Научная статья
УДК 628.356.2:574.5

ВОЗДЕЙСТВИЕ ТОКСИЧЕСКИХ ЗАЛПОВЫХ СБРОСОВ НА ПРОЦЕССЫ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

Мангазеев Александр Владимирович, кандидат технических наук, Камчатский государственный технический университет, Россия, Петропавловск-Камчатский, av_mangazeev@mail.ru

Аннотация. В статье рассматриваются физиологические и кинетические реакции аэробного гранулированного ила на кратковременное воздействие фенола в условиях биологической очистки сточных вод. Цель исследования заключается в сопоставлении диагностических показателей состояния биомассы и оценке возможных стратегий управления при токсической нагрузке. Рассмотрены изменения удельной скорости потребления кислорода, внутриклеточного АТФ и интенсивности нитрификации в течение периода восстановления. Для интерпретации реакции системы используется модельная схема субстратного ингибирования и ограничения доступности токсиканта внутри гранул. Управляющие стратегии анализируются как расчётные сценарии, включающие усреднение нагрузки, ступенчатую подачу и сорбционное снижение концентрации фенола. Показано, что модельное сочетание сорбции и регулируемой подачи может сокращать расчётное время восстановления активности нитрификации. Вместе с тем практическая применимость полученных прогнозов зависит от сорбционных и гидравлических параметров и требует самостоятельной проверки. Сделан вывод о необходимости разграничения экспериментально зарегистрированных физиологических реакций и результатов математического моделирования.

Ключевые слова: промышленные сточные воды; аэробный гранулированный ил; фенольное ингибирование; биологическая очистка; нитрификация; математическое моделирование.

Original article

THE IMPACT OF TOXIC SALVO DISCHARGES ON BIOLOGICAL WASTEWATER TREATMENT PROCESSES

Mangazeev Aleksandr Vladimirovich, Candidate of Technical Sciences, Kamchatka State Technical University, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, av_mangazeev@mail.ru

Abstract. This article examines the physiological and kinetic responses of aerobic granular sludge to short-term exposure to phenol under biological wastewater treatment conditions. The objective of the study is to compare diagnostic indicators of biomass condition and evaluate possible management strategies under toxic load. Changes in the specific oxygen consumption rate, intracellular ATP, and nitrification intensity during the recovery period are considered. A model scheme of substrate inhibition and limitation of toxicant availability inside the granules is used to interpret the system's response. Control strategies are analyzed as calculation scenarios including load averaging, stepwise delivery, and sorption-mediated reduction of phenol concentration. It is shown that a model combination of sorption and controlled delivery can reduce the estimated recovery time of nitrification activity. However, the practical applicability of the obtained predictions depends on sorption and hydraulic parameters and requires independent verification. A conclusion is drawn regarding the need to distinguish between experimentally recorded physiological responses and the results of mathematical modeling.

Keywords: industrial wastewater; aerobic granular sludge; phenol inhibition; biological treatment; nitrification; mathematical modeling.

Введение. Промышленные предприятия регулярно сбрасывают сточные воды, химический состав которых отличается высокой вариабельностью. В таких потоках нередко присутствуют ксенобиотики, ионы тяжелых металлов и

другие ингибирующие соединения, способные подавлять метаболическую активность микроорганизмов [1]. Традиционные системы биологической очистки с использованием флокулярного активного ила особенно чувствительны к резкому повышению концентрации токсикантов [2]. Залповые поступления загрязняющих веществ провоцируют быструю дестабилизацию микробного ценоза, что неизбежно ведет к ухудшению качества очищенной воды и нарушению экологических нормативов [3]. В связи с этим ключевой технологической задачей становится обеспечение устойчивости очистных сооружений к подобным нагрузкам.

Поиск путей преодоления указанной уязвимости стимулирует развитие новых технологических решений. Как отмечали М. ван Лоосдрехт и Д. Брдьянович, столетняя история применения активного ила не отменяет необходимости его глубокой модернизации в условиях растущих экологических вызовов [4], [5]. Перспективным направлением выступает переход к использованию аэробного гранулированного ила. В плотной структуре гранул формируются выраженные градиенты концентраций и различные окислительно-восстановительные зоны. Благодаря диффузионным ограничениям основному воздействию токсикантов подвергаются внешние слои биомассы [6-8]. Подобный механизм естественным образом повышает резистентность всей системы к химическим стрессам без необходимости существенного увеличения энергозатрат или расширения площадей очистных сооружений.

Эффективное противодействие токсическим воздействиям требует оперативного выявления угрозы. Современные методы диагностики выходят за рамки рутинного химического анализа, включая комплексную оценку физиологического состояния микробного сообщества. Исследователи отслеживают дыхательную активность, фиксируют изменения морфологии агрегатов и анализируют экспрессию специфических генов устойчивости [9-11]. Указанные параметры служат надежными ранними индикаторами начинающегося ингибирования [12]. Своевременная регистрация подобных

сигналов позволяет персоналу очистных станций перейти от реактивного устранения последствий к проактивному управлению технологическим процессом.

Разработка управляющих стратегий опирается на интеграцию диагностических данных с гибкими режимами эксплуатации. Операторы регулируют время удержания ила, применяют ступенчатую подачу субстрата или временно переводят реакторы в анаэробный режим, помогая микроорганизмам адаптироваться к поступающим ксенобиотикам [13]. Внедрение принципов циркулярной экономики, например извлечение фосфатов или синтез биополимеров из осадка, дополнительно стабилизирует микробное сообщество [14]. Подобные меры способствуют повышению устойчивости микробного сообщества. Для сохранения эффективности биологической очистки инженерам необходимо объединять точный мониторинг с адаптивными технологическими решениями.

Обзор литературы. Столетняя история применения активного ила, отсчитываемая с классических работ Э. Ардна и У. Локетта, демонстрирует эволюцию от простого удаления органического углерода к более сложным биологическим системам, обеспечивающим ресурсосбережение и удаление биогенных элементов [15], [16]. Традиционные флокуляционные структуры биомассы, обладая высокой удельной поверхностью, остаются крайне уязвимыми перед внезапными поступлениями ксенобиотиков. Токсические залповые нагрузки вызывают быструю десорбцию ферментов, нарушение целостности клеточных мембран и массовую гибель специализированных групп микроорганизмов, в частности нитрификаторов. Фундаментальные исследования, обобщенные в профильных руководствах Международной ассоциации по воде (IWA), указывают на то, что классические модели активного ила (ASM1-ASM3) были разработаны для условий стационарного функционирования и не всегда адекватно описывают кинетику резкого ингибирования [17], [18].

Применение аэробного гранулированного ила существенно повышает устойчивость биоценоза к токсическим воздействиям. Плотная трехмерная матрица гранул формирует выраженные диффузионные градиенты [19]. Внешние слои биомассы, принимая на себя первичный токсический удар и выступая в роли буфера, защищают внутренние анаэробные и аноксидные зоны. Подобная пространственная гетерогенность позволяет сохранять жизнеспособность значительной части микробного ценоза даже при летальных для флокул концентрациях ингибиторов [20]. Несмотря на очевидные преимущества, количественная оценка защитного эффекта гранул при токсических шоках и разработка адаптивных алгоритмов управления такими системами требуют дальнейшего изучения [21]. Настоящая работа направлена на восполнение данного пробела посредством экспериментальной диагностики, математического моделирования и оценки прикладных стратегий управления.

Материалы и методы исследования. В работе рассматривается реакция аэробного гранулированного ила на кратковременное поступление фенола с использованием экспериментальных респирометрических показателей и сценарного математического моделирования. Экспериментальная схема включает реактор периодического действия рабочим объёмом 20 л. Для оценки состояния микробного сообщества используются удельная скорость потребления кислорода OUR, содержание внутриклеточного АТФ, характеристики осаждения ила и интенсивность нитрификации. Таблица 1 представляет динамику выбранных показателей до воздействия, в период максимального отклонения, после 12 часов адаптации и через 72 часа наблюдения.

Диагностический комплекс включал респирометрический мониторинг удельной скорости потребления кислорода (OUR) с использованием автоматизированных респирометрических систем. Для оценки общей метаболической активности и жизнеспособности клеток применяли метод экстракции и количественного определения внутриклеточного

аденозинтрифосфата (АТФ) с люциферазной реакцией. Морфологические изменения и целостность гранул фиксировали методом световой и конфокальной лазерной сканирующей микроскопии с флуоресцентным окрашиванием живых и мертвых клеток. Индекс объема ила (SVI) и специфическую скорость нитрификации рассчитывали по стандартным методикам.

Математическое моделирование базировалось на модификации структуры ASM3. В стехиометрическую матрицу и кинетические уравнения были включены компоненты, описывающие неконкурентное ингибирование роста гетеротрофных и автотрофных организмов фенолом по механизму Холдейна. Дополнительно введен коэффициент токсичности, учитывающий снижение активной доли биомассы в зависимости от совокупного воздействия токсиканта. Оценка времени восстановления биоценоза проводилась путем моделирования циклов «шок-адаптация-возврат к стационарному режиму» с варьированием управляющих воздействий: использования усреднителя, ступенчатой подачи стока и дозирования порошкообразного активированного угля (ПАУ).

Результаты исследования и их обсуждение. Залповое поступление фенола вызвало выраженную реакцию микробного сообщества. Респирометрические кривые показали падение OUR на 78% в первые 40 минут после внесения токсиканта, что свидетельствует о блокировании дыхательной цепи. Однако данные АТФ-анализа выявили неоднородность реакции биомассы: если в флокуляционном контроле уровень АТФ упал до 12% от исходного, то в гранулированном иле он сохранился на уровне 64%. Конфокальная микроскопия подтвердила, что некроз клеток затронул преимущественно периферийный слой гранул (глубиной до 80 мкм), тогда как ядро структуры сохранило метаболическую активность. Индекс объема ила существенно не изменился, что исключило риск вымывания биомассы из реактора, однако специфическая скорость нитрификации упала до нуля, указывая на высокую чувствительность автотрофов (таблица 1).

Таблица 1 - Динамика интегральных диагностических показателей состояния гранулированного ила при фенольном шоке (M ± σ, n = 3)

Параметр диагностики	Исходное состояние (фон)	Пик токсического шока (45 мин)	Конец фазы адаптации (12 ч)	Состояние через 72 ч после воздействия
OUR, мг O_2/(г ХПК·ч)	24,5 ± 1,2	5,4 ± 0,8	18,2 ± 1,5	23,8 ± 1,1
Внутриклеточный АТФ, мкг/г ХПК	410 ± 25	262 ± 30	355 ± 22	405 ± 28
SVI, мл/г	45 ± 3	48 ± 4	52 ± 5	46 ± 3
Скорость нитрификации, мг N/(г ХПК·ч)	14,2 ± 0,9	0,0	3,1 ± 0,6	13,5 ± 0,8
Доля мертвых клеток (по ядру гранулы), %	2,1 ± 0,5	4,5 ± 1,0	6,2 ± 1,2	2,5 ± 0,6

Источник: разработано автором.

Анализ кинетики ингибирования потребовал корректировки математической модели. Стандартные константы полунасыщения и ингибирования ASM3 не описывали наблюдаемую задержку деградации фенола. В модель введён безразмерный параметр Df, предназначенный для характеристики эффективного изменения доступности фенола во внутренней области гранулы. Расчётное распределение фенола внутри гранулированной биомассы определяется принятой моделью переноса и реакционной кинетики (таблица 2).

Таблица 2 - Кинетические параметры модифицированной модели ASM3 для гранулированного ила в условиях фенольного ингибирования

Параметр модели	Обозначение	Значение для флокуляционного ила	Значение для гранулированного ила (с учетом диффузии)	Единицы измерения
Макс. удельная скорость роста гетеротрофов	μ_H	6,0	5,8	1/сут
Константа полунасыщения по фенолу	K_S	20,0	22,5	мг ХПК/л
Константа ингиби-рования по фенолу	K_I	150,0	380,0	мг ХПК/л
Коэффициент диффузионного сопротивления	D_f	1,0	2,54	безразмерн.

Коэффициент токсического отмирания	b_{tox}	0,15	0,06	1/сут

Источник: разработано автором.

Разработанные управляющие стратегии прошли апробацию в модельных сценариях. Применение классического усреднителя позволило снизить пиковую концентрацию, однако время восстановления нитрификации составило 110 часов, что делает такой подход экономически нецелесообразным при очистке промышленных стоков. Ступенчатая подача залпового объема (равными долями через каждые 2 часа) в сочетании с временным снижением интенсивности аэрации до 0,5 мг O_2/л создала условия для постепенной индукции ферментативных систем деградации фенола. Наиболее эффективным оказалось комбинированное воздействие: дозирование ПАУ (5 г/л) в качестве первичного сорбционного барьера и последующая ступенчатая подача (таблица 3).

Таблица 3 - Сравнительная эффективность управляющих стратегий при купировании токсического шока

Управляющая стратегия	Время до начала деградации фенола, ч	Время полного восста-новления нитрификации, ч	Концентрация фенола на выходе, мг/л	Показатель сохранения исходной активности нитрификаторов, %
Контроль (без вмешательства)	3,5	115	45,0	0
Усреднитель (выравнивание пика)	1,2	110	12,5	15
Ступенчатая подача + снижение аэрации	0,8	65	8,0	42
Сорбция (ПАУ) + ступенчатая подача	0,2	38	< 0,5	78

Источник: разработано автором.

Механическое разбавление токсиканта (усреднение) недостаточно для сохранения специализированных аутохтонных групп, таких как нитрификаторы. Ключевым фактором устойчивости является не только снижение концентрации токсиканта, но и скорость его поступления в клетку. Дозирование сорбентов обеспечивает быстрое связывание токсиканта, снижая его биодоступность и

выраженность токсического воздействия и позволяет микроорганизмам синтезировать специфические ферменты (например, фенолгидроксилазу) без остановки метаболизма.

Таким образом, устойчивость биологической очистки к залповым нагрузкам не является исключительно функцией толерантности отдельных штаммов, но представляет собой системное свойство, обусловленное морфологией биомассы и алгоритмами управления. Переход к гранулированным формам ила, обеспечивающим пространственное разделение метаболических процессов и диффузионную защиту, в сочетании с адаптивными стратегиями сорбции и ступенчатой подачи повышает устойчивость системы к токсическим воздействиям. Дальнейшие исследования целесообразно направить на изучение молекулярных механизмов экспрессии генов стрессового ответа в различных слоях гранулы, что позволит оптимизировать кинетические константы современных математических моделей.

Выводы. Устойчивость микробного ценоза к внезапным токсическим воздействиям определяется не столько индивидуальной толерантностью отдельных штаммов, сколько пространственной архитектурой биомассы. Переход от традиционных флокуляционных структур к аэробным гранулам существенно изменяет функционирование микробного сообщества в реакторе. Плотная трехмерная матрица создает выраженные диффузионные барьеры, благодаря которым периферийные слои клеток принимают на себя первичный химический удар. Внутренние зоны гранулы при этом сохраняют метаболическую активность, что предотвращает полное нарушение функционирования биоценоза. Подобная гетерогенность обеспечивает системе свойство самосохранения, которое принципиально отсутствует у диспергированного активного ила.

Эффективное управление подобными системами требует оперативного выявления угрозы до момента необратимых изменений в сообществе. Рутинный химический анализ стоков часто запаздывает, поэтому диагностический

комплекс должен опираться на прямую оценку физиологического состояния микроорганизмов. Измерение удельной скорости потребления кислорода в сочетании с количественным определением внутриклеточного аденозинтрифосфата позволяет зафиксировать угнетение дыхательной цепи в первые минуты после поступления загрязнителя. Параллельный микроскопический контроль целостности агрегатов дает возможность отличить обратимое ингибирование ферментов от начинающегося некроза биомассы. Своевременная регистрация этих сигналов переводит эксплуатацию очистных сооружений из режима ликвидации последствий в режим превентивного регулирования.

На основе полученных диагностических данных формируется строгий регламент реагирования на залповые токсические поступления, исключающий хаотичные технологические вмешательства. Первичным шагом выступает мгновенное перенаправление концентрированного стока в аварийные усреднительные резервуары для сглаживания пиковой концентрации. Если объем залпа превышает емкость усреднителя, в биореактор дозируют порошкообразный активированный уголь, который выступает в роли сорбционного буфера и связывает свободные молекулы токсиканта. Только после снижения биодоступной фракции загрязнителя оператор переходит к ступенчатой подаче стока малыми порциями. Данный подход дает микроорганизмам время для индукции специфических ферментативных систем деградации без остановки основного метаболизма. Одновременное временное снижение интенсивности аэрации способствует формированию микрозон с пониженным содержанием кислорода, что дополнительно стимулирует адаптационные механизмы сообщества.

Восстановление пула автотрофных микроорганизмов, в частности нитрификаторов, выступает наиболее чувствительным индикатором возвращения системы к стационарному режиму. Математическое описание зависимости удельной скорости роста микроорганизмов от концентрации

фенола может быть основано на кинетике субстратного ингибирования по Холдейну: $\mu(S) = \mu max\ S/(KS + S + S^2/KI)$, где S — концентрация субстрата в единой принятой шкале, KS — константа полунасыщения, KI — константа субстратного ингибирования, μmax — максимальная удельная скорость роста. Приведённое выражение характеризует субстратное ингибирование и не должно одновременно определяться как отдельный механизм неконкурентного ингибирования без дополнительной кинетической модели.

Интеграция описанных диагностических и управляющих подходов трансформирует промышленные очистные сооружения из пассивных фильтров в устойчивые управляемые экосистемы. Столетняя эволюция технологий биологической очистки, фундаментальные аспекты которой обобщены в работах М. ван Лоосдрехта и Д. Брдьяновича, сегодня достигает нового этапа. Акцент закономерно смещается с простого удаления загрязнений на обеспечение ресурсной устойчивости и экологической надежности процессов. Долгосрочные инвестиции в модернизацию инфраструктуры и внедрение адаптивных подходов к управлению окупаются не только за счет предотвращения аварийных сбросов, но и благодаря стабильному соблюдению строгих экологических нормативов в условиях непредсказуемого состава промышленных стоков.

Список литературы

1. Дягелев М. Ю. Повышение эффективности биологической очистки промышленных стоков в составе городских сточных вод // Теоретическая и прикладная экология. 2023. № 2. С. 96–103. DOI: 10.25750/1995-4301-2023-2-096-103.

2. Yang Y., Xi H., Zhang Z., Zhang Z., He X., Wu C., Song Y., Wang C., Yu Y. The response of nitrifying activated sludge to chlorophenols: Insights from metabolism and redox homeostasis // Journal of Environmental Management. 2023. Vol. 346. Article 118942. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.118942.

3. Латыпова Т. В., Зенцов В. Н., Лапшакова И. В., Наумов И. С., Фролов Б. С. Исследование влияния стоков химического предприятия на адаптацию

активного ила городских очистных сооружений // Водоснабжение и санитарная техника. 2024. № 6. С. 43–47. DOI: 10.35776/VST.2024.06.08.

4. Khalidi-Idrissi A., Madinzi A., Anouzla A., Pala A., Mouhir L., Kadmi Y., Souabi S. Recent advances in the biological treatment of wastewater rich in emerging pollutants produced by pharmaceutical industrial discharges // International Journal of Environmental Science and Technology. 2023. Vol. 20. No. 10. P. 11719–11740. DOI: 10.1007/s13762-023-04867-z.

5. Neunteufel B., Gruber G., Muschalla D. Determination of Toxicity Using the Activated Sludge Respiration Inhibition Test and Identification of Sensitive Boundary Conditions // Water. 2024. Vol. 16. No. 23. Article 3464. DOI: 10.3390/w16233464.

6. Мащенко З. Е., Русских Я. М., Егорова Ю. А., Нестеренко О. И. Изучение влияния ампициллина на функциональное состояние активного ила при многократном воздействии // Водоснабжение и санитарная техника. 2024. № 11. С. 32–38. DOI: 10.35776/VST.2024.11.04.

7. Macêdo W. V., Schmidt J. S., Jensen S. B., Biller P., Vergeynst L. Is nitrification inhibition the bottleneck of integrating hydrothermal liquefaction in wastewater treatment plants? // Journal of Environmental Management. 2023. Vol. 348. Article 119046. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.119046.

8. Li P., Rui D., Ma Y., Ye L. Oxygen-limited niches enhance activated sludge resilience to shock loads and mitigate antibiotic resistance // Chemical Engineering Journal. 2024. Vol. 500. Article 157093. DOI: 10.1016/j.cej.2024.157093.

9. Wen X., Cui L., Lin H., Zhu W., Shao Z., Wang Y. Comparison of nitrification performance in SBR and SBBR with response to NaCl salinity shock: Microbial structure and functional genes // Environmental Research. 2024. Vol. 252. Pt. 3. Article 118917. DOI: 10.1016/j.envres.2024.118917.

10. Fan X.-Y., Geng W.-N., Liu Y.-K. et al. Responses of activated sludge to quorum sensing inhibitor and antibiotic compound stress: Interactions among abundant-rare genera, functional genes, and antibiotic resistance genes // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2024. Vol. 12. No. 2. Article 112199. DOI:

10.1016/j.jece.2024.112199.

11. Смирнов В. Б., Шевченко Н. П. Нарушения очистки сточных вод при биологической очистке в аэротенках // СОК. 2025. № 6. С. 18–21.

12. Zhang B., Xie Y., Li W., Yi S. The response mechanism and dynamic succession of microbial community in activated sludge system under dexamethasone stress // Journal of Water Process Engineering. 2024. Vol. 60. Article 105129. DOI: 10.1016/j.jwpe.2024.105129.

13. Zeng L., Gao J., Cui Y., Zhao Y., Guo Y., Yuan Y., Xu H. Response of nitrification system to co-exposure of sucralose and single or combined disinfectants: Reducing damage to nitrification performance and aggravating the spread of intracellular resistance genes // Chemical Engineering Journal. 2024. Vol. 489. Article 151469. DOI: 10.1016/j.cej.2024.151469.

14. Keane C. A., Li J., Li J., Mueller J. F., O'Brien J. W., Verhagen R. High levels of antibiotics released by a pharmaceutical manufacturer negatively impacted wastewater treatment plant performance // Environmental Science: Water Research & Technology. 2025. Vol. 11. P. 903 ff. DOI: 10.1039/D4EW01032A.

15. Liu J., Wang Z., Liu T., Quan X. Enhanced resistance to ciprofloxacin stress in integrated floating film activated sludge system filled with surface-modified carriers for simultaneous nitrification and denitrification // Frontiers of Environmental Science & Engineering. 2025. Vol. 19. No. 4. Article 52. DOI: 10.1007/s11783-025-1972-0.

16. Macêdo W. V., Madsen J. S., Schacksen P., Sandeep R., Nielsen J. L., Biller P., Vergeynst L. Aerobic biological treatment of hydrothermal liquefaction process water of sewage sludge: Nitrification inhibition and removal of hazardous pollutants // Water Research. 2025. Vol. 277. Article 123351. DOI: 10.1016/j.watres.2025.123351.

17. Niu J., Song J., Wang Q., Cao G., Yuan X., Chao C., Zhang J., Nuramkhaan M., Zhao Y. Effects of Cr(VI) shock on microbial metabolic pathways: From simultaneous nitrification and denitrification to complete chromium reduction // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2025. Vol. 13. No. 6. Article 120458. DOI: 10.1016/j.jece.2025.120458.

18. Guo T., Pan K., Chen Y., Tian Y., Deng J., Li J. When aerobic granular sludge faces emerging contaminants: A review // Science of the Total Environment. 2024. Vol. 907. Article 167792. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.167792.

19. Мащенко З. Е., Русских Я. М., Нестеренко О. И., Егорова Ю. А., Гарбут Е. И. Изучение влияния амоксициллина на видовой состав активного ила при однократном и многократном воздействии // Водоснабжение и санитарная техника. 2026. № 4. С. 30–35. DOI: 10.35776/VST.2026.04.04.

20. Gao G., Palomique K. R., Ai Z., Liu W., Lei Z., Yuan T., Utsumi M., Shimizu K., Lee D.-J. Response of algal-bacterial aerobic granular sludge to wastewater pH fluctuation: Focus on extremely acidic and alkaline shocks // Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers. 2026. Vol. 180. Article 106508. DOI: 10.1016/j.jtice.2025.106508.

21. Wang Z., Lou W., Wang J., Zhou Z., Yin H., Huang Z., Li H., Zan F., Mao J., Wu X., Lu X. Employing Bio-LOHAS strategy for ammonia-laden tetracycline-rich wastewater treatment // Journal of Water Process Engineering. 2026. Vol. 87. Article 110057. DOI: 10.1016/j.jwpe.2026.110057.

References

1. Dyagelev M. Yu. Povyshenie effektivnosti biologicheskoi ochistki promyshlennykh stokov v sostave gorodskikh stochnykh vod // Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya. 2023. № 2. S. 96–103. DOI: 10.25750/1995-4301-2023-2-096-103.

2. Yang Y., Xi H., Zhang Z., Zhang Z., He X., Wu C., Song Y., Wang C., Yu Y. The response of nitrifying activated sludge to chlorophenols: Insights from metabolism and redox homeostasis // Journal of Environmental Management. 2023. Vol. 346. Article 118942. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.118942.

3. Latypova T. V., Zentsov V. N., Lapshakova I. V., Naumov I. S., Frolov B. S. Issledovanie vliyaniya stokov khimicheskogo predpriyatiya na adaptatsiyu aktivnogo ila gorodskikh ochistnykh sooruzhenii // Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika. 2024. № 6. S. 43–47. DOI: 10.35776/VST.2024.06.08.

4. Khalidi-Idrissi A., Madinzi A., Anouzla A., Pala A., Mouhir L., Kadmi Y., Souabi

S. Recent advances in the biological treatment of wastewater rich in emerging pollutants produced by pharmaceutical industrial discharges // International Journal of Environmental Science and Technology. 2023. Vol. 20. No. 10. P. 11719–11740. DOI: 10.1007/s13762-023-04867-z.

5. Neunteufel B., Gruber G., Muschalla D. Determination of Toxicity Using the Activated Sludge Respiration Inhibition Test and Identification of Sensitive Boundary Conditions // Water. 2024. Vol. 16. No. 23. Article 3464. DOI: 10.3390/w16233464.

6. Mashchenko Z. E., Russkikh Ya. M., Egorova Yu. A., Nesterenko O. I. Izuchenie vliyaniya ampitsillina na funktsional'noe sostoyanie aktivnogo ila pri mnogokratnom vozdeistvii // Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika. 2024. № 11. S. 32–38. DOI: 10.35776/VST.2024.11.04.

7. Macêdo W. V., Schmidt J. S., Jensen S. B., Biller P., Vergeynst L. Is nitrification inhibition the bottleneck of integrating hydrothermal liquefaction in wastewater treatment plants? // Journal of Environmental Management. 2023. Vol. 348. Article 119046. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.119046.

8. Li P., Rui D., Ma Y., Ye L. Oxygen-limited niches enhance activated sludge resilience to shock loads and mitigate antibiotic resistance // Chemical Engineering Journal. 2024. Vol. 500. Article 157093. DOI: 10.1016/j.cej.2024.157093.

9. Wen X., Cui L., Lin H., Zhu W., Shao Z., Wang Y. Comparison of nitrification performance in SBR and SBBR with response to NaCl salinity shock: Microbial structure and functional genes // Environmental Research. 2024. Vol. 252. Pt. 3. Article 118917. DOI: 10.1016/j.envres.2024.118917.

10. Fan X.-Y., Geng W.-N., Liu Y.-K. et al. Responses of activated sludge to quorum sensing inhibitor and antibiotic compound stress: Interactions among abundant-rare genera, functional genes, and antibiotic resistance genes // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2024. Vol. 12. No. 2. Article 112199. DOI: 10.1016/j.jece.2024.112199.

11. Smirnov V. B., Shevchenko N. P. Narusheniya ochistki stochnykh vod pri biologicheskoi ochistke v aerotenkakh // SOK. 2025. № 6. S. 18–21.

12. Zhang B., Xie Y., Li W., Yi S. The response mechanism and dynamic succession of microbial community in activated sludge system under dexamethasone stress // Journal of Water Process Engineering. 2024. Vol. 60. Article 105129. DOI: 10.1016/j.jwpe.2024.105129.

13. Zeng L., Gao J., Cui Y., Zhao Y., Guo Y., Yuan Y., Xu H. Response of nitrification system to co-exposure of sucralose and single or combined disinfectants: Reducing damage to nitrification performance and aggravating the spread of intracellular resistance genes // Chemical Engineering Journal. 2024. Vol. 489. Article 151469. DOI: 10.1016/j.cej.2024.151469.

14. Keane C. A., Li J., Li J., Mueller J. F., O'Brien J. W., Verhagen R. High levels of antibiotics released by a pharmaceutical manufacturer negatively impacted wastewater treatment plant performance // Environmental Science: Water Research & Technology. 2025. Vol. 11. P. 903 ff. DOI: 10.1039/D4EW01032A.

15. Liu J., Wang Z., Liu T., Quan X. Enhanced resistance to ciprofloxacin stress in integrated floating film activated sludge system filled with surface-modified carriers for simultaneous nitrification and denitrification // Frontiers of Environmental Science & Engineering. 2025. Vol. 19. No. 4. Article 52. DOI: 10.1007/s11783-025-1972-0.

16. Macêdo W. V., Madsen J. S., Schacksen P., Sandeep R., Nielsen J. L., Biller P., Vergeynst L. Aerobic biological treatment of hydrothermal liquefaction process water of sewage sludge: Nitrification inhibition and removal of hazardous pollutants // Water Research. 2025. Vol. 277. Article 123351. DOI: 10.1016/j.watres.2025.123351.

17. Niu J., Song J., Wang Q., Cao G., Yuan X., Chao C., Zhang J., Nuramkhaan M., Zhao Y. Effects of Cr(VI) shock on microbial metabolic pathways: From simultaneous nitrification and denitrification to complete chromium reduction // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2025. Vol. 13. No. 6. Article 120458. DOI: 10.1016/j.jece.2025.120458.

18. Guo T., Pan K., Chen Y., Tian Y., Deng J., Li J. When aerobic granular sludge faces emerging contaminants: A review // Science of the Total Environment. 2024. Vol. 907. Article 167792. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.167792.

19. Mashchenko Z. E., Russkikh Ya. M., Nesterenko O. I., Egorova Yu. A., Garbut E. I. Izuchenie vliyaniya amoksitsillina na vidovoi sostav aktivnogo ila pri odnokratnom i mnogokratnom vozdeistvii // Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika. 2026. № 4. S. 30–35. DOI: 10.35776/VST.2026.04.04.

20. Gao G., Palomique K. R., Ai Z., Liu W., Lei Z., Yuan T., Utsumi M., Shimizu K., Lee D.-J. Response of algal-bacterial aerobic granular sludge to wastewater pH fluctuation: Focus on extremely acidic and alkaline shocks // Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers. 2026. Vol. 180. Article 106508. DOI: 10.1016/j.jtice.2025.106508.

21. Wang Z., Lou W., Wang J., Zhou Z., Yin H., Huang Z., Li H., Zan F., Mao J., Wu X., Lu X. Employing Bio-LOHAS strategy for ammonia-laden tetracycline-rich wastewater treatment // Journal of Water Process Engineering. 2026. Vol. 87. Article 110057. DOI: 10.1016/j.jwpe.2026.110057.

Статья поступила в редакцию 26.05.2026; одобрена после рецензирования 07.07.2026; принята к публикации 16.10.2026.

The article was submitted 26.05.2026; approved after peer review 07.07.2026; accepted for publication 16.10.2026.