

ОТЗЫВ

официального оппонента

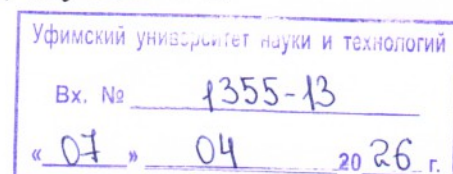
на диссертационную работу Аетова Алмаза Ураловича на тему «Теплофизические свойства веществ и закономерности процесса окисления молибденсодержащего промышленного водного стока в сверхкритических флюидных условиях», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности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

Настоящий отзыв составлен по результатам ознакомления с диссертационной работой, авторефератом и опубликованными соискателем научными трудами по теме исследования.

Актуальность темы диссертационной работы

Химическая и нефтехимическая промышленность играют ключевую роль в современной экономике, однако интенсификация производственных процессов неизбежно сопровождается увеличением объема токсичных отходов и выбросов, что создает серьезные экологические проблемы. Особую сложность с точки зрения минимизации воздействия на окружающую среду представляет утилизация жидких отходов предприятий органического синтеза. В этой связи проблема снижения техногенной нагрузки приобретает все большую актуальность, что нашло отражение в Национальном проекте «Экология», реализованном в России в 2019–2024 годах, одним из ключевых направлений которого являлась переработка и утилизация отходов.

Перспективным методом решения данной проблемы является процесс сверхкритического водного окисления (СКВО), основанный на уникальных свойствах воды в закритической области параметров состояния. Для оценки применимости и последующего масштабирования технологии СКВО требуется проведение комплекса фундаментальных исследований, включая изучение теплофизических свойств перерабатываемых сред. Промышленные водные стоки представляют собой многокомпонентные, химически неоднородные смеси, свойства которых в условиях, близких к критическим, изучены недостаточно.



Традиционный подход термического обезвреживания таких отходов является не только затратным, но и экологически несовершенным. Таким образом, разработка новых, экологически безопасных методов глубокой переработки промышленных стоков и создание необходимой для этого базы теплофизических данных является важной научно-технической задачей, что подтверждает актуальность диссертационной работы Аетова А.У.

Основное содержание работы

Диссертационная работа Аетова А.У. имеет традиционную структуру и состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка и шести приложений. Работа изложена на 222 страницах машинописного текста, содержит 74 рисунка и 33 таблицы. Список использованной литературы включает 191 наименование.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, показаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, а также личный вклад автора.

В первой главе выполнен анализ современного состояния проблемы утилизации промышленных водных стоков с использованием сверхкритических флюидных технологий. Подробно рассмотрен процесс СКВО, проведен анализ эксплуатационных затрат, на основе чего сделан вывод о перспективности применения сверхкритических флюидов для решения задач водоочистки.

Вторая глава посвящена исследованию молибденсодержащего стока ПАО «Нижекамскнефтехим» – объекта исследования. Описан процесс эпексидирования олефинов с использованием молибденового катализатора, рассмотрены известные методы утилизации подобных отходов, а также проанализировано изменение свойств воды при переходе в сверхкритическое состояние.

Третья глава содержит подробное описание экспериментальной части работы. Представлены аппаратное оформление и методики измерений теплофизических свойств (изобарной теплоемкости и коэффициента теплопроводности), обоснован выбор методов исследований. Описана

модернизация экспериментальных стендов, а также оригинальная проточная установка с индукционным нагревом для реализации процесса СКВО.

Четвертая глава, составляющая основу диссертационного исследования, содержит главные и ключевые результаты работы. В ней представлены экспериментальные данные по изобарной теплоемкости и коэффициенту теплопроводности чистых компонентов (монопропиленгликоля, ацетофенона), бинарных систем и непосредственно молибденсодержащего водного стока. Проведен тщательный анализ влияния температуры, давления и состава на исследованные свойства, выполнена оценка погрешностей измерений. Полученные в этой главе результаты имеют фундаментальное значение для пополнения баз данных по теплофизическим свойствам веществ и являются необходимой основой для последующего моделирования и масштабирования процесса СКВО.

В пятой главе представлены результаты исследований процесса утилизации промышленного стока методом СКВО. Установлено, что определяющее влияние на эффективность процесса оказывают избыток кислорода и время пребывания реакционной смеси в реакторе. Показано, что при оптимальных параметрах достигается выполнение экологических требований к качеству очищенной воды.

В заключении сформулированы основные выводы, обобщающие результаты выполненной работы.

Научная новизна полученных результатов

Научная новизна результатов диссертации состоит в получении ряда новых результатов, наиболее важными из которых являются следующие:

1) 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.

2) 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.

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

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

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

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

7) 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.

Теоретическая и практическая значимость полученных результатов

Теоретическая значимость диссертационной работы состоит в существенном расширении базы данных по теплофизическим свойствам веществ, участвующих в процессе утилизации промышленных водных стоков. Полученные экспериментальные данные по изобарной теплоемкости и коэффициенту теплопроводности монопропиленгликоля, его водных растворов, ацетофенона и реального молибденсодержащего стока в широком диапазоне параметров состояния вносят важный вклад в развитие научных представлений о поведении многокомпонентных систем в условиях, близких к сверхкритическим, и о закономерностях окисления органических соединений в водных средах в сверхкритическом флюидном состоянии.

Практическая значимость работы заключается в создании оригинальной экспериментальной установки для реализации процесса СКВО в проточном режиме с индукционным нагревом, а также в модернизации двух измерительных стендов для исследования теплофизических свойств жидкофазных сред. Результаты диссертационного исследования внедрены и используются в деятельности ряда организаций, что подтверждено соответствующими актами о внедрении.

Достоверность полученных результатов

Достоверность экспериментальных данных обеспечена применением общепринятых, теоретически обоснованных методов исследования, использованием современного сертифицированного измерительного оборудования, а также тщательной калибровкой установок на эталонных веществах. Корректность разработанных методик и работоспособность экспериментальных стендов подтверждены хорошей согласованностью полученных результатов с надежными литературными данными в доступных диапазонах параметров. В работе проведена оценка неопределенности измерений, что позволяет судить о воспроизводимости и точности полученных данных.

Личное участие соискателя

Личный вклад Аетова А.У. заключается в разработке методик исследования, создании и модернизации экспериментальных установок, непосредственном проведении всех экспериментальных исследований, обработке и анализе полученных результатов, формулировке выводов и подготовке публикаций по теме диссертации.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на международных и всероссийских конференциях и форумах, соответствующих тематике искомой специальности. Полнота изложения материалов диссертации в опубликованных работах соответствует требованиям ВАК Минобрнауки России. Содержание диссертационной работы достаточно полно отражено в научных публикациях. Результаты диссертационной работы изложены в 29 научных

работах, в том числе 11 научных статьях, входящих в международную реферативную базу данных Web of Science/Scopus (из них 1 Q1 и 3 Q2), 4 – в журналах, входящем в базу данных RSCI, 9 научных статей в прочих рецензируемых журналах. Получено 4 патента РФ и 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Опубликовано также 30 тезисов докладов на конференциях различного уровня.

Соответствие содержания автореферата основным положениям диссертации

Автореферат диссертации написан в соответствии с установленными требованиями, его содержание полностью отражает основные положения, результаты и выводы диссертационной работы. Структура и объем автореферата соответствуют предъявляемым требованиям.

Соответствие паспорту специальности

Диссертационная работа Аетова А.У. соответствует паспорту научной специальности 1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника в части пунктов – 1. Экспериментальные исследования термодинамических и переносных свойств чистых веществ и их смесей в широкой области параметров состояния; 6. Экспериментальные исследования, физическое и численное моделирование процессов переноса массы, импульса и энергии в многофазных системах и при фазовых превращениях.

Рекомендации по использованию результатов диссертационной работы

Полученные в диссертации экспериментальные данные по теплофизическим свойствам веществ и установленные закономерности процесса сверхкритического водного окисления могут найти широкое применение в различных областях. Прежде всего, они представляют практический интерес для инженеринговых компаний, специализирующихся на разработке и внедрении сверхкритических флюидных технологий (ООО ИВЦ «Инжехим», ООО «ФЕРРИ ВАТТ» и другие), при проектировании опытно-промышленных и промышленных установок для утилизации жидких органических отходов нефтехимических производств. Результаты измерений теплофизических свойств монопропиленгликоля, ацетофенона и реального молибденсодержащего стока могут рассматриваться для включения в специализированные базы данных по

свойствам веществ, такие как NIST, PPDS, DDBST, что позволит использовать их при термодинамическом моделировании различных процессов. Разработанные методики экспериментального исследования и полученные кинетические зависимости могут служить методологической основой при изучении других химических реакций, предполагаемых к проведению в сверхкритических флюидных средах.

Замечания по диссертационной работе

1) В литературном обзоре (главы 1 и 2) следовало бы более системно представить информацию о наличии в существующих базах данных (NIST, DDBST, PPDS и др.) теплофизических свойств компонентов, входящих в состав исследуемого промышленного стока. Это позволило бы более четко обозначить пробелы в имеющихся данных и наглядно обосновать необходимость проведения дополнительных экспериментальных исследований, выполненных автором.

2) В главе 5, на рис. 4.12 приводится один из важных результатов данной работы – температурная зависимость теплопроводности молибденсодержащего водного стока при атмосферном давлении и ее сравнение с соответствующей зависимостью для воды. Однако, приведенное ниже в тексте диссертации описание данного рисунка запутывает и дезориентирует читателя. Во-первых, указано, что теплопроводность воды и стока падают с ростом температуры (что не согласуется с рис. 4.12 и, как известно, совершенно не верно для воды). Во-вторых, указано, что значения теплопроводности молибденсодержащего водного стока систематически ниже, чем у воды (что также не согласуется с рис. 4.12). Соискателю следовало более внимательно отнестись к описанию приведенных на рис. 4.12 зависимостей.

3) Остается не до конца ясным вопрос о том, каким образом в модернизированной установке для измерения изобарной теплоемкости учитываются тепловые потери измерительной ячейки через присоединительную трубку, и оказывает ли это влияние на точность получаемых результатов.

4) Требуется пояснения выбор объектов для исследования теплофизических свойств. В работе детально изучены изобарная теплоемкость и коэффициент теплопроводности монопропиленгликоля и ацетофенона. Однако, исходя из

данных главы 5, исследуемый промышленный сток имеет многокомпонентный состав и содержит также другие углеводороды (этилбензол, толуол, стирол и др.). Чем обусловлен выбор для детального исследования именно указанных двух компонентов?

5) При описании установки по измерению изобарной теплоемкости указано, что расширенная неопределенность измерений температуры ± 15 мК. Однако, известно, что использование хромель-алюмелевой термопары позволяет измерять температуру с погрешностью около $\pm 1,5$ К. Как удалось добиться такой высокой точности измерения температуры?

6) При описании установки по измерению изобарной теплоемкости указано, что она позволяет определять теплоемкость гетерогенных систем при давлениях до 60 МПа. Далее, в той же главе, указано, что формула (3.8) применяется для определения теплоемкости гетерогенных систем при давлениях до 30 МПа. При этом, в главе 4 для разных исследованных объектов приводятся результаты до 24,5 МПа, 50 МПа, 100 МПа и даже 147 МПа. Какова, все-таки, верхняя граница интервала давлений для использованной в данной работе установки?

7) В главе 5 при описании экспериментов на модельных жидкостях не указано, по какой причине в качестве таких жидкостей были выбраны именно олеиновая и уксусная кислоты. Обоснование этого выбора усилило бы понимание методологии исследования.

8) В тексте диссертации встречаются отдельные опечатки, стилистические погрешности, недостаточно высокого качества изображения схем использованных экспериментальных установок и неудачные формулировки. Однако, следует подчеркнуть, что указанные недостатки носят незначительный характер и не влияют на достоверность и значимость полученных результатов и сделанных выводов.

Отмеченные замечания не затрагивают основных положений, выносимых соискателем на защиту, не снижают научной и практической ценности диссертационной работы А.У. Аетова и не влияют на ее общую положительную оценку.

Заключение

Диссертационная работа Аетова Алмаза Ураловича на тему «Теплофизические свойства веществ и закономерности процесса окисления молибденсодержащего промышленного водного стока в сверхкритических флюидных условиях» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, выполненную автором самостоятельно на высоком научном уровне. По объему исследований, актуальности, научной новизне и практической значимости диссертационная работа соответствует требованиям пп. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г. (в текущей редакции), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор – Аетов Алмаз Уралович – заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Официальный оппонент:

Заведующий лабораторией термодинамики веществ и материалов
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения
Российской академии наук,
кандидат физико-математических наук
(01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника):

Расул Нажмуудинович Абдуллаев



Рабочий почтовый адрес: 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д. 1.

Рабочий телефон: +7 (383) 335-62-31.

e-mail: abdullaev.rasul88@gmail.com

Согласен на обработку персональных данных, включение персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку, а также на размещение персональных данных и моего отзыва на диссертацию на сайте ФГБОУ ВО

«Уфимский университет науки и технологий» и в Федеральной информационной системе государственной научной аттестации (ФИС ГНА).

Расул Нажмудинович Абдуллаев



Подписи Р.Н. Абдуллаева удостоверяю
Ученый секретарь ИТ СО РАН, к.ф.-м.н.



А.А. Ягодницына 24 марта 2026 г.

