

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Клементьева Святослава Владимировича

на тему: «Биодеструкция компонентов водной фазы гидротермального ожигения биомассы избыточного активного ила», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.5.6 Биотехнология

Актуальность темы диссертационного исследования. В технологиях биологической очистки сточных вод чрезвычайно актуальной инженерной задачей является проблема утилизации их осадков, прежде всего, большого количества избыточной биомассы активного ила. В Российской Федерации более 90 % осадков сточных вод складывается на полигонах и иловых картах, что приводит к отчуждению земель, загрязнению почв и грунтовых вод, а также дополнительным выбросам парниковых газов. Среди перспективных методов переработки влажных органических отходов особое место занимает их гидротермальное ожигение (ГТО), позволяющее получать продукты с добавленной стоимостью – бионефть и биоуголь. Однако «узким местом» технологии является образование значительного количества водной фазы (до 90 % от массы исходного сырья), содержащей высокие концентрации органических соединений, азота и фосфора, что требует её предварительную очистку.

Диссертационная работа Клементьева С.В. направлена на решение этой задачи с разработкой эффективных способов биодеструкции компонентов водной фазы ГТО. При этом автор предлагает не только методы очистки с использованием специализированных бактериальных культур и микроводорослей, но и рассматривает возможность интеграции процесса ГТО в действующую технологическую схему биологических очистных сооружений с совместной очисткой водной фазы и коммунально-бытовых сточных вод. Такой системный подход, сочетающий утилизацию отходов с получением ценных продуктов и минимизацией экологического ущерба, безусловно, является актуальным и востребованным для практического применения.

Цель работы состоит в определении способов биодеструкции компонентов водной фазы, образующейся в процессе гидротермального ожижения биомассы избыточного активного ила. Поставленная цель достигнута путем последовательного решения задач, охватывающих полный цикл исследований – от анализа состава водной фазы до технико-экономического обоснования внедрения разработанной технологии.

Новизна исследования и полученных результатов. Автором получен ряд новых результатов, имеющих значение для развития методов экологической биотехнологии. Так, детально охарактеризован качественный и количественный состав водной фазы ГТО избыточного активного ила и осадков первичных отстойников в технологии биологической очистки коммунально-бытовых сточных вод, а также проведена оценка её интегральной токсичности для двух тест-объектов. Показано, что основными компонентами водной фазы являются карбоновые кислоты, ароматические соединения и гетероциклические азотсодержащие соединения.

Из активного ила нефтехимического предприятия выделено 11 микробных изолятов, способных к биодеструкции компонентов водной фазы. Впервые идентифицированы как эффективные деструкторы *Pseudomonas glycinae*, *Paenarthrobacter nicotinovorans* и *Comamonas testosteroni*, обеспечивающие снижение ХПК на 69-75 %.

Впервые исследован процесс биосорбционной очистки водной фазы с использованием цеолита и культур *P. nicotinovorans* и *C. testosteroni*, показавший эффективность удаления органических веществ до 81 %, ионов NH_4^+ – до 41 %, фосфат-ионов – до 99 %. Также впервые показана возможность последовательной двухэтапной очистки водной фазы (бактерии + микроводоросли) с высоким уровнем изъятия биогенных элементов.

Важным научным результатом является экспериментальное обоснование возможности совместной биологической очистки водной фазы ГТО с коммунально-бытовыми сточными водами. Автором установлен период адаптации активного ила (6–8 суток) и оптимальная концентрация водной фазы (1,5 % об.), не

оказывающая ингибирующего действия на процесс нитрификации сточных вод и седиментационные свойства активного ила.

Значимость для науки и практики полученных результатов. С теоретической точки зрения работа расширяет существующие представления о закономерностях биотрансформации сложных органических субстратов, характерных для водной фазы процесса ГТО, и выявляет ключевые факторы, определяющие эффективность бактериальной деструкции. Это вносит вклад в развитие теоретических основ управления микробными процессами в области экологической биотехнологии.

Практическая значимость работы определяется конкретными технологическими предложениями. В частности, предложена модернизация схемы БОС г. Иннополис с включением реактора ГТО, что позволит перерабатывать 295,6 т/год осадков с получением товарных продуктов: бионефти (44,3 т/год) и биоугля (130 т/год) и подачей образующейся водной фазы в объёме 15-17,4 м³/сут на биологическую очистку совместно с основным потоком сточных вод. Выполненная экономическая оценка подтверждает эффективность проекта: срок окупаемости составит 3,2 года, предотвращённый экологический ущерб – 1,14 млн руб./год. Практическая значимость разработок подтверждена актом о намерении внедрения, полученным от АО «Зеленодольск-Водоканалсервис».

Степень обоснованности и достоверности результатов проведенных исследований. Научные положения и выводы, представленные в диссертации, теоретически обоснованы и подтверждены значительным объёмом воспроизводимых экспериментальных данных. Исследования выполнены с использованием современных аналитических методов (ГХ-МС, ЯМР-спектроскопия, молекулярно-генетическая идентификация), стандартных микробиологических и биохимических методик анализа. Статистическая обработка результатов с применением пакетов прикладных программ (Microsoft Excel, Origin) подтверждает воспроизводимость и достоверность полученных данных. Все эксперименты выполнены в трёх повторностях, различия считали достоверными при уровне значимости $p < 0,05$.

Структура диссертации. Диссертационная работа изложена на 177 страницах машинописного текста, состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы (225 источников), содержит 37 рисунков и 28 таблиц. Структура работы логична и отражает последовательность решения поставленных задач.

Во введении автор последовательно обосновывает актуальность темы, формулирует цель и определяет исследовательские задачи, а также даёт чёткую характеристику элементам научной новизны и практической значимости.

Первая глава представляет собой основательный аналитический обзор литературы, в котором автор системно подходит к рассмотрению современных методов утилизации осадков сточных вод. Особое внимание уделено технологии гидротермального ожижения (ГТО) как одному из современных и наиболее перспективных термохимических способов переработки влажных органических отходов. Детально проанализированы физико-химические аспекты процесса, состав и свойства образующейся водной фазы, а также существующие физико-химические и биологические способы её обезвреживания. Критический анализ преимуществ и ограничений каждого из подходов позволил автору не только обосновать выбор направления собственных исследований, но и выявить недостаточно изученные аспекты, в частности, возможность интеграции процесса ГТО в действующие схемы биологической очистки сточных вод.

Во второй главе представлен обширный методический раздел. Для проведения исследований автор использует классические микробиологические методы (выделение чистых культур, оценка физиолого-биохимических свойств), а также широкий спектр современных аналитических подходов: ЯМР-спектроскопию для идентификации органических соединений, газовую хромато-масс-спектрометрию для детального качественного анализа водной фазы, молекулярно-генетическую идентификацию микроорганизмов на основе секвенирования гена 16S рРНК. Такой междисциплинарный методический арсенал обеспечивает высокую достоверность полученных результатов и позволяет комплексно оценивать, как состав загрязняющих веществ, так и эффективность их биотрансформации.

Третья глава посвящена детальному физико-химическому анализу водной фазы ГТО, полученной из избыточного активного ила и осадков первичных отстойников. Определены ключевые интегральные показатели: ХПК (в среднем 11590 мгО/дм³), БПК₅ (до 8137 мгО₂/дм³), содержание общего органического углерода и биогенных элементов. С помощью ГХ-МС и ЯМР-спектроскопии идентифицированы конкретные соединения — уксусная, бутановая, пентановая, декановая кислоты, фенол, пиридин, 4-метилфенилбензамид.

На основе отношения БПК₅/ХПК ($\approx 0,59$) сделан обоснованный вывод о высокой биоразлагаемости органических веществ водной фазы микроорганизмами активного ила. Важным результатом является оценка интегральной токсичности водной фазы на двух тест-объектах (*Paramecium caudatum* и *Artemia salina*), определившей необходимость значительного разбавления (до 80-140 раз) перед биологической очисткой. Это имеет принципиальное значение для понимания путей микробной деструкции и подбора штаммов-деструкторов.

Четвёртая глава содержит ключевые результаты по выделению и характеристике микроорганизмов-деструкторов. Из активного ила нефтехимического предприятия автором получено 11 изолятов, из которых после скрининга по эффективности снижения ХПК отобраны три наиболее перспективных: *Pseudomonas glycinae*, *Paenarthrobacter nicotinovorans* и *Comamonas testosteroni*. Важно отметить, что для *P. nicotinovorans* и *C. testosteroni* известна способность к деградации ароматических и гетероциклических соединений, что коррелирует с химическим составом водной фазы ГТО. Автором экспериментально подтверждена высокая эффективность биодеструкции компонентов водной фазы, сопровождающаяся снижением ХПК на 69-75 %. Особый интерес представляет разработанная биосорбционная система с использованием цеолита, в которой бактерии формируют стабильную биоплёнку на поверхности сорбента, обеспечивая синергетический эффект адсорбции и биоокисления. Эффективность удаления загрязнений в такой системе достигает 81 % по ХПК, 41 % по аммонийному азоту и 99 % по фосфат-ионам, что подтверждает высокий потенциал предложенного подхода.

Пятая глава посвящена использованию культур микроводорослей для доочистки водной фазы. Автором проведён скрининг девяти штаммов из коллекции IPPAS, из которых по совокупности ростовых характеристик и эффективности удаления биогенных элементов в качестве перспективных культур выделены *Parachlorella kessleri* IPPAS C-9 и *Chlorella minutissima* IPPAS C-123. Показано, что двухэтапная схема (бактериальная деструкция с последующим культивированием водорослей) обеспечивает практически полное удаление фосфатов (до 91 %) и аммонийного азота (до 82 %), а также позволяет получить дополнительную биомассу водорослей, богатую полисахаридами и белками, что открывает перспективы её использования в качестве кормовой добавки или сырья для дальнейшей переработки.

В шестой главе автором выполнены ключевые эксперименты по оценке возможности совместной биологической очистки водной фазы ГТО с коммунально-бытовыми сточными водами. Установлено, что в таком процессе оптимальная концентрация водной фазы составляет 1,5 % (об.), а период адаптации активного ила 6-8 суток. Автором количественно оценено влияние водной фазы на дегидрогеназную активность, процессы нитрификации и седиментационные свойства активного ила. Показано, что основное ингибирующее действие компонентов водной фазы направлено на первую стадию нитрификации (окисление аммония до нитритов), что согласуется с литературными данными.

Седьмая глава содержит технико-экономическое обоснование предложенной модернизации БОС г. Иннополис. Выполнены расчёты капитальных и эксплуатационных затрат, определены показатели эффективности: чистая приведённая стоимость ($NPV = 12,97$ млн руб.), внутренняя норма доходности ($IRR = 28$ %), срок окупаемости с учётом дисконтирования (38 месяцев). Предотвращённый экологический ущерб оценён в 1,14 млн руб./год. Полученный акт о намерении внедрения от АО «Зеленодольск-Водоканалсервис» подтверждает практическую востребованность разработанных решений.

Заключение соответствуют поставленным задачам и логично вытекают из результатов исследования.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Публикации и апробация работы. По материалам диссертации опубликовано 16 работ, в том числе 3 статьи в изданиях перечня ВАК Минобрнауки России, 3 статьи в журналах, индексируемых в Scopus и Web of Science. Результаты работы докладывались на международных и всероссийских конференциях и отмечены дипломами и премиями, что свидетельствует о признании научной общественностью.

Следует отметить, что содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности 1.5.6. Биотехнология (отрасль наук – технические) по п.7. «Разработка новых технологических процессов на основе микробиологического синтеза, биотрансформации, биокатализа, иммуносорбции, биодеструкции, биоокисления, и создания систем биокомпостирования различных отходов, очистки техногенных отходов (сточных вод, газовых выбросов и др.), создание замкнутых технологических систем микробиологического производства, последние с учетом вопросов по охране окружающей среды».

Замечания и вопросы по диссертационной работе.

1. При выполнении экспериментов по оценке биоплёнкообразования отсутствует описание процедуры отмывки лунок от несвязанного красителя, что не позволяет считать абсолютные значения оптической плотности корректной количественной мерой биомассы биоплёнки. Кроме того, выбор для биосорбционных экспериментов концентрации водной фазы 50 % не согласуется с данными самого автора (рис. 4.5–4.6), где максимальная биоплёнка формируется при 10–20 %. Вывод о синергизме культур в биоплёнке сделан на основании лишь отсутствия антагонизма на агаризованной среде, без учёта стартовой концентрации клеток в жидкой культуре.
2. В работе в качестве стандартных условий приняты 260 °С, 20 минут. Однако в обзоре и экспериментальной части (табл. 3.1, стр. 65–66) представлены результаты при варьировании времени от 10 до 30 минут

- и использовании множества катализаторов. Автор не обосновывает, почему выбраны именно 260 °С и 20 минут, хотя, например, при 30 минутах и 1:15 наблюдается снижение органического углерода (стр. 66). Желательно пояснить критерий оптимизации.
3. Автор приводит состав исходного сырья (табл. 2.1) и количество образующихся продуктов (стр. 130, 136), однако не показывает, как распределяются углерод, азот и фосфор между биоуглем, бионефтью и водной фазой. Это важно для оценки замкнутости цикла и расчетов предотвращенного ущерба.
 4. В главе 5 (стр. 101) водную фазу разбавляют в 50 раз. Это делает процесс экономически сомнительным при промышленной реализации. Автор справедливо указывает на эту проблему в выводах, но не предлагает путей ее решения, кроме двухэтапной очистки (которая увеличивает время до 17 суток). Следовало бы обсудить возможность использования устойчивых штаммов или предварительной сорбции для снижения кратности разбавления.
 5. В главе 6 автор на основании интегральных показателей (ХПК, NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , иловый индекс) делает вывод об ингибировании нитрификации при повышении концентрации водной фазы и ссылается на литературные данные о блокировке фермента аммониймонооксигеназы. Однако прямых экспериментальных подтверждений этому в работе не представлено. Использование молекулярно-генетических методов позволило бы более обоснованно судить о том, связано ли снижение нитрификационной активности с гибелью бактерий или с ингибированием их ферментативных систем. Отсутствие таких данных не снижает достоверности основных технологических выводов, но делает интерпретацию механизмов адаптации активного ила менее полной.
 6. При обработке экспериментальных данных автор использует параметрический t-критерий Стьюдента, однако в работе не приведены

результаты проверки нормальности распределения и гомогенности дисперсий, что делает применение данного критерия недостаточно обоснованным. В главе 6 не приведены коэффициенты корреляции между концентрацией водной фазы и ключевыми показателями состояния активного ила (иловый индекс, дегидрогеназная активность), что снижает количественную строгость выводов. Очень часто встречаются лишние цифры в доверительных интервалах и, соответственно, некорректное округление данных. Указанные замечания не ставят под сомнение основные результаты работы, но свидетельствуют о необходимости более тщательной статистической обработки данных в следующих исследованиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

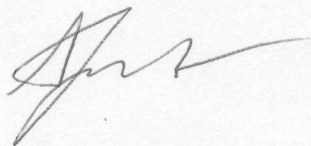
Диссертационная работа Клементьева Святослава Владимировича на тему «Биодеструкция компонентов водной фазы гидротермального оживления биомассы избыточного активного ила» представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, в которой на основе всесторонних экспериментальных исследований изложены новые технические и технологические решения и разработки по биологической очистке водной фазы гидротермального оживления биомассы избыточного активного ила, имеющие существенное значение для развития методов культивирования микробных сообществ в области экологической биотехнологии. Полученные результаты расширяют представления о возможностях биоконверсии трудноокисляемых органических субстратов и могут быть использованы при проектировании и модернизации очистных сооружений.

По своей актуальности, объёму выполненных исследований, научной новизне, теоретической и практической значимости представленная работа полностью соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г. (в действующей редакции), предъявляемым ВАК

Минобрнауки России к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук. Диссертация соответствует паспорту специальности 1.5.6. Биотехнология, а её автор – Клементьев Святослав Владимирович заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 1.5.6. Биотехнология.

Официальный оппонент:

доктор технических наук по специальности 1.5.6. Биотехнология,
доцент, директор научно-исследовательского центра «БиоХимТех»
федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Тульский государственный университет»



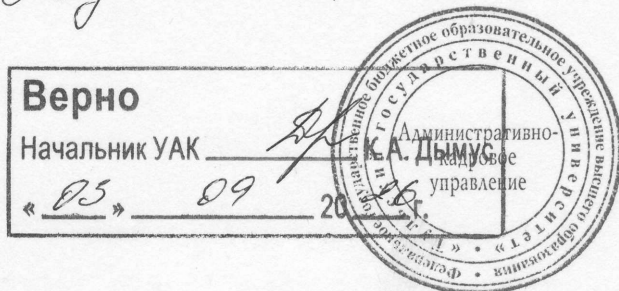
Арляпов Вячеслав Алексеевич

« 3 » сентября 2026 г.

Контактные данные: тел: +7(4872) 25-46-96,
e-mail: v.a.arlyapov@tsu.tula.ru, v.a.arlyapov@gmail.com.

Адрес места работы: 300012, Российская Федерация, г. Тула, ул. пр. Ленина,
д. 92, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Тульский государственный университет».

Подпись Арляпова В.А. удостоверено.



Вход. № 05-9121
« 08 » 09 2026 г.
подпись *Дас*