

«УТВЕРЖДАЮ»

И.о. проректора по научной
деятельности и цифровизации
Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Казанский
национальный исследовательский
технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ», к. т. н., доцент

С.А. Матвеев

« 27 » марта 2026 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Аетова Алмаза Ураловича
на тему: «Теплофизические свойства веществ и закономерности процесса
окисления молибденсодержащего промышленного водного стока в
сверхкритических флюидных условиях», представленной
на соискание ученой степени кандидата технических наук по
специальности 1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника

Актуальность темы диссертационной работы. Проблема
утилизации промышленных водных стоков относится к числу наиболее
острых экологических и экономических вызовов современности. Особую
сложность представляют многокомпонентные отходы нефтехимических
производств, которые содержат как ценные компоненты (например,
молибден), так и токсичные органические соединения. Традиционные
методы обращения с такими отходами – термическое обезвреживание и
захоронение – не только недостаточно эффективны с экологической точки
зрения, но и приводят к безвозвратным потерям дорогостоящего сырья. В
связи с этим разработка новых, экологически безопасных и

Уфимский университет науки и технологий
Вх. № 1356-13
« 07 » 04 2026 г.

ресурсосберегающих технологий переработки подобных отходов является исключительно актуальной задачей. Одним из перспективных направлений решения данной проблемы выступает процесс сверхкритического водного окисления (СКВО), который позволяет за короткое время практически полностью разрушать органические загрязнители, превращая их в безвредные продукты – воду и диоксид углерода. Неорганическая составляющая, включая соединения молибдена, при этом выпадает в осадок и может быть рекуперирована для повторного использования. Однако для успешного перехода от лабораторных исследований к промышленному масштабированию необходим широкий спектр достоверных данных о теплофизических свойствах перерабатываемых сред (изобарная теплоемкость, теплопроводность) и закономерностях протекания реакции окисления в сверхкритических условиях. Существующая база данных по таким свойствам для реальных промышленных стоков крайне ограничена, что и определяет актуальность диссертационной работы Аетова А.У., направленной на восполнение этого пробела.

Структура и содержание диссертационной работы.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 191 наименования и шести приложений. Общий объем работы составляет 222 страницы, содержащих 74 рисунка и 33 таблицы, что наглядно иллюстрирует полученные автором результаты.

Во **введении** обоснована актуальность избранной темы, четко сформулированы цель и задачи исследования, раскрыты научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, представлены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава представляет собой аналитический обзор современных методов утилизации промышленных водных стоков. Особое внимание уделено процессу сверхкритического водного окисления (СКВО), его преимуществам и недостаткам, а также анализу эксплуатационных затрат.

На основе проведенного обзора автором обоснованы цель и задачи собственного исследования.

Вторая глава посвящена теоретическим аспектам работы: рассмотрена природа критического состояния воды, проанализировано изменение её свойств при переходе в сверхкритическую область, а также детально описан процесс образования молибденсодержащего стока на примере производства ПАО «Нижекамскнефтехим» (эпоксидирование пропилена).

В **третьей главе** представлено подробное описание экспериментальных установок и методик исследований. Автором модернизированы установки для измерения изобарной теплоемкости (метод динамического калориметра) и коэффициента теплопроводности (метод нагретой нити), а также разработана оригинальная установка проточного типа с индукционным нагревом для реализации процесса СКВО. Приведены результаты апробации установок, оценки погрешностей и конструктивные расчеты.

Четвертая глава, являющаяся центральной в работе, содержит результаты экспериментального исследования теплофизических свойств. Автором впервые получены данные по изобарной теплоемкости монопропиленгликоля, его водного раствора, ацетофенона и молибденсодержащего стока в широком диапазоне температур (303,15–473,15 К) и давлений (0,098–29,4 МПа). Исследовано влияние ультразвукового эмульгирования на теплоемкость стоков различной концентрации. Представлены также новые данные по теплопроводности указанных веществ при атмосферном давлении до 473,15 К. Проведен тщательный анализ неопределенности измерений.

В **пятой главе** изложены результаты исследования кинетики и технологических закономерностей процесса СКВО. На модельных системах (олеиновая и уксусная кислоты) отработана методика, затем проведены эксперименты с реальным 5% водным раствором стока при

варьировании температуры (673,15–873,15 К), давления (25 МПа), коэффициента избытка кислорода (2,5–4) и времени пребывания. Установлено, что ключевыми факторами эффективности процесса являются избыток кислорода и время пребывания реакционной смеси в реакторе. Определены кинетические параметры (константы скорости, энергия активации). Выполнено моделирование процесса и технико-экономическое обоснование с использованием современных программных продуктов. Разработана и зарегистрирована программа для ЭВМ, позволяющая прогнозировать эффективность утилизации стока в зависимости от технологических параметров.

В заключении сформулированы основные выводы, обобщающие результаты выполненного исследования.

Соответствие автореферата основным положениям диссертации. Автореферат диссертации полностью соответствует её содержанию, в полном объеме отражает постановку задач, методику исследований, полученные результаты и основные выводы. Структура и объем автореферата соответствуют требованиям, предъявляемым ВАК. Публикации автора достаточно полно освещают ключевые результаты диссертационной работы.

Научная новизна полученных результатов. Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

- Впервые получены экспериментальные данные по изобарной теплоёмкости и коэффициенту теплопроводности монопропиленгликоля, его водного раствора и ацетофенона, а также молибденсодержащих сточных вод — как исходных, так и подвергнутых ультразвуковому эмульгированию — в широком диапазоне температур и давлений.

- Разработаны оригинальная экспериментальная установка проточного типа с индукционным нагревом и способ для исследования процессов утилизации промышленных водных стоков в сверхкритических флюидных условиях, обладающие патентной новизной.

- Впервые реализован проточный режим реакции сверхкритического водного окисления применительно к утилизации молибденсодержащих сточных вод.

- Установлены технологические закономерности окисления органических компонентов и молибденсодержащих сточных вод кислородом воздуха в сверхкритических флюидных условиях в проточном режиме с индукционным нагревом реактора.

- Показано, что ключевыми факторами эффективности процесса утилизации молибденсодержащих сточных вод являются время пребывания стока в реакторе и избыток кислорода воздуха.

- Разработана и запатентована программа для ЭВМ, предназначенная для прогнозирования эффективности процесса утилизации молибденсодержащих сточных вод.

- Выполнено моделирование и технико-экономическое обоснование процесса сверхкритического водного окисления и пилотной установки утилизации молибденсодержащих сточных вод с использованием современных программных продуктов, направленные на оптимизацию промежуточных этапов и стратегическое управление внедрением технологии в промышленность.

Достоверность и обоснованность полученных результатов.

Достоверность полученных в диссертационной работе результатов обеспечивается комплексным подходом к проведению исследований. Автором использованы современные, хорошо апробированные методы измерения теплофизических свойств – динамическая калориметрия для определения изобарной теплоемкости и метод нагретой нити для измерения коэффициента теплопроводности. Корректность работы экспериментальных установок подтверждена путем проведения калибровочных экспериментов на эталонных веществах (вода, н-октан), для которых имеются надежные литературные данные. Полученные в ходе калибровки результаты показали хорошую согласованность с

литературными значениями в пределах заявленных погрешностей. Экспериментальные исследования выполнены на сертифицированном оборудовании с применением современных средств измерения и регистрации данных. Проведена обработка результатов с оценкой неопределенностей, что позволяет судить о воспроизводимости и точности полученных экспериментальных данных. Обоснованность научных положений и выводов диссертации подтверждается непротиворечивостью полученных экспериментальных данных фундаментальным физическим законам и закономерностям, а также их согласованностью с результатами других исследователей в доступных диапазонах параметров состояния.

Апробация работы. Ключевые результаты диссертационного исследования были представлены и прошли всестороннее обсуждение в рамках многочисленных международных, всероссийских и региональных научных конференций, а также на профильных научных семинарах с участием ведущих специалистов в области теплофизики, химической технологии и сверхкритических флюидных сред. Среди наиболее значимых мероприятий следует отметить: XV Российскую конференцию (с международным участием) по теплофизическим свойствам веществ (Москва, 2018); Международную научно-практическую конференцию «Инновации в области естественных наук как основа экспортоориентированной индустриализации Казахстана» (Алматы, Казахстан, 2019); международные молодежные научные конференции «Нефть и газ» (Москва, 2017, 2018, 2020); XVIII Международный симпозиум «Энергоресурсоэффективность и энергосбережение» (Казань, 2018); научно-практические конференции с международным участием «Сверхкритические флюиды: фундаментальные основы, технологии, инновации» (2017–2023); Всероссийскую конференцию «XL Сибирский теплофизический семинар», посвященную 110-летию со дня рождения С.С. Кутателадзе и 300-летию РАН (Новосибирск, 2024); Всероссийский

форум «Енисейская теплофизика – 2025» (Красноярск, 2025), а также многие другие.

Полнота изложения материалов диссертации в опубликованных работах соответствует требованиям ВАК Минобрнауки России. Содержание диссертации достаточно полно отражено в 29 научных работах, в том числе: 11 статьях в изданиях, индексируемых в международных базах Web of Science и Scopus (из них 1 статья в журнале первого квартиля и 3 – второго квартиля); 4 статьях в журналах базы RSCI; 9 статьях в других рецензируемых журналах. Соискателем получено 4 патента РФ и 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Таким образом, результаты диссертационной работы прошли всестороннюю апробацию и получили признание научного сообщества.

Теоретическая и практическая значимость работы.
Теоретическая значимость диссертационного исследования заключается в существенном расширении и систематизации базы данных по теплофизическим свойствам веществ, участвующих в процессе сверхкритического водного окисления. Полученные автором экспериментальные данные по изобарной теплоемкости и коэффициенту теплопроводности монопропиленгликоля, его водных растворов, ацетофенона и реального молибденсодержащего стока в широком диапазоне температур и давлений вносят важный вклад в развитие научных представлений о поведении многокомпонентных систем в сверхкритических флюидных средах. Установленные кинетические закономерности процесса окисления углубляют понимание механизмов трансформации органических соединений в условиях сверхкритической воды и создают основу для дальнейших теоретических обобщений.

Практическая значимость работы подтверждается созданием и модернизацией экспериментальных установок, которые могут служить прототипами при разработке промышленного оборудования для

утилизации жидких отходов. Полученные результаты – теплофизические свойства, кинетические данные, оптимальные режимные параметры – представляют собой необходимую основу для математического моделирования, оптимизации и последующего масштабирования технологии переработки молибденсодержащих стоков. Разработанная и зарегистрированная программа для ЭВМ позволяет оперативно прогнозировать эффективность процесса в зависимости от варьируемых технологических параметров, что существенно облегчает проектирование.

Особо следует отметить, что результаты диссертационной работы уже нашли практическое применение, что подтверждено соответствующими актами внедрения от АО «Татнефтехиминвест-холдинг», ООО ИВЦ «Инжехим», ООО «Ферри Ватт», ООО «К-Точка» и ООО «Компакт». Это свидетельствует о реальной востребованности полученных результатов в промышленности и их готовности к дальнейшему использованию при создании опытно-промышленных установок.

Рекомендации по использованию результатов диссертации. Полученные в диссертационной работе экспериментальные данные и выявленные закономерности могут быть рекомендованы к использованию при проектировании и создании опытно-промышленных и промышленных установок для утилизации жидких органических отходов методом сверхкритического водного окисления, в первую очередь на предприятиях нефтехимического комплекса, таких как ПАО «Нижекамскнефтехим». Результаты измерений теплофизических свойств представляют значительную ценность для пополнения специализированных баз данных, включая международные (NIST) и отечественные (ВНИЦ СМВ) информационные системы, что позволит использовать их при термодинамическом моделировании различных процессов. Разработанная программа для ЭВМ, предназначенная для расчета эффективности окисления компонентов промышленного стока, может найти применение в деятельности инжиниринговых компаний, специализирующихся на

внедрении сверхкритических флюидных технологий, для предварительной оценки и оптимизации технологических параметров процесса. Материалы диссертации целесообразно использовать в учебном процессе при подготовке магистров и аспирантов по направлениям «Теплоэнергетика и теплотехника» и «Химическая технология», в частности, при чтении курсов по теплофизическим свойствам веществ, методам утилизации промышленных отходов и сверхкритическим флюидным технологиям.

Соответствие паспорту специальности. Диссертационная работа Аетова А.У. соответствует паспорту научной специальности 1.3.14. «Теплофизика и теоретическая теплотехника» (отрасль науки – технические). Выполненное исследование охватывает следующие пункты, предусмотренные паспортом специальности:

– пункт 1: «Экспериментальные исследования термодинамических и переносных свойств чистых веществ и их смесей в широкой области параметров состояния»;

– пункт 6: «Экспериментальные исследования, физическое и численное моделирование процессов переноса массы, импульса и энергии в многофазных системах и при фазовых превращениях».

Замечания по диссертационной работе. При подробном рассмотрении диссертационной работы можно отметить следующие замечания:

1. В диссертационной работе Аетова А.У. измерение коэффициента теплопроводности проводилось методом нагретой нити, в то время как существует импульсный метод измерений, который позволяет исключить влияние радиационной составляющей. Чем обусловлен выбор именно метода нагретой нити?

2. Для доказательства работоспособности экспериментальной установки по измерению коэффициентов теплопроводности, а также методики проведения эксперимента были выполнены исследования по измерению

коэффициентов теплопроводности н-октана. По какой причине был выбран именно н-октан в качестве тестовой жидкости для апробации?

3. Измерения теплофизических свойств (изобарная теплоемкость и коэффициент теплопроводности) компонентов реакционной смеси и самого молибденсодержащего водного стока проводились в основном при температурах до 473 К, что ниже рабочего диапазона процесса СКВО (673–873 К). Насколько корректно экстраполировать полученные данные на область сверхкритических температур?

4. В работе исследовано влияние ультразвукового эмульгирования на изобарную теплоемкость стоков различной концентрации (рис. 4.8). Наблюдается интересный эффект: теплоемкость эмульгированных образцов приближается к значениям дистиллированной воды. С чем автор связывает данное явление и может ли оно быть использовано для интенсификации процесса СКВО в промышленных масштабах?

5. В тексте главы 5 диссертационной работы упоминается о сформированном технико-технологическом предложении для ПАО «Нижекамскнефтехим» по инновационной СКФ-технологии утилизации молибденсодержащего стока процесса эпоксидирования пропилена. Целесообразно было бы привести основные положения этого предложения в виде отдельного подраздела в главе 5 в краткой форме.

6. В диссертации эффективность очистки водных стоков оценивалась по химическому потреблению кислорода (ХПК). Почему не были использованы другие способы оценки, например, такие как определение предельно допустимых концентраций (ПДК) отдельных компонентов, биохимическое потребление кислорода (БПК) или анализ по материальному балансу компонентов?

В целом отмеченные замечания не влияют на общую положительную оценку работы. Работа выполнена на высоком научно-техническом уровне с использованием современной измерительной и вычислительной техники.

Общее заключение. Отмеченные в отзыве замечания не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы, которая является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на высоком научно-техническом уровне.

Автореферат написан качественным научным языком и в полной мере отражает основные положения диссертации. Полученные в работе результаты физически не противоречивы, хорошо обоснованы, обладают научной новизной и имеют несомненную теоретическую и практическую значимость. Результаты исследований могут быть применены при проектировании промышленных установок для утилизации жидких отходов нефтехимических производств. По теме диссертации опубликовано 29 научных работ, в том числе 11 статей в изданиях, индексируемых в международных базах Web of Science и Scopus, получено 4 патента РФ и 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ, что свидетельствует о высокой квалификации автора и качестве проведенных исследований.

Вышесказанное позволяет сделать вывод, что диссертационная работа Аетова Алмаза Ураловича на тему «Теплофизические свойства веществ и закономерности процесса окисления молибденсодержащего промышленного водного стока в сверхкритических флюидных условиях» является завершенной научно-квалификационной работой, соответствующей критериям пп. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (в действующей редакции), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, а её автор – Аетов Алмаз Уралович – заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Доклад Аетова А.У. по диссертационной работе заслушан и обсужден на расширенном научно-техническом семинаре кафедры теплотехники и

энергетического машиностроения ФГБОУ ВО «КНИТУ-КАИ» «19» марта 2026 г., а отзыв рассмотрен и одобрен на этом же научно-техническом семинаре, Протокол № 8 от «19» марта 2026 г. Отзыв подготовили:

Профессор кафедры

теплотехники и энергетического машиностроения

ФГБОУ ВО «КНИТУ-КАИ»,

д.т.н. (01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника), проф.,

член-корреспондент АН РТ



Попов Игорь Александрович

Доцент кафедры

теплотехники и энергетического машиностроения

ФГБОУ ВО «КНИТУ-КАИ»,

д.т.н. (1.3.14. – Теплофизика и теоретическая теплотехника; 2.5.15. –

Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов), доц.



Алтунин Константин Витальевич

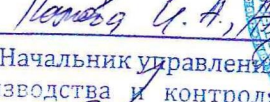
Полное наименование организации: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ»,

Почтовый адрес: 420111, Россия, Республика Татарстан, г. Казань, ул. К. Маркса, 10

Тел.: +7 (843) 231 01 09, +7 (843) 238 55 50

Адрес электронной почты: kai@kai.ru, tot@kai.ru, turbom@kai.ru

Адрес официального сайта в сети «Интернет»: <https://kai.ru/>

Подпись 
заверяю. Начальник управления
делопроизводства и контроля

