

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе

доктор технических наук,

профессор

Ворогиллин Михаил Сергеевич



2026 г.

Отзыв

ведущей организации на диссертацию

Хасановой Айгуль Айратовны

**«Процессы очистки сточных вод в условиях развития
фосфатаккумулялирующих микроорганизмов в сообществах активного
ила и биопленки» на соискание ученой степени кандидата технических
наук по специальности 1.5.6. Биотехнология**

Актуальность темы диссертационного исследования.

Проблема эвтрофикации водоемов, вызванная избыточным поступлением биогенных элементов, прежде всего фосфора и азота, со сточными водами, остается одной из ключевых в современной экологической биотехнологии. Традиционные методы очистки, включая химическое осаждение и классические схемы биологического удаления фосфора, часто характеризуются высокой реагентной нагрузкой, нестабильностью при колебаниях состава стоков и недостаточной эффективностью. В связи с этим поиск новых биотехнологических подходов, направленных на интенсификацию процессов дефосфатации и денитрификации, является крайне востребованным.

Особый интерес представляет использование иммобилизованных микробных сообществ — биопленок, которые позволяют создавать пространственно-организованные структуры с градиентом кислорода и субстрата, обеспечивающие одновременное протекание аэробных и анаэробных процессов. В связи с этим исследование закономерностей развития фосфатаккумулялирующих (ФАО) микроорганизмов в составе активного ила и биопленки, установление условий устойчивого функционирования сформированных сообществ и

последующая реализация полученных результатов в биофильтрационных установках представляют научный и инженерно-технологический интерес.

Таким образом, диссертационная работа Хасановой Айгуль Айратовны, направленная на интенсификацию процессов очистки сточных вод путем создания условий для развития фосфатаккумулирующих микроорганизмов в составе микробных сообществ активного ила и биопленки, является актуальной и соответствует современным направлениям развития экологической биотехнологии.

Новизна исследования и полученных результатов, положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

При постановке цели и задач исследования автор исходил из необходимости комплексного рассмотрения процесса очистки сточных вод – от формирования функционально активного микробного сообщества до его использования в биофильтрационной системе. Диссертантом получен ряд новых фундаментальных и прикладных результатов.

Методом высокопроизводительного секвенирования 16S рПНК прослежена сукцессия микробного сообщества активного ила в биореакторе последовательно-периодического действия. В сформированном сообществе выявлен представитель рода *Azonexus*, доля которого достигала 24 %, а содержание внутриклеточного фосфора составляло до 12 % от сухой массы клеток. Полученные данные расширяют представления о составе микроорганизмов, участвующих в удалении и аккумуляции фосфора в технологических микробных сообществах.

Важным новым результатом является сравнительное исследование биопленкообразующей способности моно- и бинарных культур бактерий, выделенных из активного ила. Впервые установлено, что объединение микроорганизмов в бинарные культуры в ряде исследованных условий способствует более выраженному формированию биопленки. В частности, для ассоциации *Bacillus subtilis* и *Achromobacter pulmonis* ПНОС при pH 5,0 и 10,0 массивность биопленки увеличивалась в среднем на 46 и 45 %, соответственно. Для бинарной культуры *Alcaligenes faecalis* 2 и *Bacillus subtilis* в присутствии

додецилсульфата натрия в концентрациях 5-10 мг/дм³ отмечено увеличение массивности биопленки в среднем на 22 %. Это открывает перспективы целенаправленного конструирования устойчивых микробных консорциумов для очистки сточных вод, содержащих токсичные компоненты.

Впервые проведено прямое сопоставление эффективности удаления фосфатов и аммонийного азота суспендированным активным илом и биопленкой в циклическом режиме. Экспериментально доказано, что иммобилизация микроорганизмов сокращает пусковой период биофильтра в два раза и повышает эффективность удаления фосфатов на 20-25 %, а аммонийного азота – на 30-35 %.

Отдельного внимания заслуживает проведенная автором биоаугментация сформированной биопленки культурой *Alcaligenes faecalis* 2. Интродукция данной культуры способствовала стабилизации биологической дефосфатации; эффективность удаления фосфат-ионов составляла в среднем 91-93 %, а аммонийного азота достигала 99 %.

Значимость полученных автором диссертации результатов для развития соответствующей отрасли науки.

Научная значимость диссертационной работы определяется установлением закономерностей формирования и функционирования микробных сообществ активного ила и биопленки в условиях, обеспечивающих интенсивное удаление соединений фосфора из сточных вод. Полученные результаты позволяют расширить представления о роли фосфатаккумулирующих микроорганизмов в процессах биологической дефосфатации, а также об особенностях функционирования иммобилизованной биомассы при одновременном удалении соединений фосфора и азота.

Результаты исследования моно- и бинарных бактериальных биопленок дополняют сведения о характере адаптации микробных сообществ к изменению физико-химических условий. Практически важным является установленный эффект усиления биопленкообразования ряда бинарных культур при стрессовом воздействии, поскольку реальные очистные сооружения функционируют в условиях переменного состава поступающих сточных вод.

Значимый научно-практический результат получен при сравнении суспендированной и иммобилизованной биомассы. Показано, что использование биопленки позволяет сократить пусковой период биофильтра в два раза по сравнению с суспендированным активным илом, а эффективность удаления фосфатов и аммонийного азота повысить на 20-25 и 30-35 %, соответственно.

Практическая значимость исследования состоит в разработке методики диагностики фосфатаккумулирующей способности активного ила, экспериментальном обосновании использования иммобилизованного микробного сообщества и его биоаугментации, а также разработке технического предложения по очистке коммунально-бытовых сточных вод производительностью 400 м³/сут.

Для предлагаемой системы рассчитаны основные технологические параметры биофильтрационной очистки и разработана принципиальная технологическая схема. Эколого-экономическая оценка показала, что расчетный срок окупаемости капитальных и эксплуатационных затрат составляет около 5 лет, при этом снижение платы за сверхнормативный сброс соединений азота и фосфора может превышать 1 млн 750 тыс. руб. в год.

Практическая направленность исследования подтверждается использованием результатов МУП «Водоканал» г. Казани при рассмотрении вопроса интенсификации биофильтрационной очистки с глубоким удалением фосфатов из сточных вод жилого массива «Крутушка».

Результаты диссертационной работы прошли апробацию на Международных и Всероссийских научных конференциях. По теме исследования опубликовано 14 научных работ, в том числе 2 статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, 1 статья в журнале, индексируемом в базе Scopus, и 11 публикаций в материалах Международных и Всероссийских конференций.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации.

Полученные Хасановой А.А. результаты могут быть использованы при разработке и совершенствовании биотехнологических схем очистки

коммунально-бытовых сточных вод, ориентированных на глубокое удаление соединений фосфора и азота.

Предложенные подходы к формированию биопленки, подбору функционально активных микроорганизмов и биоаугментации микробного сообщества представляют интерес для организаций, осуществляющих проектирование, реконструкцию и эксплуатацию биологических очистных сооружений. Результаты сравнительного исследования суспендированной и иммобилизованной биомассы могут использоваться при обосновании выбора биореакторов для сооружений малой производительности.

Разработанная методика диагностики фосфатаккумулирующей способности активного ила может быть использована при лабораторном сопровождении технологического режима очистных сооружений и при выполнении научно-исследовательских работ в области экологической биотехнологии.

Результаты рекомендовано внедрить в образовательных организациях высшего профессионального образования, которые занимаются обучением студентов по направлению *Биотехнология* (разных уровней образования) *Техносферная безопасность*, *Водоснабжение и водоотведение*, а также при преподавании дисциплин, связанных с промышленной и экологической биотехнологией, биологической очисткой сточных вод и эксплуатацией очистных сооружений.

Структура и анализ содержания диссертации.

Диссертация Хасановой А.А. написана в классическом ключе и включает введение, шесть глав, заключение, список сокращений и условных обозначений, библиографический список и приложения. Общий объем диссертационной работы составляет 186 страниц. Работа иллюстрирована 37 рисунками и 21 таблицей, библиографический список включает 269 наименований отечественных и зарубежных источников.

Тема диссертационной работы «Процессы очистки сточных вод в условиях развития фосфатаккумулирующих микроорганизмов в сообществах активного

ила и биопленки» соответствует ее содержанию и отражает основные направления проведенного исследования. Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации.

Во **введении** автором обоснована актуальность, сформулированы цель и шесть задач исследования, представлены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, положения, выносимые на защиту, сведения о достоверности и апробации результатов, публикационной активности и личном вкладе автора. Однако, по нашему мнению, степень разработанности проблемы охарактеризована недостаточно, чтобы сформулировать представленную цель диссертационного исследования.

В **первой главе** систематизированы современные сведения о формах нахождения фосфора в сточных водах и существующих способах его удаления. Рассмотрены физико-химические и биологические методы дефосфатации, физиологические особенности фосфатаккумулирующих микроорганизмов, механизмы накопления фосфора и особенности формирования микробных сообществ. Отдельный раздел посвящен биопленочным технологиям очистки сточных вод. Автор анализирует современные типы биореакторов с иммобилизованной биомассой и факторы, определяющие эффективность их функционирования. Обзор хорошо структурирован и демонстрирует высокую эрудицию автора. К достоинству можно отнести критическое осмысление литературных данных и выделение нерешенных вопросов, что логично подводит к постановке собственных исследований.

Вторая глава содержит подробное описание объектов и методов. Использован комплекс современных микробиологических, молекулярно-биологических (секвенирование 16S рРНК, метагеномный анализ), физико-химических (спектрофотометрия, хроматография, рентгеновский микроанализ) и статистических методов. Все методики описаны достаточно полно для воспроизведения. Однако из описания не совсем ясно, каким именно образом проводилась оценка биопленкообразующей способности для бинарных культур –

использовался ли метод совместного культивирования с равного инокулята или же с разным соотношением клеток.

Третья глава посвящена формированию ФАО-сообщества в SBR-реакторе. Автором детально прослежена динамика содержания фосфатов и ацетата на протяжении 83 суток, показана смена доминирующих групп микроорганизмов. На основе метагеномных данных идентифицирован *Azonexus* как ключевой микроорганизм, ответственный за удаление фосфора на промежуточных этапах. Особый интерес представляет выявление представителя рода *Azonexus*, доля которого в сформированном сообществе достигала 24 %, при содержании внутриклеточного фосфора до 12 % от сухой массы клеток.

Четвертая глава – одна из самых интересных с экспериментальной точки зрения. В ней проведена оценка биопленкообразующей способности восьми бактериальных культур. Автор переходит от монокультур к бинарным ассоциациям, что повышает практическую значимость работы. Оценено влияние температуры, pH и додецилсульфата натрия на массивность биопленки и метаболическую активность клеток. Показано, что при стрессовых воздействиях бинарные культуры проявляют большую устойчивость, чем монокультуры. Данный результат важен для понимания механизмов адаптации микробных сообществ в реальных очистных системах.

Пятая глава содержит ключевые инженерно-биотехнологические результаты. Проведено сопоставление процессов удаления фосфора и соединений азота суспендированным активным илом и биопленкой. Показано преимущество иммобилизованного сообщества по продолжительности пускового периода и достигаемой эффективности очистки. Исследована биоаугментация биопленки культурой *Alcaligenes faecalis* 2. На основании полученных данных рассчитан биофильтр и предложена технологическая схема очистки коммунально-бытовых сточных вод производительностью 400 м³/сут.

В шестой главе выполнено эколого-экономическое обоснование разработанного решения. Рассчитаны капитальные и эксплуатационные затраты,

оценено снижение платы за сверхнормативный сброс биогенных соединений и определен расчетный срок окупаемости.

Показано, что переход на биопленочную технологию позволяет снизить сверхнормативные сбросы фосфатов и аммония и сократить плату за негативное воздействие на 1,75 млн руб. в год. Срок окупаемости проекта – около 5 лет, что является приемлемым для малых очистных сооружений. Включение данного раздела является обоснованным, поскольку позволяет оценить не только технологическую результативность, но и потенциальную экономическую приемлемость предлагаемого решения.

В заключении кратко суммированы основные результаты и сформулированы выводы, которые соответствуют поставленной цели и задачам. Выводы лаконичны и конкретны. В заключении обозначены перспективы дальнейшего развития работы, связанные с совершенствованием биотехнологий глубокой очистки сточных вод от комплекса биогенных элементов.

Список литературы включает 269 источников, из которых значительная часть – зарубежные публикации последних лет, что свидетельствует о хорошей осведомленности автора в современной научной литературе.

Для облегчения чтения диссертации автором приведен список принятых сокращений и условных обозначений.

В приложениях представлены материалы, подтверждающие практическую направленность выполненного исследования, включая документы, связанные с разработкой методики диагностики фосфатаккумулирующей способности активного ила и использованием результатов работы МУП «Водоканал» г. Казани.

В ходе анализа диссертации возникли следующие вопросы и замечания:

1. Во **введении** диссертант упоминает о предыдущих работах российских и зарубежных ученых по исследованию механизмов фосфатаккумуляции и биологической дефосфатации сточных вод, но не приводит обоснований для появления конкретной цели исследования, которая включает технологические аспекты очистки сточных вод.

2. Из описания эксперимента (глава 2) не совсем ясно, каким именно образом проводилась оценка биопленкообразующей способности для бинарных культур – использовался ли метод совместного культивирования с равного инокулята или же с разным соотношением клеток.
3. В главе 3 показано, что максимальная эффективность удаления фосфора (51 %) достигается на 57-е сутки, когда доминирует *Azonexus*. Однако к 83-м суткам доля этого рода снижается до <1 %, а эффективность падает до 31 %. С чем, по мнению автора, связано столь резкое вытеснение *Azonexus*, не могло ли здесь сыграть роль накопление токсичных метаболитов в реакторе?
4. При исследовании бинарных биопленок (глава 4) для оценки массивности биопленок использовали окрашивание кристаллическим фиолетовым. Однако этот метод не позволяет различить клетки разных видов и их распределение в матриксе. Как автор объясняет механизм синергии (например, за счет продукции сигнальных молекул, кооперативного метаболизма или изменения физико-химических свойств поверхности)?
5. В техническом предложении (глава 5) рассчитан расход воздуха для нитрификации исходя из удаления аммония. Однако в реальных сточных водах присутствует и органический углерод, на окисление которого также требуется кислород. Почему автор не учел потребность в кислороде на удаление ХПК? Будет ли система работать эффективно при переменной нагрузке по органике?
6. При выборе бактерий-интродуцентов *Alcaligenes faecalis* 2 диссертант основывался на понятной логике. Выбор бактерий был основан на их способности к образованию прочной и устойчивой биопленки и, вероятно, на известной фосфатаккумулялирующей активности. При этом найден наилучший фосфоаккумулятор активного ила (в условиях эксперимента) – бактерии рода *Azonexus* (глава 3). В последующих исследованиях диссертант не использует эти бактерии и не идентифицирует в активном

иле в присутствии интродуцента *Alcaligenes faecalis* 2. Почему диссертант оставил этот аспект без внимания?

Перечисленные вопросы и замечания носят дискуссионный характер и не снижают общей высокой оценки выполненной работы. Они скорее обозначают направления для дальнейших исследований.

Заключение

Диссертационная работа Хасановой Айгуль Айратовны является завершенным научно-квалификационным исследованием, в котором решена актуальная научно-практическая задача – интенсификация процессов очистки сточных вод от соединений фосфора и азота путем направленного формирования функционально активных микробных сообществ активного ила и биопленки, а также их биоаугментации. Полученные результаты имеют существенное значение для развития экологической биотехнологии, а предложенные технические решения могут быть внедрены в практику проектирования и эксплуатации очистных сооружений малой производительности.

Достоверность результатов обеспечена использованием современных аналитических методов, воспроизводимостью экспериментальных данных и их статистической обработкой. Основные положения диссертации опубликованы в 14 научных работах, включая статьи в журналах, рекомендованных ВАК, и в базе Scopus, а также апробированы на международных и всероссийских конференциях. Автореферат и публикации полностью отражают содержание диссертации.

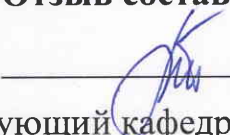
По своей актуальности, научной новизне, теоретической и практической значимости диссертационная работа соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (в действующей редакции), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Хасанова Айгуль Айратовна, заслуживает

присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.5.6. Биотехнология.

Диссертационная работа обсуждена и отзыв одобрен на расширенном заседании кафедры биотехнологии ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» (протокол № 1 от «31» августа 2026 г.).

Отзыв составили:

Понаморева Ольга Николаевна


Заведующий кафедрой биотехнологии,
доктор химических наук
по специальности 03.06.01 – Биотехнология (в том числе бионанотехнологии),
доцент

Арляпов Вячеслав Алексеевич


Директор НИЦ «БиоХимТех»,
доктор технических наук
по специальности 1.5.6. Биотехнология,
доцент

Полное название организации: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тульский государственный университет»

Почтовый адрес: 300012, Тульская область, г. Тула, проспект Ленина, д. 92.
тел. +7 4872 73-44-44
факс +7 4872 35-81-81
E-mail: info@tsu.tula.ru



Зход. № 05-9122
« 08 » 09 2026 г.
подпись 