



УДК 628.3

Н. Ю. КОНДЮРИН, аспирант кафедры строительства систем и сооружений водоснабжения и водоотведения¹, гл. инженер-технолог²;
О. В. ФЕВРАЛЬСКИХ, канд. техн. наук, ст. преп. кафедры строительства систем и сооружений водоснабжения и водоотведения¹, инженер³

НИЗКОКОНЦЕНТРИРОВАННЫЕ СТОЧНЫЕ ВОДЫ: РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОГО КРИТЕРИЯ И АНАЛИЗ МЕТОДОВ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ

¹ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе» (МГРИ).

Россия, 117485, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23.

Тел: (495) 255-15-10, эл. почта: office@mgri.ru

²ООО «ВТ Эксперт».

Россия, 127006, г. Москва, ул. Малая Дмитровка, д. 4, пом. 1/3.

Тел: (495) 198-03-88, эл. почта: n@knd88.ru

³ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук» (НИИСФ РААСН).

Россия, 127238, г. Москва, Локомотивный проезд, д. 21.

Тел.: (495) 482-40-16; эл. почта: olgafevralskih@yandex.ru

Ключевые слова: низкоконцентрированные сточные воды, биологическая очистка, соотношение БПК/Азот, дефицит органического субстрата.

В статье рассматривается проблема биологической очистки низкоконцентрированных сточных вод (НКСВ). Авторы отмечают, что существующий нормативный критерий классификации НКСВ, основанный только на значении БПК₅ (менее 150 мг/дм³), является недостаточным для технологического проектирования, так как не учитывает высокие концентрации соединений азота и критически низкое соотношение БПК₅/N_{общ} (<3), характерные для таких вод. Целью исследования является разработка системного критерия идентификации НКСВ, выходящего за рамки БПК₅ и включающего показатели концентрации азота и их соотношение. На основе анализа состава сточных вод из различных источников (малые города, камвольные, швейные, атомные производства) обоснован комплексный критерий. В статье проведен сравнительный анализ современных биологических подходов к очистке НКСВ, включая создание условий для процесса анамнокс, дозирование внешних субстратов и ацидофикацию осадка. Делается вывод о необходимости применения специализированных технологий, ориентированных на энергоэффективное удаление азота в условиях дефицита органического углерода, где ключевую роль играет управление структурой биопленки для минимизации диффузионных ограничений.

Введение

Низкоконцентрированные сточные воды (НКСВ) характеризуются существенно меньшими концентрациями органических загрязнений и соединений азота по сравнению со значениями концентраций загрязняющих веществ в хозяйственно-бытовых сточных водах, получаемых расчетом в соответствии с СП 32.13330.2018 «Канализация. Наружные сети и сооружения», а также по отношению к большинству промышленных сточных вод. Согласно ГОСТ 25150-2024 «Канализация. Термины и определения», к НКСВ относятся сточные воды,



содержание БПК₅ в которых менее 150 мг/дм³. В российской практике понятие НКСВ встречается в контексте небольших населенных пунктов средней полосы Российской Федерации и северо-восточных регионов, объектов горной и камвольной промышленности, где сточные воды поступают с разной скоростью и агрегацией концентраций, что обуславливает необходимость адаптации биологических процессов к низким нагрузкам. Исследования состава сточных вод, поступающих на очистные сооружения от сверхмалой до небольшой производительности, [1] указывают на необходимость уточнения термина НКСВ. А. А. Кулаков в своей статье, описывающей особенности сооружений малой и средней производительности, делает вывод о том, что соотношения БПК₅/*N*_{общ} сильно расходятся: меньше 3 при расчетном значении 5,13, следовательно, денитрифицирующий потенциал неудовлетворительный. Например, при значении БПК₅=137,4 мг/дм³ (ниже среднего расчетного по СП.32.13330.2018 и удовлетворяет критерию ГОСТ 25150-2024), концентрация *N*_{общ}=52,1 мг/дм³ (выше средней расчетной концентрации). Таким образом, классифицировать сточные воды исключительно по значению концентрации органических веществ не вполне корректно. Цель исследования: разработать и обосновать системный критерий для идентификации и классификации НКСВ, выходящий за рамки формального параметра БПК₅ и включающий показатели концентрации азота и соотношения БПК₅/*N*_{общ}. На основе предложенного критерия провести сравнительный анализ и синтез современных подходов к очистке НКСВ, оценив их применимость для различных типов НКСВ в российских условиях.

Характеристики состава загрязняющих веществ низкоконцентрированных сточных вод

Определение НКСВ в литературе варьируется, обобщенно НКСВ трактуются как сточные воды, в которых концентрации растворенных веществ, органического вещества и азотсодержащих соединений существенно ниже характерных значений бытовых и промышленных сточных вод. Авторы в своих исследованиях рассмотрели источники образования НКСВ и выделили следующие типы:

– Хозяйственно-бытовую канализацию населенных пунктов, характеризующуюся низкой интенсивностью сточных вод, слабо выраженной нагрузкой по концентрациям органических веществ в совокупности с процессами инфильтрации в сети канализации ливневых и талых вод. Авторами был проведен анализ состава и концентраций загрязняющих веществ в сточных водах нескольких населенных пунктов с целью выявления закономерностей образования НКСВ, а также существующих способов их очистки. Обработка массива данных за период с 2022 по 2024 год по результатам контроля показателей загрязняющих веществ в поступающих сточных водах приведена ниже в виде сводной табл. 1:



Таблица 1

**НКСВ города в Челябинской области (население до 50000 человек,
производительность очистных сооружений до 24000 м³/сут.)**

№ п/п	Наименование вещества	Средние значения показателей на входе в КОС, мг/дм ³			
		2022	2023	2024	Среднее за 3 года
1	Температура	11,21	11,75	11,75	11,57
2	Взвешенные вещества	69,29	96,71	82,83	82,94
3	БПК ₅	63,92	52,19	64,48	60,20
4	Аммоний-ион	13,83	16,34	17,91	16,03
5	Нитрит-анион	0,6	0,54	0,54	0,56
6	Нитрат-анион	7,89	6,56	6,12	6,86
7	Фосфаты	0,76	1,04	1,21	1,00

НКСВ характеризуются умеренным БПК₅, значительным содержанием взвешенных веществ и аммонийного азота при относительно низком содержании фосфатов.

– Промышленные сточные воды некоторых отраслей, часто с дефицитом органических веществ, ввиду основных технологических процессов предприятия и/или большим количеством промывок оборудования, а также высоким значением коэффициента неравномерности. Ниже представлена сводная табл. 2 концентраций загрязняющих веществ, содержащихся в сточных водах камвольной фабрики:

Таблица 2

**НКСВ камвольной фабрики, производительность очистных сооружений до
1500 м³/сут.**

№ п/п	Наименование вещества	Средние значения показателей на входе в КОС за 2023 год, мг/дм ³
1	Температура	19,0
2	Взвешенные вещества	35,0
3	БПК ₅	22,4
4	Аммоний-ион	6,19
5	Нитрит-анион	0,19
6	Нитрат-анион	9,2
7	Фосфаты	2,19

НКСВ могут иметь крайне низкое БПК₅ при низком отношении БПК₅/N_{общ}, что указывает на выраженный дефицит органического субстрата для классической денитрификации.

– Смешанные сточные воды небольших населенных пунктов, где существенное влияние на концентрации загрязняющих веществ оказывает наличие промышленного предприятия (табл. 3):



Таблица 3

Смешанные НКСВ хозяйственно-бытовой канализации населенного пункта и швейного предприятия по выпуску специальной и рабочей одежды, производительность очистных сооружений до 700 м³/сут.

№ п/п	Наименование вещества	Средние значения показателей на входе в КОС за март 2025 года, мг/дм ³
1	Температура	12,0
2	Взвешенные вещества	29,0
3	БПК ₅	129,0
4	Аммоний-ион	37,7
5	Нитрит-анион	1,18
6	Нитрат-анион	0,57
7	Фосфаты	4,7

НКСВ демонстрируют, что наличие промышленного предприятия одной из специфичных отраслей может радикально изменить картину, приводя к повышенным концентрациям аммония при относительно невысоких значениях концентрации БПК₅ (табл. 4):

Таблица 4

Смешанные НКСВ хозяйственно-бытовой канализации населенного пункта и предприятия атомной промышленности, производительность очистных сооружений до 1300 м³/сут.

№ п/п	Наименование вещества	Средние значения показателей на входе в КОС, мг/дм ³			
		2022	2023	2024	Среднее за 3 года
1	Температура	11,88	12,03	11,43	11,78
2	Взвешенные вещества	11,73	17,02	15,01	14,59
3	БПК ₅	12,91	16,91	19,83	16,55
4	Аммоний-ион	9,30	11,56	17,13	12,66
5	Нитрит-анион	0,46	0,50	0,47	0,48
6	Нитрат-анион	3,05	3,33	4,74	3,71
7	Фосфаты	1,14	1,39	1,10	1,21

Анализ представленных данных мониторинга состава сточных вод из различных источников (города, камвольное, швейное, атомное производства) позволяет сформировать целостное представление о ключевых особенностях НКСВ. Первостепенным выводом является констатация того, что существующий нормативный критерий, основанный исключительно на величине БПК₅ (менее 150 мг/дм³), хотя и задает важный формальный ориентир, оказывается недостаточным для полной технологической характеристики таких сточных вод. Как демонстрируют фактические данные, даже при формальном соответствии этому порогу (например, БПК₅ 60–129 мг/дм³) концентрации аммонийного азота могут достигать 16,0–37,7 мг/дм³, что характерно уже для вод со средней концентрацией загрязняющих веществ. Это свидетельствует не об ошибочности критерия, а о необходимости его содержательного уточнения и дополнения для корректного проектирования.



Выявленное несоответствие между низким БПК₅ и значительным содержанием соединений азота является следствием принципиального разнообразия и специфичности состава НКСВ. Они не представляют собой однородную категорию: городские сточные воды характеризуются умеренным БПК₅ при повышенном содержании взвешенных веществ и аммония; промышленные стоки (например, камвольного производства) демонстрируют крайне низкое БПК₅ при наличии окисленных форм азота; а присутствие специфических предприятий (швейных, атомных) может приводить к иному дисбалансу. Это разнообразие состава закономерно приводит к тому, что универсальный технологический подход к их очистке невозможен. Критически низкое соотношение БПК₅/*N*_{общ} (часто менее 3), наблюдаемое во многих случаях, указывает на недостаток легкодоступного органического углерода для протекания классической денитрификации. Следовательно, актуальность приобретают процессы, не зависящие от внешнего органического субстрата или оптимизированные для работы в условиях его лимита [2].

Таким образом, комплексный анализ логично подводит к необходимости перехода от упрощенного параметрического определения к системному критерию для целей проектирования. Под НКСВ целесообразно понимать сточные воды, для которых характерно одновременное выполнение трех условий: низкая концентрация БПК₅ (15–80 мг/дм³), значительная концентрация общего азота (10–40 мг/дм³) при несбалансированном соотношении с БПК₅ (< 3), а также высокая гидравлическая и массовая неравномерность поступления. Ключевым отличительным признаком НКСВ, таким образом, является не просто низкая концентрация, а структурный дисбаланс между углеродом и азотом. Именно этот дисбаланс, а не формальное значение БПК₅, должен определять выбор и оптимизацию технологии очистки, смещая фокус в сторону специализированных биологических процессов.

Современные подходы к очистке НКСВ

Как уже отмечалось ранее, НКСВ характерны для очистных сооружений небольшой производительности, которые часто включают в себя блоки механической и биологической очистки, в том числе с использованием биофильтров и иммобилизованных загрузок [3, 4]. В таких системах ключевую роль играют процессы в биопленках, поскольку именно в этой форме микроорганизмы наиболее эффективно адаптируются к низким концентрациям субстрата и нестабильным гидравлическим нагрузкам. Исследования показывают, что использование загрузочных материалов (ершовых, полимерных и др.) способствует иммобилизации биомассы, повышению ее окислительной мощности и устойчивости к токсичным воздействиям [5, 6]. Таким образом, эффективность работы сооружений во многом определяется состоянием и кинетикой биопленки, что требует целенаправленного управления ее формированием и функционированием.

Современные решения для биологической очистки НКСВ ориентированы на обеспечение микроорганизмов в биопленке или в составе активного ила биореактора наиболее благоприятными условиями для их жизнедеятельности при низкой органической нагрузке. Эффективность работы очистных сооружений с НКСВ в значительной степени определяется не биологической активностью микроорганизмов, а лимитирующими диффузионными процессами в биопленке и конкурентным потреблением ключевых субстратов. Кинетика процессов в



био пленке описывается [7] моделями реакций нулевого и первого порядков, скорость которых лимитируется молекулярной диффузией субстрата вглубь био пленки. Критическим параметром является степень проникания (β) или модуль Тиле (Φ), которые определяют, является ли био пленка полностью проницаемой для субстрата ($\beta \geq 1$, реакция нулевого порядка) или частично проницаемой ($\beta < 1$, реакция переходит в порядок $1/2$ относительно концентрации в жидкости). На практике, при низких концентрациях субстратов в НКСВ и значительной толщине био пленки (порядка 1 мм и более), реализуется режим частичного проникания, и порядок реакции приближается к $1/2$.

Экспериментальные исследования на лабораторной капельной био фильтрующей колонне, работающей с модельными НКСВ, подтвердили существенную зависимость процесса очистки от характеристик образованной био пленки [8]. Моделирование выделяет два основных режима: диффузионный, характерный для толстых био пленок, где субстрат потребляется лишь в поверхностном слое, и кинетический, при котором относительно тонкая био пленка насыщена субстратом и работает по всему объему. Это подчеркивает, что для эффективной очистки НКСВ структурные особенности загрузочного материала, условия, создаваемые для развития микроорганизмов на поверхности загрузки, и гидравлические режимы должны обеспечивать формирование био пленки оптимальной толщины, минимизирующей диффузионные ограничения.

Исходя из этого, можно предположить, что ключевыми факторами являются не столько концентрация субстрата в общем объеме биореактора, сколько его локальная концентрация в непосредственном окружении микроорганизмов, которая регулируется процессами диффузии и потребления в био пленке. При этом важно отметить, что в условиях низких концентраций загрязняющих веществ субстратом для микроорганизмов в био пленке могут служить не только поступающие извне органические вещества, но и внутренние ресурсы самой био пленки – отмершие клетки и накопленная органика в ее толще. Как показано в работах по кинетике био пленок [2, 3], в нижних, анаэробных слоях био пленки происходит распад бактериальной массы, что обеспечивает дополнительный источник углерода и энергии для сообщества. Это позволяет поддерживать метаболическую активность даже при низких концентрациях органических веществ в поступающей воде, что особенно важно для очистки НКСВ с дефицитом легкодоступного субстрата. Таким образом, способность био пленки аккумулировать и утилизировать внутренние органические ресурсы является одним из ключевых механизмов ее устойчивости и эффективности в условиях низких нагрузок.

Исследование, выполненное на реальных очистных сооружениях Ножевниковой и соавт. [9], является яркой иллюстрацией работы этих принципов. Использование жесткой волокнистой загрузки создало идеальные условия для формирования биоценоза, в котором аэробные нитрификаторы во внешних слоях био пленки поставляют нитрит для анаэробных бактерий, расположенных в глубине. Это позволило реализовать процесс анаэробного окисления аммония (анаммокс), который традиционно считался прерогативой установок для обработки высококонцентрированных стоков. Прямыми методами было подтверждено присутствие анаммокс-бактерий в био пленках, а физиологические тесты зафиксировали сопряженное потребление аммония и нитрита в



стехиометрии, характерной для данного процесса. Вклад анаммокс в общее удаление азота был оценен в 1/3 эффективности, что является существенным показателем для бытовых стоков.

Таким образом, интеграция процесса анаммокс в технологические схемы очистки низкоконцентрированных сточных вод представляет собой перспективное направление [10]. Она позволяет достичь высокой степени удаления азота при снижении энергозатрат на аэрацию и уменьшении выхода избыточного ила, что подтверждает практическую значимость управления микробными сообществами в биопленках на основе современных физиологических и биохимических концепций.

На практике широко применяются еще два технологических подхода: дозирование внешнего источника органики и ацидофикация (преферментация) осадка.

Опыт эксплуатации очистных сооружений больничного комплекса, стоки которого характеризуются низким БПК₅ (в среднем 42,3 мг/дм³) и высоким содержанием общего азота (в среднем 43,4 мг/дм³) при соотношении БПК₅/N_{общ} около 0,95, наглядно демонстрирует проблему очистки НКСВ [11]. При таких условиях процессы денитрификации не протекают в полной мере, что приводит к высокому содержанию нитратов в очищенной воде. Для коррекции состава сточных вод и обеспечения денитрифицирующих бактерий необходимым органическим веществом применяется дозирование дополнительного внешнего субстрата. В исследованных условиях была подтверждена эффективность использования сахарозы. Эксперименты на параллельных технологических линиях показали, что дозирование раствора сахара в денитрификатор позволяет существенно повысить эффективность удаления азота. При оптимальной дозе субстрата 0,17 кг сахарозы на 1 м³ сточных вод сумма концентраций азотных соединений (N–NH₄, N–NO₂, N–NO₃) в очищенной воде на испытываемой линии была в среднем на 10–13 мг/дм³ ниже, чем на контрольной линии, работавшей без внешней подпитки. Однако применение легкоокисляемых субстратов, таких как сахароза, уксусная кислота или метанол, имеет свои недостатки: оно ведет к увеличению эксплуатационных расходов, а в случае некоторых реагентов (метанол) создает риски для персонала очистных сооружений. Кроме того, дополнительная органическая нагрузка может провоцировать интенсификацию пенообразования в аэробных зонах.

Альтернативным безреагентным методом восполнения дефицита органического субстрата является ацидофикация сырого осадка. Этот процесс, заключающийся в анаэробном гидролизе и ацидогенезе, приводит к образованию летучих жирных кислот (ЛЖК) – легкодоступного органического субстрата для фосфатаккумулирующих организмов (ФАО) и денитрифицирующих бактерий [12]. Внедрение ацидофикации позволяет интенсифицировать биологическое удаление азота и фосфора, снижая или полностью исключая потребность во внешних реагентах. Например, опыт реконструкции Курьяновских очистных сооружений в Москве, где один из первичных отстойников был переведен в режим ацидофикатора, показал дополнительное удаление 3,5 мг/дм³ азота и 0,23 мг/дм³ фосфатов [13]. Процесс может быть реализован различными способами: путем увеличения времени пребывания осадка в первичных отстойниках, в отдельных ферментерах-ацидофикаторах или непосредственно в анаэробной зоне биореактора.



Таким образом, ацидофикация также представляет собой перспективное направление для реконструкции и проектирования очистных сооружений, работающих с НКСВ, поскольку использует внутренний ресурс (сырой осадок) для решения ключевой проблемы дефицита углерода, способствуя энерго- и ресурсосбережению.

Заключение

Проведенный анализ позволяет сделать следующие ключевые выводы.

Во-первых, существующий нормативный критерий идентификации НКСВ, основанный лишь на величине БПК₅ (< 150 мг/дм³), является недостаточным. Как показали данные мониторинга, даже при низком БПК₅ концентрации азота могут быть значительными, что приводит к критически низкому соотношению БПК₅/ $N_{\text{общ}}$ (< 3). Поэтому НКСВ целесообразно определять по комплексу признаков: низкому БПК₅ (15–80 мг/дм³), высокому содержанию общего азота (10–40 мг/дм³), их дисбалансу и неравномерности поступления.

Во-вторых, основной проблемой очистки НКСВ становится эффективное удаление азота в условиях дефицита органического субстрата, что требует применения специализированных процессов.

В условиях низких концентраций загрязняющих веществ наиболее перспективными выступают технологии, минимизирующие диффузионные ограничения и позволяющие управлять структурой биопленки. Поэтому при проектировании и реконструкции очистных сооружений для НКСВ ключевое внимание следует уделять выбору и оптимизации систем, определяющих условия для микроорганизмов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кулаков, А. А. Малые очистные сооружения: исследование особенностей состава сточных вод и выбор технологических решений / А. А. Кулаков // Наилучшие доступные технологии водоснабжения и водоотведения. – 2023. – № 3. – С. 52–58. – EDN BYNYMN.
2. Данилович, Д. А. Анализ данных работы очистных сооружений российских городов – основа для технологического нормирования / Д. А. Данилович, А. Н. Эпов, М. А. Канунникова // Наилучшие доступные технологии водоснабжения и водоотведения. – 2015. – № 3-4. – С. 18–28. – EDN XQVCHF.
3. Гогина, Е. С. Разработка методики гидравлического и математического моделирования процессов глубокой очистки сточных вод от соединений азота на биофильтрах / Е. С. Гогина, О. В. Янцен, Т. Н. Бобылева // Промышленное и гражданское строительство. – 2018. – № 9. – С. 41–47. – EDN YLLDFR.
4. Каримов, Т. Х. Очистка сточных вод на биологических фильтрах из местного сырья Кыргызской Республики / Т. Х. Каримов // Современные инновации. – 2016. – № 10 (12). – С. 16–20. – EDN WVJKPR.
5. Кульков, В. Н. Использование иммобилизованного ила в аэротенке-биореакторе для интенсификации очистки сточных вод / В. Н. Кульков, Е. Ю. Солопанов, Р. Т. Камалов // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. – 2019. – Т. 9, № 1 (28). – С. 90–97. – EDN SATOIJ.
6. Биргер, Е. В. Оценка параметров биофильтра с затопленной загрузкой на доочистку биологически очищенных хозяйственно-бытовых сточных вод от аммонийного азота и БПК / Е. В. Биргер, В. А. Иванов, В. В. Лебедев // Отходы и ресурсы. – 2015. – Т. 2, № 3. – С. 1. – EDN WYQKPH.



7. Очистка сточных вод. Биологические и химические процессы / М. Хенце, П. Армозс, Й. Ля-Кур-Янсен, Э. Арван. – Москва : Мир, 2004. – 480 с. – ISBN 5-03-003771-3.

8. Февральских, О. В. Глубокая очистка хозяйственно-бытовых сточных вод от органических загрязнений и соединений азота на биофильтрах / О. В. Февральских // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. – 2025. – № 1. – С. 104–110. – DOI 10.22227/2311-1518.2025.1.104-110.

9. Анаэробное окисление аммония (анаммокс) в биопленках иммобилизованного активного ила при очистке сточных вод с низкой концентрацией загрязнений / А. Н. Ножевникова, Ю. В. Литти, В. К. Некрасова [и др.] // Микробиология. – 2012. – Т. 81, № 1. – С. 28. – EDN OOWKCR.

10. Спасибо, Е. В. Процесс Анаммокс в очистке сточных вод / Е. В. Спасибо // Дни студенческой науки : сборник докладов научно-технической конференции по итогам научно-исследовательских работ студентов Института инженерно-экологического строительства и механизации НИУ МГСУ, Москва, 01–05 марта 2021 года. – Москва : МИСИ-МГСУ, 2021. – С. 347–349. – EDN GVVUDA.

11. Пукемо, М. М. Особенности очистки сточных вод больницы / М. М. Пукемо, А. А. Кулаков, Р. В. Желтухин // Водоснабжение и санитарная техника. – 2021. – № 4. – С. 15–24. – DOI 10.35776/VST.2021.04.03. – EDN BWFPMN.

12. Гульшин, И. А. Ацидофикация осадка для эффективной очистки низкоконцентрированных сточных вод от биогенных элементов / И. А. Гульшин, В. А. Замотай, Д. М. Юн // Инженерный вестник Дона. – 2023. – № 3 (99). – С. 41–47. – EDN RRWKBQ.

13. Опыт внедрения метода ацидофикации на московских очистных сооружениях / М. В. Кевбрина, Д. В. Гаврилов, Н. А. Белов, А. М. Агарев // Наилучшие доступные технологии водоснабжения и водоотведения. – 2023. – № 2. – С. 42–56. – EDN OKRWXW.

KONDYURIN Nikolay Yurevich^{1,2}, postgraduate student of the chair of construction of water supply and sanitation systems and facilities¹, chief process engineer²; FEVRALSKIKH Olga Viktorovna^{1,3}, candidate of technical sciences, senior teacher of the chair of construction of water supply and sanitation systems and facilities¹, engineer³

LOW-CONCENTRATION WASTEWATER: DEVELOPMENT OF AN INTEGRATED CRITERION AND ANALYSIS OF BIOLOGICAL TREATMENT METHODS

¹ Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting.
23, Miklouho-Maclay St., Moscow, 117485, Russia.

Tel: (495) 255-15-10, e-mail: office@mgri.ru

² WT Expert LLC.

4, Malaya Dmitrovka St., build. 1/3, Moscow, 127006, Russia.

Tel: (495) 198-03-88, e-mail: n@knd88.ru

³ Scientific Research Institute of Building Physics of Russian Academy of Architecture and Constructions Sciences (RAACS).

21, Lokomotivny Proezd, Moscow, 127238, Russia.

Tel.: (495) 482-40-16; e-mail: olgafevralskih@yandex.ru

Key words: low-concentration wastewater, biological treatment, BOD/Nitrogen ratio, organic substrate deficiency.



The article addresses the problem of biological treatment of low-concentration wastewater (LCW). The authors argue that the existing regulatory criterion for LCW classification, based solely on the BOD_5 value (less than 150 mg/dm^3), is insufficient for process design. This is because it fails to account for high concentrations of nitrogen compounds and the critically low BOD_5/N_{total} ratio (<3) characteristic of such waters. The aim of the study is to develop a systematic criterion for identifying LCW that goes beyond BOD_5 and includes indicators of nitrogen concentration and their ratio. Based on an analysis of wastewater composition from various sources (small towns, worsted, garment, and nuclear industry facilities), an integrated criterion is substantiated. The article provides a comparative analysis of modern biological approaches to LCW treatment, including creating conditions for the anammox process, dosing external substrates, and sludge acidification. It is concluded that specialized technologies focused on energy-efficient nitrogen removal under conditions of organic carbon deficiency are necessary, where managing biofilm structure to minimize diffusion limitations plays a key role.

REFERENCES

1. Kulakov A. A. Malye ochestnye sooruzheniya: issledovanie osobennostey sostava stochnykh vod i vybor tekhnologicheskikh resheniy [Small wastewater treatment plants: study of wastewater composition features and selection of technological solutions]. Nailuchshie dostupnye tekhnologii vodosnabzheniya i vodootvedeniya [Best Available Technologies for Water Supply and Sanitation], 2023, № 3, P. 52–58. EDN BYHYMN.
2. Danilovich D. A., Epov A. N., Kanunnikova M. A. Analiz dannykh raboty ochestnykh sooruzheniy rossiyskikh gorodov – osnova dlya tekhnologicheskogo normirovaniya [Analysis of operational data from treatment facilities in Russian cities – a basis for technological regulation]. Nailuchshie dostupnye tekhnologii vodosnabzheniya i vodootvedeniya [Best Available Technologies for Water Supply and Sanitation], 2015, № 3-4, P. 18–28. EDN XQVCHF.
3. Gogina E. S., Yantsen O. V., Bobyleva T. N. Razrabotka metodiki gidravlicheskogo i matematicheskogo modelirovaniya protsessov glubokoy ochestki stochnykh vod ot soedineniy azota na biofiltrakh [Development of a methodology for hydraulic and mathematical modeling of advanced wastewater treatment processes for nitrogen compounds on biofilters]. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo [Industrial and Civil Engineering], 2018, № 9, P. 41–47. EDN YLLDFR.
4. Karimov T. Kh. Ochestka stochnykh vod na biologicheskikh filtrakh iz mestnogo syrya Kyrgyzskoy Respubliki [Wastewater treatment on biological filters made from local raw materials of the Kyrgyz Republic]. Sovremennye innovatsii [Modern Innovations], 2016, № 10 (12), P. 16–20. EDN WVJKPR.
5. Kulkov V. N., Soloponov E. Yu., Kamalov R. T. Ispolzovanie immobilizovannogo ila v aerotenke-bioreaktore dlya intensivatsii ochestki stochnykh vod [Use of immobilized sludge in an aeration tank-bioreactor to intensify wastewater treatment]. Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitelstvo. Nedvizhimost [News of Universities. Investments. Construction. Real Estate], 2019, Vol. 9, № 1 (28), P. 90–97. EDN SATOIJ.
6. Birger E. V., Ivanov V. A., Lebedev V. V. Otsenka parametrov biofiltra s zatoplennoy zagruzkoy na doochistku biologicheskii ochishchennykh khozyaystvenno-bytovykh stochnykh vod ot ammoniyynogo azota i BPK [Evaluation of parameters of a submerged media biofilter for post-treatment of biologically treated domestic wastewater from ammonium nitrogen and BOD]. Otkbody i resursy [Waste and Resources], 2015, Vol. 2, № 3, P. 1. EDN WYQKPH.
7. Khentse M., Armoes P., Lya-Kur-Yansen Y., Arvan E. Ochestka stochnykh vod. Biologicheskie i khimicheskie protsessy [Wastewater Treatment. Biological and Chemical Processes]. Moscow, Mir, 2004, 480 p. ISBN 5-03-003771-3.



8. Fevral'skikh O. V. Glubokaya ochildka khozyaystvenno-bytovykh stochnykh vod ot organicheskikh zagryazneniy i soedineniy azota na biofiltrakh [Advanced treatment of domestic wastewater from organic pollutants and nitrogen compounds on biofilters]. Biosfernaya sovместimost: chelovek, region, tekhnologii [Biospheric Compatibility: Man, Region, Technology], 2025, № 1, P. 104–110. DOI 10.22227/2311-1518.2025.1.104-110.

9. Nozhevnikova A. N., Litti Yu. V., Nekrasova V. K., [et al.] Anaerobnoe okislenie ammoniya (anamrnoks) v bioplenkakh immobilizovannogo aktivnogo ila pri ochildke stochnykh vod s nizkoy kontsentratsiey zagryazneniy [Anaerobic ammonium oxidation (anammox) in biofilms of immobilized activated sludge during treatment of low-strength wastewater]. Mikrobiologiya [Microbiology], 2012, Vol. 81, № 1, P. 28. EDN OOWKCR.

10. Spasibo E. V. Protsess Anamrnoks v ochildke stochnykh vod [The Anammox process in wastewater treatment]. Dni studencheskoy nauki [Days of Student Science]: sbornik dokladov nauchno-tekhnicheskoy konferentsii po itogam nauchno-issledovatel'skikh rabot studentov Instituta inzhenerno-ekologicheskogo stroitel'stva i mekhanizatsii NIU MGSU. Moscow, 01–05 marta 2021 goda. Moscow, MISI-MGSU, 2021, P. 347–349. EDN GVVUDA.

11. Pukemo M. M., Kulakov A. A., Zheltukhin R. V. Osobennosti ochildki stochnykh vod bolnitsy [Features of hospital wastewater treatment]. Vodospabzhenie i sanitarnaya tekhnika [Water Supply and Sanitary Engineering], 2021, № 4, P. 15–24. DOI 10.35776/VST.2021.04.03. EDN BWFPMN.

12. Gulshin I. A., Zamotay V. A., Yun D. M. Atsidifikatsiya osadka dlya effektivnoy ochildki nizkokontsentrirrovannykh stochnykh vod ot biogennykh elementov [Sludge acidification for effective removal of nutrients from low-concentration wastewater]. Inzhenernyy vestnik Dona [Engineering Journal of Don], 2023, № 3 (99), P. 41–47. EDN RRWKBQ.

13. Kevbrina M. V., Gavrilov D. V., Belov N. A., Agarev A. M. Opyt vnedreniya metoda atsidifikatsii na moskovskikh ochildnykh sooruzheniyakh [Experience in implementing the acidification method at Moscow treatment facilities]. Nailuchshie dostupnye tekhnologii vodospabzheniya i vodootvedeniya [Best Available Technologies for Water Supply and Sanitation], 2023, № 2, P. 42–56. EDN OKRWXW.

© Н. Ю. Кондюрин, О. В. Февральских, 2026

Получено: 19.12.2025 г.