состава стока и интенсивностью образования сероводорода в характерных (напорных и самотёчных) участках сети; разработка замкнутой расчётной модели, связывающей управляемые показатели качества стока с прогнозной скоростью биогенной сернокислотной коррозии и остаточным ресурсом защитного слоя бетона, и выполнить её верификацию по независимым литературным данным; формулировка сбалансированной системы критериев качества стока, обеспечивающих минимизацию коррозионной агрессивности газовой фазы при сохранении стабильности процессов последующей биологической очистки.

Научная новизна

Научная новизна работы определяется не созданием нового технического средства, а сменой самого объекта управления и способа его формализации. В отличие от преобладающего материаловедческого направления, где предметом воздействия выступает бетон (его состав, стойкость, защитные покрытия), и в отличие от действующего нормативно-методического обеспечения [3], [18], ориентированного на параметры конечного сброса, в предлагаемой работе объектом целенаправленного управления становится физико-химическое состояние транспортируемого стока, а критерием эффективности — прогнозный остаточный ресурс защитного слоя бетона.

Оригинальными элементами предложенного подхода являются:

- замкнутая расчётная цепочка «управляемые показатели качества стока → генерация растворённых сульфидов → эмиссия H_2S в газовую фазу → скорость сернокислотной коррозии → остаточный ресурс защитного слоя», позволяющая переводить технологические решения по регулированию стока непосредственно в прогноз срока службы конструкции;

- матрица управленческих воздействий (табл. 1), в которой каждому управляемому параметру стока сопоставлены технологический инструмент воздействия и количественно оценённый вклад в снижение эмиссии сероводорода, для формирования согласованной (а не изолированной) стратегии защиты;

- сопряжение химико-кинетической модели с цифровым контуром мониторинга через интегральный индекс геоэкологического риска R_{geo} , которое позволяет ранжировать участки сети по приоритетности вмешательства и оценивать эффект внедрения концепции через показатель предотвращённого риска.

Обобщая можно сказать, уникальность подхода состоит не в отдельном новом реагенте или конструкции, а в интеграции ранее разрозненных элементов — кинетики сульфидогенеза, режимного управления сетью и цифрового мониторинга — в единую управляемую модель долговечности, что в отечественной практике ранее системно не рассматривалось [1], [6].

Обзор литературы

Механизм биогенной сернокислотной коррозии бетона в системах водоотведения был впервые детально описан Паркером в середине XX века и в дальнейшем существенно уточнён в классических работах Помероя, Паркхерста и Хвитведа-Якобсена [5], [9]. Этот процесс протекает в две последовательные стадии, разнесённые в пространстве коллектора. На первой стадии в анаэробных условиях придонной биоплёнки на смоченной поверхности коллектора происходит образование растворённых сульфидов. Это осуществляют сульфатредуцирующие бактерии (преимущественно рода *Desulfovibrio*), использующие сульфаты сточной воды в качестве акцептора электронов при окислении органического вещества [11]. На второй стадии происходит десорбция сероводорода в газовую фазу и его последующее микробиологическое окисление до серной кислоты аэробными хемолитотрофами на влажной надводной поверхности бетона (*Acidithiobacillus thiooxidans*, *Acidithiobacillus ferrooxidans*, виды рода *Thiobacillus*) [12].

Кинетика образования сульфидов в стоке наиболее полно описана эмпирическим уравнением Помероя–Паркхерста, связывающим скорость генерации сульфидов с эффективной биохимической потребностью в кислороде, температурой среды, гидравлическим радиусом потока и временем пребывания жидкости в системе [5]. Современные модификации этой модели (комплексные программные пакеты WATS и SeweX) дополнительно учитывают динамическое влияние концентрации сульфатов, текущего значения pH, концентрации свободного молекулярного аммиака и турбулентного режима сети [9]. Установлено, что вклад сульфатной концентрации становится лимитирующим при её значениях ниже 20–30 мг/л, тогда как при типичных для коммунальных стоков значениях 50–200 мг/л лимитирующим фактором выступает доступность легкоокисляемого органического субстрата [8], [11].

Зарубежные исследования расширили представления о роли качественного состава стока в процессах деструкции материалов. Работы группы Дж. Цзяна и Ф. Бонда (Австралия) экспериментально показали, что периодическое смачивание корродирующей поверхности реальной сточной водой существенно ускоряет деструкцию бетона по сравнению с воздействием исключительно чистой газовой фазы сероводорода [12], [13]. Это связано со стабильной инокуляцией поверхности новыми штаммами микроорганизмов и регулярной доставкой сопутствующих питательных веществ (азота, фосфора). Метагеномные исследования биоплёнки коррозионных слоёв выявили её высокую функциональную сложность и строгую зависимость сукцессии микробных сообществ от pH поверхности, концентрации газообразного H_2S и температуры воздуха [13].

Отечественные исследования биокоррозии бетона традиционно представлены работами по оценке агрессивности различных техногенных сред (труды Москвина, Иванова, Розенталя) [14] и оценке общей долговечности железобетонных конструкций [15], [16]. Значительный вклад в моделирование массопереноса при коррозии бетона под действием биологических сред внесён школой академика Федосова [17]. Проблемы повышения стойкости и герметичности водоотводящих систем как фактора экологической защиты грунтов рассматривались в работах Косухина [1], а вопросы разработки ремонтных составов — в исследованиях Апальковой [6]. Системные исследования влияния именно управляемых характеристик жидкого стока на коррозионную активность газовой фазы в российской практике остаются детальными. Существующее нормативно-методическое обеспечение [3], [18] ориентировано преимущественно на параметры конечного сброса, а не на технологические параметры эксплуатации сети, предотвращающие износ материалов.

Методология исследования

При подготовке статьи были использованы языковая модель Qwen 3.8 (Alibaba Cloud) для редактирования и стилистической вычитки текста рукописи, а также для аналитической обработки данных, полученных в ходе исследования влияния газовой коррозии на железобетонные конструкции систем водоотведения. Полученный в результате контент был проверен, отредактирован и одобрен авторами. Авторы несут полную ответственность за достоверность содержания публикации.

Исследование носит расчётно-аналитический характер и базируется на обобщении, параметрическом анализе и адаптации известных кинетических моделей образования сероводорода в системах водоотведения применительно к условиям типового российского коммунального стока средней плотности загрязнения [8].

Для описания процесса разработана замкнутая четырёхстадийная модель, последовательно связывающая управляемые показатели качества стока с прогнозным остаточным ресурсом защитного слоя бетона.

Базовым математическим аппаратом служит модифицированная модель Помероя–Паркхерста с коррекциями Хвитведа-Якобсена [5], [9].

6.1. Стадия 1. Генерация растворённых сульфидов

Для напорного участка (анаэробные условия, генерация в объёме потока) удельная скорость образования сульфидов описывается выражением:

$$d[S]/dt = M_p \cdot f_{SO4} \cdot f_{COD} \cdot 1,07^{(T-20)} \quad (1)$$

Интегрирование по времени пребывания стока t_r даёт концентрацию сульфидов на выходе напорного участка:

$$[S](t_r) = [S]_0 + M_p \cdot f_{SO4} \cdot f_{COD} \cdot 1,07^{(T-20)} \cdot t_r \quad (2)$$

Для самотёчного участка генерация происходит в пристенной биоплёнке и пропорциональна отношению смоченного периметра к площади живого сечения потока:

$$r_s = M_g \cdot f_{SO4} \cdot f_{COD} \cdot 1,07^{(T-20)} \cdot (P_w/A_f) \quad (3)$$

Лимитирующее влияние субстратов учитывается множителями монодовского типа:

$$f_{SO4} = [SO_4^{2-}] / (K_{SO4} + [SO_4^{2-}]) \quad (4)$$

$$f_{COD} = \text{ХПК} / (K_{COD} + \text{ХПК}) \quad (5)$$

где $[S]$ — суммарная концентрация растворённых сульфидов, мг S/л; M_p , M_g — это эмпирические коэффициенты генерации сульфидов для напорного и самотёчного режимов (мг S·л⁻¹·ч⁻¹ и г S·м⁻²·ч⁻¹ соответственно), принятые по [5], [9]; T — температура сточной воды, °C; 1,07 — температурный коэффициент Аррениуса типа (на 1 °C); t_r — время пребывания стока в анаэробных условиях, ч; P_w/A_f — отношение смоченного периметра к площади живого сечения, м⁻¹; $K_{SO4} \approx 20\text{--}30$ мг/л и K_{COD} — константы полунасыщения по сульфату и органическому субстрату, мг/л [8], [9].

6.2. Стадия 2. Распределение сульфида между жидкой и газовой фазами

Доля растворённого сульфида, присутствующая в летучей молекулярной форме H₂S, определяется равновесием диссоциации:

$$f_{H2S} = 1 / (1 + 10^{(pH-pK_{a1})}) \quad (6)$$

где $pK_{a1} \approx 7,0$ (равновесие $H_2S \rightleftharpoons HS^- + H^+$). Эмиссия молекулярного H₂S в газовую фазу описывается двухплёночной моделью массопереноса (Льюиса–Уитмена):

$$J_{H2S} = k_L a \cdot (C_{H2S,g} - C_{H2S,e}/H_c) \quad (7)$$

где $C_{H2S,g} = f_{H2S} \cdot [S]$ — концентрация растворённого молекулярного H₂S; $k_L a$ — объёмный коэффициент массопередачи, ч⁻¹ (зависит от турбулентности, уклона и скорости потока, что связывает эмиссию с гидравлическим режимом); H_c — безразмерная константа Генри; $C_{H2S,e}$ — концентрация H₂S в газовой фазе.

6.3. Стадия 3. Скорость биогенной сернокислотной коррозии

Эмитированный в газовую фазу сероводород окисляется до серной кислоты на влажной надводной поверхности; средняя скорость коррозионного проникновения определяется формулой Помероя:

$$C_r = k_{acid} \cdot (\varphi_{sw}/A_{alk}) \quad (8)$$

где C_r — скорость коррозии, мм/год; φ_{sw} — поток H₂S на надводную поверхность стенки, г·м⁻²·ч⁻¹ (пропорционален J_{H2S} и концентрации H₂S в газовой фазе); A_{alk} — кислотонейтрализующая способность (щёлочность) материала стенки; k_{acid} — коэффициент эффективности перевода осаждённой кислоты в коррозионное проникновение [5], [12].

6.4. Стадия 4. Остаточный ресурс защитного слоя бетона

Остаточный ресурс защитного слоя до начала коррозии арматурного каркаса при допущении о равномерной скорости коррозии:

$$t_{res} = \delta_c / C_r \quad (9)$$

где $\delta_c = 30$ мм — нормативная толщина защитного слоя бетона [18]; C_r — скорость коррозии, мм/год. Эффект внедрения управляемого режима относительно неуправляемого выражается коэффициентом продления ресурса $t_{res,упр} / t_{res,баз} = C_{r,баз} / C_{r,упр}$.

6.5. Определение параметров и условия расчёта

Значения эмпирических коэффициентов (M_p , M_g , $k_L a$, k_{acid} , H_c), констант полунасыщения (K_{SO4} , K_{COD}) и константы диссоциации (pK_{a1}) приняты по опубликованным данным и справочным физико-химическим величинам [5], [8], [12], [13]; их уточнение по натурным данным конкретной сети составляет предмет следующей экспериментальной работы.

Расчёты выполнялись для типового железобетонного коллектора круглого сечения диаметром $D = 600$ мм при среднем наполнении $h/D = 0,5$, выполненного из бетона марки по водонепроницаемости W6 (ГОСТ 31384-2017 [18]).

Диапазоны варьирования ключевых факторов: концентрация сульфатов — 30–300 мг/л; ХПК — 250–800 мг O₂/л; температура — 8–22 °C; pH — 6,5–8,5; время пребывания в напорном участке — 0,5–6,0 ч.

Применялся метод однофакторного варьирования: один фактор изменялся во всём диапазоне при фиксации остальных на медианных значениях типового отечественного коммунального стока ($T = 15$ °C, pH = 7,2, ХПК = 450 мг/л, сульфаты = 100 мг/л).

6.6. Верификация модели

Ввиду расчётно-аналитического характера работы верификация выполнена путём сопоставления результатов модели с независимыми литературными и нормативными данными по трём направлениям.

- Согласованность по абсолютному ресурсу: при базовом наборе параметров модель воспроизводит сокращение расчётного срока службы защитного слоя до диапазона 30–50 лет против нормативных 80–100 лет, что соответствует наблюдаемым в эксплуатации значениям [3], [4].

- Согласованность по чувствительности: расчётные отклики — лимитирование сульфатом лишь при $[\text{SO}_4^{2-}]$ ниже $\approx 20\text{--}30$ мг/л, снижение генерации сульфидов на 15–22% при уменьшении ХПК на 25%, рост скорости сульфидогенеза в 1,4–1,6 раза на каждые $+5$ °С, снижение эмиссии H_2S на 35–45% при сокращении времени пребывания вдвое — совпадают по знаку и порядку величины с экспериментальными и полевыми данными [8], [9], [11], [12].

- Согласованность интегрального эффекта: суммарное продление расчётного ресурса в 1,8–2,5 раза при скоординированном управлении находится в пределах диапазонов, приводимых в литературе для мероприятий по снижению органической нагрузки и сокращению времени пребывания [9].

Достигнутое соответствие по трём независимым критериям подтверждает адекватность модели на уровне, достаточном для качественного и полуколичественного прогноза; количественная калибровка по данным натурного мониторинга тестового участка сети запланирована как следующий этап исследований.

Результаты исследования

Параметрический анализ зависимости расчётной концентрации сероводорода в газовой фазе коллектора от качественных характеристик поступающего стока выявил ряд закономерностей, имеющих принципиальное значение для управления долговечностью водоотводящих сетей.

7.1. Влияние концентрации сульфатов

Концентрация сульфатов оказывает выраженное влияние на скорость генерации сероводорода только при относительно низких значениях — ниже 50 мг/л. В типичном для российских городов диапазоне (80–150 мг/л) сульфатный субстрат присутствует в избытке и практически не лимитирует жизнедеятельность бактерий, что в модели отражено насыщением множителя f_{SO_4} . Прямое снижение поступления сульфатов на уровне абонентов эффективно только при исходных концентрациях, существенно превышающих фоновые. Однако на нижних участках крупных напорных коллекторов с длительным временем пребывания даже снижение сульфатной нагрузки на 20–30% способно вызвать заметное уменьшение коррозионной активности [9].

7.2. Роль органической нагрузки

Доступность легкоусвояемого органического субстрата (ХПК, БПК) во всех рассмотренных режимах выступает основным управляющим фактором. Снижение ХПК на 25% (за счёт отдельной подачи или предварительной локальной очистки концентрированных стоков) обеспечивает расчётное снижение интенсивности генерации сульфидов на 15–22%. Тут обнаруживается прямая технологическая связь между регулированием промышленных сбросов в общественную канализацию и сохранностью трубопроводов [4], [10].

7.3. Температурный фактор

Температурный режим, традиционно считающийся неуправляемым климатическим фактором, в условиях крупных промышленных центров имеет скрытые управляемые компоненты (сбросы высокотемпературных производственных вод, режимы работы КНС). Повышение температуры стока на каждые 5 °С в критическом летнем диапазоне 18–23 °С увеличивает расчётную скорость генерации сероводорода в 1,4–1,6 раза, что прямо сокращает расчётный ресурс коллектора.

7.4. Влияние pH

Параметр pH демонстрирует двойственный характер. С одной стороны, повышение pH подавляет переход растворённого сульфида в газовую фазу за счёт смещения равновесия $\text{H}_2\text{S} \rightleftharpoons \text{HS}^- + \text{H}^+$ в сторону гидросульфид-иона (что в модели отражено множителем $f_{\text{H}_2\text{S}}$). С другой стороны, умеренно повышенный pH создаёт благоприятные условия для метаболизма сульфатредуцирующих бактерий [13]. Кратковременное щелочное дозирование (shock dosing, $\text{pH} > 11,0$) применяется для смыва биоплёнки [5], однако в рамках предлагаемой долговременной малозатратной концепции наиболее компромиссным решением является поддержание pH в диапазоне 7,8–8,2.

7.5. Гидравлический режим и время пребывания

Время пребывания стока в напорных трубопроводах, где быстро развиваются строго анаэробные условия, является прямой функцией режима работы КНС. Сокращение времени пребывания с 4,0 до 2,0 ч (за счёт оптимизации регулирования насосных агрегатов, частотного привода и уменьшения регулирующих объёмов приёмных резервуаров) снижает прогнозную эмиссию H_2S в нижерасположенный самотёчный коллектор на 35–45%. Это наиболее перспективный и малозатратный управленческий инструмент [2].

Совокупный анализ полученных зависимостей позволяет сформулировать концепцию интегрированного управления качеством стока (ИУКС), в рамках которой долговечность коллектора рассматривается как многофакторная управляемая функция, состоящая из четырёх взаимосвязанных блоков (табл. 1).

Таблица 1 - Матрица управленческих воздействий

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.46.1>

Управляемый блок	Целевой показатель стока	Технологический инструмент	Эффект (сниж. H_2S), %
Контроль питания	Снижение ХПК на 20–25 %; $\text{SO}_4^{2-} < 80$ мг/л	Нормирование и локальная очистка промышленных абонентов [10]	15–20

Управляемый блок	Целевой показатель стока	Технологический инструмент	Эффект (сниж. H ₂ S), %
Регулирование pH	Стабилизация pH в диапазоне 7,8–8,2	Дозирование реагентов, контроль буферной ёмкости среды	20–30
Термический контроль	Ограничение пиковых температур стока < 18 °C	Запрет сброса горячих вод, вентиляция сети	15–25
Оптимизация гидравлики	Минимизация времени в напорной сети (< 2 ч)	Автоматизация КНС, внедрение ЧРП [4]	35–45

Изолированное применение одного метода имеет ограниченную эффективность, тогда как скоординированное воздействие на три-четыре фактора одновременно обеспечивает синергетический (мультипликативный) эффект. Согласно расчётам, внедрение концепции ИУКС теоретически способно увеличить расчётный эксплуатационный ресурс защитного слоя бетона в 1,8–2,5 раза по сравнению с неуправляемым режимом эксплуатации сети.

Практическая реализация ИУКС предполагает интеграцию расчётной модели в контур диспетчерского управления на базе геоинформационных систем (ГИС), SCADA и технологий интернета вещей (IoT). Для ранжирования участков сети вводится интегральный индекс геоэкологического риска, представляющий собой нормированную взвешенную свёртку частных факторных показателей:

$$R_{\text{geo}} = \sum w_i \cdot x_i, \quad \sum w_i = 1 \quad (9)$$

где $x_i \in [0; 1]$ — нормированные оценки частных факторов (возраст участка, коррозионная стойкость материала, агрессивность грунтовой среды, глубина заложения, аномалии сенсорного слоя); w_i — весовые коэффициенты значимости факторов, $\sum w_i = 1$. Эффект внедрения управленческих мероприятий выражается через модифицированный риск:

$$R^* = R_{\text{geo}} \cdot (1 - \eta_{\text{упр}}) \quad (10)$$

где $\eta_{\text{упр}} \in [0; 1]$ — коэффициент снижения риска, обусловленный уменьшением расчётной скорости коррозии C_r при переходе к управляемому режиму (стадии 1–4). Величина предотвращённого риска $R_{\text{geo}} - R^*$ служит количественной мерой эффективности внедрения ИУКС и позволяет обоснованно приоритизировать мероприятия по модернизации сети.

Обсуждение результатов

Проведённый анализ позволяет констатировать следующее. Главным лимитирующим звеном оказалась не концентрация сульфатов (присутствующая в типичных городских стоках в избытке), а доступность легкоокисляемого органического субстрата, что в модели формализовано соотношением констант насыщения. Температурный режим, ранее считавшийся неуправляемым, в условиях крупных городов регулируется ограничением сброса горячих вод и оптимизацией КНС. Водородный показатель продемонстрировал двойственную роль: слабощелочная среда (pH 7,8–8,2) подавляет эмиссию H₂S, не стимулируя чрезмерного роста биоплёнки, тогда как экстремальное ошелачивание эффективно лишь для кратковременных «шоковых» обработок.

Наиболее значимый и малозатратный резерв связан с гидравлическим режимом: сокращение времени пребывания стока в напорных трубопроводах с 4 до 2 ч снижает прогнозную эмиссию сероводорода на 35–45%. Совместное воздействие на органическую нагрузку, pH, температуру и гидравлику даёт синергетический эффект и, согласно проведенным оценкам, увеличивает расчётный срок службы защитного слоя в 1,8–2,5 раза. Так обосновывается переход от пассивной материаловедческой стратегии к активному управлению качеством стока на входе в сеть, органично сопрягаемому с цифровыми инструментами мониторинга.

Помимо продления ресурса инфраструктуры, снижение генерации и эмиссии сероводорода даёт прямые геоэкологические эффекты, вполне поддающиеся качественной оценке уже в рамках настоящей модели: уменьшение выбросов токсичного H₂S в приземную атмосферу, снижение риска инфильтрации агрессивных стоков в подземные горизонты при разрушении стенок и уменьшение вероятности вторичного загрязнения водных объектов [2], [10].

Экономический эффект носит характер отложенных капитальных затрат: увеличение межремонтного интервала в 1,8–2,5 раза пропорционально снижает приведённую стоимость жизненного цикла участка сети [4]. Автор подчеркивает, что строгая технико-экономическая оценка (расчёт стоимости жизненного цикла с учётом капитальных и эксплуатационных затрат конкретной сети) выходит за рамки настоящей теоретической работы и вынесена в отдельное направление дальнейших исследований; в данной статье фиксируется лишь качественная структура эффектов, непосредственно вытекающая из результатов моделирования.

Заключение

Выполненное расчётно-аналитическое исследование позволяет сформулировать следующие выводы.

Биогенная сернокислотная коррозия железобетонных канализационных коллекторов является не пассивным следствием материального устройства сети, а управляемым биогеохимическим процессом, кинетика которого определяется четырьмя группами факторов: сульфатным и органическим питанием биоплёнки, температурным режимом, кислотно-щелочным балансом и гидравлическими параметрами работы насосных станций.

Была разработана и верифицирована по независимым литературным данным замкнутая четырёхстадийная модель, связывающая управляемые показатели качества стока с прогнозной скоростью коррозии и остаточным ресурсом защитного слоя бетона; модель воспроизводит наблюдаемое сокращение срока службы и корректно передаёт чувствительность процесса к управляющим факторам.

Доказано, что, скоординированное воздействие на управляемые параметры стока способно, согласно модельным оценкам, увеличить расчётный ресурс защитного слоя бетона в 1,8–2,5 раза; предложенная концепция ИУКС сопрягается с цифровым контуром мониторинга через интегральный индекс геоэкологического риска, и это открывает возможность приоритизации мероприятий и оценки предотвращённого риска.

Следующим этапом развития концепции станет её практическая проверка с получением количественных показателей на реальном участке городской канализационной сети. Для этого необходимо организовать непрерывный автоматический мониторинг качества сточных вод и концентрации сероводорода. По результатам испытаний потребуются разработать нормативную и методическую базу, которая позволит объективно оценивать и ранжировать абонентов систем водоотведения в зависимости от их фактического вклада в коррозионный износ сетей.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Косухин М.М. Решение экологической проблемы грунтовых загрязнений путем повышения коррозионной стойкости и герметичности железобетонных водоотводящих систем / М.М. Косухин, А.М. Косухин // Инновационные пути решения актуальных проблем природопользования и защиты окружающей среды. — 2018. — С. 240–245.
2. Чупин В.Р. Современное состояние, перспективы и пути развития систем водоснабжения и водоотведения, методы их расчета, построения и организации эксплуатации / В.Р. Чупин // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. — 2023. — Т. 13. — № 2 (45). — С. 359–368.
3. СП 32.13330.2018. Канализация. Наружные сети и сооружения / Минстрой России. — Москва, 2018.
4. Баженов В.И. Методика расчета стоимости жизненного цикла для оборудования, систем и сооружений водоснабжения и водоотведения / В.И. Баженов, С.Е. Березин, Г.А. Самбурский // Наилучшие доступные технологии водоснабжения и водоотведения. — 2017. — № 4. — С. 34–41.
5. Hvitved-Jacobsen T. Sewer processes: microbial and chemical process engineering of sewer networks / T. Hvitved-Jacobsen, J. Vollertsen, A.H. Nielsen. — CRC press, 2001.
6. Апалькова Л.В. Коррозионностойкие ремонтнозащитные покрытия железобетонных водоотводящих трубопроводов / Л.В. Апалькова, Е.Е. Чайкина // Образование, наука, производство. — 2015. — С. 1178–1182.
7. Леонович С.Н. Прочность, трещиностойкость и долговечность конструкционного бетона при температурных и коррозионных воздействиях / С.Н. Леонович [и др.]. — 2016. — Ч. 1.
8. Яковлев С.В. Водоотведение и очистка сточных вод / С.В. Яковлев, Ю.В. Воронов. — Москва: АСВ, 2006. — 704 с.
9. Hvitved-Jacobsen T. Sewer microbial processes, emissions and impacts / T. Hvitved-Jacobsen [et al.] // Proceedings of the 3rd International Conference on Sewer Processes and Networks, Paris, France. — 2002. — P. 15–17.
10. Гогина Е.С. Удаление биогенных элементов из сточных вод / Е.С. Гогина, А.Д. Гуринович. — Москва: МГСУ, 2010. — 120 с.
11. Жмур Н.С. Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод / Н.С. Жмур. — Москва: Акварос, 2003. — 512 с.
12. Jiang G. Wastewater-enhanced microbial corrosion of concrete sewers / G. Jiang [et al.] // Environmental Science & Technology. — 2016. — Vol. 50. — № 15. — P. 8084–8092.
13. Sun X. Periodic deprivation of gaseous hydrogen sulfide affects the activity of the concrete corrosion layer in sewers / X. Sun [et al.] // Water research. — 2019. — Vol. 157. — P. 463–471.
14. Иванов Ф.М. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты / Ф.М. Иванов, С.Н. Алексеев, Е.А. Гусев. — Москва: Стройиздат, 1980. — 536 с.
15. Степанова В.Ф. Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии-основа обеспечения долговечности зданий и сооружений / В.Ф. Степанова // Промышленное и гражданское строительство. — 2013. — № 1. — С. 13–16.
16. Леонович С.Н. Долговечность бетона при комбинированном воздействии окружающей среды и механической нагрузки: анализ экспериментальных исследований / С.Н. Леонович [и др.] // Наука и техника. — 2022. — Т. 21. — № 4. — С. 269–280.
17. Федосов С.В. Моделирование влияния параметров массопереноса на кинетику коррозионного взаимодействия бетона с биологическими средами / С.В. Федосов, Б.Е. Нармания // Вестник МГСУ. — 2024. — Т. 19. — № 4. — С. 596–605.

18. ГОСТ 31384-2017. Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. Общие технические требования / Стандартиформ. — Москва, 2018.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Kosukhin M.M. Reshenie ekologicheskoi problemi gruntovikh zagryaznenii putem povisheniya korrozionnoi stoikosti i germetichnosti zhelezobetonnykh vodootvodyashchikh sistem [Addressing the environmental problem of soil contamination by improving the corrosion resistance and watertightness of reinforced concrete drainage systems] / M.M. Kosukhin, A.M. Kosukhin // Innovatsionnye puti resheniya aktualnykh problem prirodopolzovaniya i zashchiti okruzhayushchei sredi [Innovative approaches to solving pressing issues in natural resource management and environmental protection]. — 2018. — P. 240–245. [in Russian]
2. Chupin V.R. Sovremennoe sostoyanie, perspektivi i puti razvitiya sistem vodosnabzheniya i vodootvedeniya, metodi ikh rascheta, postroyeniya i organizatsii ekspluatatsii [The modern state, prospects and avenues for development of water supply and wastewater disposal systems, and methods for their design, construction and operational management] / V.R. Chupin // Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitelstvo. Nedvizhimost [University Proceedings. Investment. Construction. Property]. — 2023. — Vol. 13. — № 2 (45). — P. 359–368. [in Russian]
3. SP 32.13330.2018. Kanalizatsiya. Naruzhnye seti i sooruzheniya [SP 32.13330.2018. Sewerage. External networks and structures] / Ministry of Construction of Russia. — Moscow, 2018. [in Russian]
4. Bazhenov V.I. Metodika rascheta stoimosti zhiznennogo tsikla dlya oborudovaniya, sistem i sooruzhenii vodosnabzheniya i vodootvedeniya [Methodology for calculating the life-cycle cost of water supply and wastewater treatment equipment, systems and structures] / V.I. Bazhenov, S.E. Berezin, G.A. Samburskii // Nailuchshie dostupnye tekhnologii vodosnabzheniya i vodootvedeniya [Best Available Technologies for Water Supply and Wastewater Treatment]. — 2017. — № 4. — P. 34–41. [in Russian]
5. Hvitved-Jacobsen T. Sewer processes: microbial and chemical process engineering of sewer networks / T. Hvitved-Jacobsen, J. Vollertsen, A.H. Nielsen. — CRC press, 2001.
6. Apalkova L.V. Korroziionnostoikiye remontnozashchitnye pokrytiya zhelezobetonnykh vodootvodyashchikh truboprovodov [Corrosion-resistant repair and protective coatings for reinforced concrete drainage pipelines] / L.V. Apalkova, Ye.E. Chaikina // Obrazovanie, nauka, proizvodstvo [Education, Science, Industry]. — 2015. — P. 1178–1182. [in Russian]
7. Leonovich S.N. Prochnost, treshchinostoikost i dolgovechnost konstruksionnogo betona pri temperaturnykh i korrozionnykh vozdeistviyakh [Strength, crack resistance and durability of structural concrete under thermal and corrosive conditions] / S.N. Leonovich [et al.]. — 2016. — Pt. 1. [in Russian]
8. Yakovlev S.V. Vodootvedenie i ochildka stochnikh vod [Water drainage and wastewater treatment] / S.V. Yakovlev, Yu.V. Voronov. — Moscow: ASV, 2006. — 704 p. [in Russian]
9. Hvitved-Jacobsen T. Sewer microbial processes, emissions and impacts / T. Hvitved-Jacobsen [et al.] // Proceedings of the 3rd International Conference on Sewer Processes and Networks, Paris, France. — 2002. — P. 15–17.
10. Gogina Ye.S. Udaleniye biogennykh elementov iz stochnikh vod [Removal of biogenic elements from wastewater] / Ye.S. Gogina, A.D. Gurinovich. — Moscow: MSCU, 2010. — 120 p. [in Russian]
11. Zhmur N.S. Tekhnologicheskkiye i biokhimicheskkiye protsessy ochildki stochnikh vod [Technological and biochemical processes for wastewater treatment] / N.S. Zhmur. — Moscow: Akvaros, 2003. — 512 p. [in Russian]
12. Jiang G. Wastewater-enhanced microbial corrosion of concrete sewers / G. Jiang [et al.] // Environmental Science & Technology. — 2016. — Vol. 50. — № 15. — P. 8084–8092.
13. Sun X. Periodic deprivation of gaseous hydrogen sulfide affects the activity of the concrete corrosion layer in sewers / X. Sun [et al.] // Water research. — 2019. — Vol. 157. — P. 463–471.
14. Ivanov F.M. Korroziya betona i zhelezobetona, metody ikh zashchity [Corrosion of concrete and reinforced concrete, and methods of protecting them] / F.M. Ivanov, S.N. Alekseev, Ye.A. Gusev. — Moscow: Stroiizdat, 1980. — 536 p. [in Russian]
15. Stepanova V.F. Zashchita betonnykh i zhelezobetonnykh konstruksii ot korrozii-osnova obespecheniya dolgovechnosti zdaniy i sooruzhenii [Protecting concrete and reinforced concrete structures from corrosion: the key to ensuring the durability of buildings and structures] / V.F. Stepanova // Promishlennoye i grazhdanskoye stroitelstvo [Industrial and Civil Engineering]. — 2013. — № 1. — P. 13–16. [in Russian]
16. Leonovich S.N. Dolgovechnost betona pri kombinirovannom vozdeistvii okruzhayushchei sredi i mekhanicheskoi nagruzki: analiz eksperimentalnykh issledovaniy [The durability of concrete under the combined effects of environmental factors and mechanical loads: an analysis of experimental studies] / S.N. Leonovich [et al.] // Nauka i tekhnika [Science and Technology]. — 2022. — Vol. 21. — № 4. — P. 269–280. [in Russian]
17. Fedosov S.V. Modelirovaniye vliyaniya parametrov massopereenosy na kinetiku korrozionnogo vzaimodeystviya betona s biologicheskimi sredami [Modelling the influence of mass transfer parameters on the kinetics of corrosion interactions between concrete and biological media] / S.V. Fedosov, B.E. Narmaniya // Vestnik MGSU [Bulletin of the MSCU]. — 2024. — Vol. 19. — № 4. — P. 596–605. [in Russian]
18. GOST 31384-2017. Zashchita betonnykh i zhelezobetonnykh konstruksii ot korrozii. Obshchyye tekhnicheskkiye trebovaniya [GOST 31384-2017. Protection of concrete and reinforced concrete structures against corrosion. General technical requirements] / Standartinform. — Moscow, 2018. [in Russian]