

УДК 504.06+577.1+574+663.1

БИОЛОГИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД С РЕГУЛИРУЕМЫМ ОКСИДАТИВНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ (РОВ-ТЕХНОЛОГИЯ)**А.Е. Кузнецов¹, А.В. Мелиоранский²**¹ *Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева, Москва, Россия*² *ООО ТДС, Москва, Россия*

По перерабатываемым потокам и распространенности биологическая очистка сточных вод является самой крупнотоннажной технологией в мире.

В настоящее время отечественные нормативы к очистке воды по сравнению со странами Европы намного более строгие. Например, по российским стандартам годной для сброса в водоемы рыбохозяйственного назначения считается вода с уровнем ХПК 15 мг/л (в Западной Европе 125 мг/л), уровнем БПК₅ 6 мг/л (в Западной Европе 20 мг/л), NH₄⁺ 0,5 мг/л (в Западной Европе 10 мг/л), PO₄³⁻ 0,2 мг/л (в Западной Европе 1 мг/л). Поддержание таких стандартов требует постройки высокоэффективных многоступенчатых очистных сооружений, следовательно – высоких затрат на очистку стоков, поэтому если имеется возможность снизить требования к качеству очищенной воды, выбирают оптимальную степень очистки. По российским же нормам одновременно обеспечивать высокие стандарты очистки и внедрять ресурсосберегающие недорогие технологии тем более сложно. Требуется существенная модернизация существующих методов или внедрение принципиально новых решений.

В России с 1 января 2016 года вступило в действие постановление Министерства природных ресурсов и экологии РФ, вынуждающее налоговыми мерами переход действующих предприятий к наилучшим доступным технологиям [1, 2].

Надо отметить, что в настоящее время в отечественной практике при уровне ХПК в воде на входе в очистные сооружения не выше 1000–2000 мг/л используются, как правило, одноступенчатые или многоступенчатые системы биологической очистки на основе аэротенков классического типа или их модификаций. При этом в одностадийном аэробном процессе удастся снизить содержание загрязнений на выходе лишь до 60–100 мг/л (по ХПК), что в 3–5 раз выше российских природоохранных требований. Поэтому сточную воду приходится разгружать в городскую канализацию на общегородские очистные сооружения либо в естественные или искусственные системы доочистки по установленным региональным нормам и лимитам сброса. Использование же дополнительных систем доочистки сточных вод или увеличение объемов сооружений ведет к росту капитальных и операционных затрат, территории, занятой под водоочистку. При повышении степени очистки с 85 до 95 % расходы возрастают в 2–3 раза, а свыше 95 % – примерно в 10 раз на каждый дополнительный процент повышения степени очистки [1]. Поэтому попытки «сочетать несочетаемое» – одновременно обеспечить высокую производительность, экологическую эффективность и высокое качество очистки сточных вод путем использования реакторов современных конструкций, в частности, зонированных аэротенков, биореакторов с гранулированным илом, с биопленкой, совмещения микробиологического процесса с мембранным разделением в мембранных реакторах, без отвода избыточного активного ила из очистных сооружений [3] обеспечивается высокой ценой и нерациональным расходуванием средств.

В течение длительного времени на кафедре биотехнологии РХТУ им. Д.И. Менделеева велись экспериментальные исследования по совершенствованию технологий биологической очистки сточных вод на основе следующих подходов:

- сочетание по месту и времени абиотических и биотических процессов трансформации веществ в единой экологической нише, как это часто наблюдается в природных экосистемах;
- моделирование и воспроизведение природных процессов самоочищения, особенно важных для устойчивого функционирования замкнутых экосистем;
- учет и управление стрессорными воздействиями на популяции микроценозов очистных систем, сочетание и совместное действие стрессорных и антистрессорных факторов, факторов с прооксидантной и антиоксидантной активностями при воздействии на микроценозы [4, 5].

В наиболее яркой форме такие условия в природе наблюдаются в тонком поверхностном слое почвы или воды, в эпифитной зоне растений, где одновременно бурно развивается жизнь, наблюдается химическая и фотохимическая трансформация и деградация различных веществ [6–10]. Процессы самоочищения в замкнутых водоемах и других природных средах часто протекают при совместном действии биоты, химически-активных частиц, активных форм кислорода – АФК (каталитически активных, радикальных, H_2O_2 и др.), ионов железа, марганца и др. Так, АФК постоянно присутствуют в воде и образуются в результате реакций каталитического инициирования, растворения активных газов из атмосферы, радиационно-химического инициирования, кавитационных эффектов, фотохимического инициирования, биологической эмиссии. Ведущая роль в этих процессах принадлежит каталитическому и фотохимическому инициированию, а также генерированию радикалов за счет биологической эмиссии [6, 7].

При исследовании в лабораторных условиях на кафедре биотехнологии РХТУ было показано, что использование вышеупомянутых подходов применительно к процессам микробиологического синтеза различных веществ и биодеструкции органических загрязнений позволяет в ряде случаев существенно улучшить целевые выходные технологические показатели. Так, при совместном одновременном воздействии микробиологических и малых доз химических и фотохимических факторов (активных форм кислорода или УФА-излучения в сочетании с видимым светом низкой интенсивности) при биологической очистке сточных вод возможно снижение количества остаточных загрязнений в сточных водах в 1,5–3 раза, при этом повышается качество активного ила и очистки, можно снизить затраты на удаление загрязнителя по сравнению с использованием только химических или фотохимических методов.

Основываясь на полученных экспериментальных данных по биологической очистке сточных вод с использованием совместного воздействия источника АФК (РОВ-активатора) и видимого света, названной нами РОВ-технология, с февраля 2020 г. при поддержке фирмы ТДС, Министерства ЖКХ Московской области, администраций ряда районов и городских округов Московской области и обслуживающего персонала очистных сооружений были проведены испытания предложенной технологии на действующих очистных сооружениях при очистке хозяйственно-бытовых стоков. На двух объектах испытания завершены, на других объектах – продолжаются.

Первые два объекта:

1. Поселковые очистные сооружения, включающие аэротенк смешения с вторичным отстойником и рециклом активного ила с объемом поступающих сточных вод $200\text{ м}^3/\text{сут.}$ с временем пребывания воды в очистных сооружениях – 15–23 час, средним содержанием загрязнений во входном потоке в период испытаний: взвешенные вещества – 257 мг/л; ХПК – 609 мг/л, аммонийный азот – 19,4 мг/л, азот нитратов – 0,3 мг/л, фосфор фосфатов – 4,3 мг/л.

2. Городские очистные сооружения, включающие аэротенк вытеснителя с вторичным отстойником с рециклом активного ила, работающий в режиме полной нитрификации с объемом поступающих сточных вод около 20 тыс. $\text{м}^3/\text{сут.}$ с временем пребывания воды в очистных сооружениях – 12 час и содержащих на входе: ХПК – около 100 мг/л, аммонийного азота – около 20 мг/л, фосфора фосфатов – около 10 мг/л, т. е. избыточное количество неорганического азота и фосфора по отношению к величине ХПК.

На рис. 1 представлены изменения содержания взвешенных веществ и ХПК на выходе из очистных сооружений в ходе проведения испытаний на поселковых очистных сооружениях, а в табл. 1 – результаты испытаний в обобщенном виде.

Из рис. 1 видно, что внесение РОВ-активатора с постепенным увеличением суточной дозы приводит к адаптации активного ила к окислительному воздействию реагента. После адаптации ила внесение активатора в дозах 12 л/сут. (в пересчете на активное вещество – $4\text{ г/м}^3\cdot\text{сут.}$), приводит к снижению показателя ХПК в выходной воде до недетектируемых величин (менее 10 мг/л), т. е. до значений, близких к нулю. Эффект снижения ХПК до минимально возможных значений был стабилен и наблюдался на протяжении более чем 30 суток, когда активатор вносился в оптимальных дозах.

Одновременно наблюдалось повышение скорости и степени нитрификации и денитрификации, снижение содержания фосфатов в выходящей воде, а также возрастание удельной активности ила по удалению соединений азота и фосфатов из сточной воды. При прекращении внесения активатора показатели биологической очистки возвращались к величинам, наблюдавшимся до его внесения.

Испытания на поселковых очистных сооружениях показали, что внесение реагента в оптимальных дозах приводит к снижению остаточного содержания загрязнений в выходящей сточной воде: по ХПК – оценочно в 8–10 раз, по фосфатам – в 1,3–1,5 раз с одновременным повышением нитрифицирующей и денитрифицирующей активностей в 1,1–1,3 раз, возрастанием скорости денитрификации, удельной активности ила по удалению соединений азота и фосфатов из сточной воды.

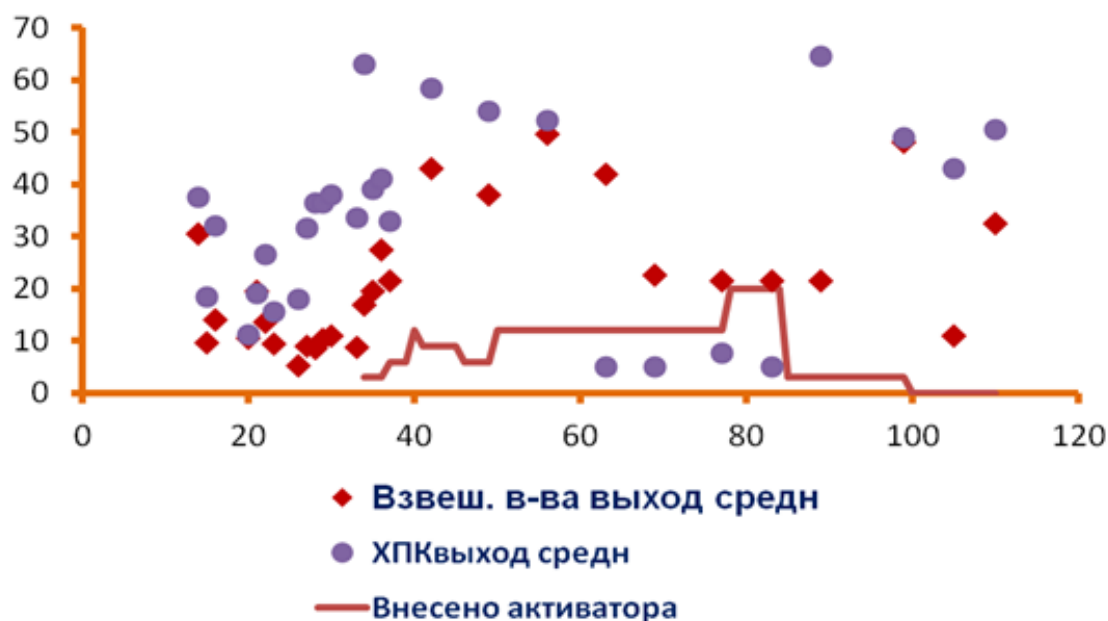


Рисунок 1 – Изменение во времени содержания взвешенных веществ и ХПК на выходе из очистных сооружений.

Таким образом, применительно к поселковым сооружениям биологической очистки сточных вод проведенные испытания технологии очистки хозяйственно-бытовых стоков с регулируемым окислительным воздействием (РОВ-технологии) показали высокую эффективность в отношении удаления органических загрязнений с возможностью достижения степени очистки в одностадийном процессе по показателю ХПК 99,2 %, что обеспечивает абсолютные значения ХПК в очищенной воде близкие к нулю с одновременным повышением степени удаления биогенных элементов из сточных вод.

Таблица 1 – Усредненные показатели очистки на выходе из очистных сооружений

Вариант	ВВ _{вых}	ХПК _{вых}	N-NH ₄ _{вых}	N-NO ₃ _{вых}	P-PO ₄ _{вых}	Уд. акт-ть ила по удалению N-NH ₄ _{вых}	Уд. акт-ть ила по нитрификации N-NO ₃ _{вых}	Уд. акт-ть ила по дефосфатации P-PO ₄ _{вых}
Без активатора, среднее, мг/л	28,3	51,8	7,9	7,9	2,2	3,6	7,7	0,5
С активатором, среднее, мг/л	26,9	5,7	6,0	10,8	1,6	5,2	10,5	1,1

Испытания на городских очистных сооружениях подтвердили ускорение скорости нитрификации и денитрификации, возможность снижения содержания взвешенных веществ на выходе из очистных сооружений, длительность (около двух месяцев) функционирования сооружений без сброса избыточного активного ила (т. е. в режиме самоокисления). В то же время снижения величины выходного ХПК до уровней ниже 10 мг/л не наблюдалось, возможно по причине внесения недостаточного количества РОВ-активатора (не более 2 г/м³).

На основании полученных данных были оценены операционные затраты на реализацию предлагаемого метода очистки сточных вод в промышленных масштабах. В зависимости от варианта исполнения они составят от 0,8 до 1,2 руб./м³ очищаемой воды, или 23–30 % от затрат на электроэнергию при использовании наиболее экономичных аэраторов, однако при этом качество очистки сточных вод по показателю ХПК повысится от 1,5 до 3 раз без ухудшения других показателей очистки, без падения скорости биологического окисления и окислительной мощности сооружений. Расчеты показывают, что при действующей в настоящее время схеме начисления экологических платежей за сверхнормативные сбросы затраты на РОВ технологию компенсируются при снижении показателей по ХПК_{вых} на 20–30 мг/л. В другом варианте реализация РОВ-технологии обеспечит одно и то же качество очистки при повышении нагрузки и окислительной мощности сооружений биологической очистки в 1,5–2 раза, снижении площадей, занимаемых новыми вводимыми в эксплуатацию очистными сооружениями, а также снижении совокупных операционных и капитальных затрат на 10–15 % при одном и том же качестве очистки.

Разработанный подход универсален в отношении биоценозов очистных сооружений и удаляемых органических биодоступных загрязнений, обладает патентной чистотой, не имеет мировых аналогов. Однако в каждом конкретном случае необходимо учитывать зависимость положительных эффектов от типа сооружений, конструкции и режима течения воды в аэротенках, плотности популяции активного ила, оптимального физиологического состояния, фазы роста микроорганизмов, дозы стрессоров и антистрессоров, концентрации субстрата, условий аэрации, циклов адаптации микроорганизмов к воздействию стрессора. Применительно к очистке сточных вод обнаруженные эффекты позволяют вести разработку как высокопроизводительных малосточных систем аэробной очистки и биологической переработки высококонцентрированных стоков с повышением компактности очистных реакторов в несколько раз, так и совершенствовать традиционные технологии биологической очистки на основе активных илов и биопленок очистных биореакторов (аэротенков, биотенков, биофильтров и др.) со снижением количеств остаточных загрязнений в потоке сточной воды на выходе в 2–3 раза, избыточного ила, биогенных элементов, устранением проблемы вспухаемости ила, при высокой устойчивости к перерывам в подаче субстрата, к лимитированию биоокисления кислородом, компонентами питания, при снижении площадей, занимаемых новыми вводимыми в эксплуатацию очистными сооружениями, а также эксплуатационных и капитальных затрат.

Реализация предложенных решений в промышленных условиях не потребует больших затрат и существенной модернизации биореакторов или очистных сооружений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. ИТС 10–2019. Очистка сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений, городских округов. – М.: Бюро НДТ Федерального Агентства по техническому регулированию и метрологии, 2019. – 434 с.
2. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. ИТС 8–2015. Очистка сточных вод при производстве продукции (товаров), выполнении работ и оказании услуг на крупных предприятиях. – М.: Бюро НДТ Федерального Агентства по техническому регулированию и метрологии, 2015. – 129 с.
3. Кузнецов А.Е. Прикладная экобиотехнология / А.Е. Кузнецов, Н.Б. Градова, С.В. Лушников и др. // Учебное пособие: в 2 тт. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. – т. 1–629 с., т. 2 – 485 с. Переиздание 2012, 2015 гг.
4. Oxidants and Antioxidants: Ultrastructure and Molecular Biology Protocols / Edited by: D. Armstrong // Methods in Molecular Biology, vol. 196: Humana Press Inc., Totowa, NJ. – 2002. – 356 p.
5. Denisov E.T. Oxidation and antioxidants in organic chemistry and biology / E.T. Denisov, I.B. Afanas'ev. – 2005. – 992 p. – URL: <http://www.tryphonov.ru/tryphonov/donat.htm>
6. Скурлатов Ю.И., Дука Г.Г., Мизити А. Введение в экологическую химию – М.: Высш. шк., 1994. – 400 с.
7. Богдановский Г.А. Химическая экология. – М.: Изд-во МГУ, 1994. – 273 с.
8. Кузнецов А.Е., Градова Н.Б. Научные основы экобиотехнологии. – М. Мир, 2006. – 504 с.
9. Bioavailability of organic xenobiotics in the Environment. Practical consequences for the Environment. // In Proceedings of the Meeting on Bioavailability of Organic Xenobiotics in the Environment. Prague, 18–29 August, 1997 / Eds. Ph. Baveye, J. – C. Block, V.V. Goncharuk. – NATO Advanced Study Institute, Series 2: Environment. – Kluwer Academic Publishers, 1999. – 64. – 503 p.
10. Синельников В.Е. Механизм самоочищения водоемов. – М.: Стройиздат, 1980. – 112 с.