

ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ



На правах рукописи



Керимбекова Сусанна Александровна

**ИСПАРЕНИЕ НЕОДНОРОДНЫХ КАПЕЛЬ ЖИДКОСТЕЙ
В УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИВНОГО НАГРЕВА**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Томск – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Научный руководитель:

Стрижак Павел Александрович

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией теплообмена, Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Официальные оппоненты:

Дулин Владимир Михайлович

доктор физико-математических наук, профессор РАН, ведущий научный сотрудник лаборатории физических основ энергетических технологий, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук

Минаков Андрей Викторович

доктор физико-математических наук, профессор, директор Института инженерной физики и радиоэлектроники, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет»

Защита состоится 25 декабря 2023 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.04 Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 43 (учебный корпус № 3 ТПУ, аудитория 122).



С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета и на сайте dis.tpu.ru при помощи QR-кода.

Автореферат разослан «27» октября 2023 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета ДС.ТПУ.04
кандидат технических наук, доцент

A handwritten signature in blue ink, consisting of a stylized 'D' followed by a horizontal line and a small flourish.

Дмитрий Васильевич Гвоздяков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Разработка новых и модернизация использующихся в настоящее время высокотемпературных технологий сводится к решению задач интенсификации физико-химических и тепломассобменных процессов. Среди них можно выделить технологии создания теплоносителей на базе дымовых газов, капель и паров воды; термической и огневой очистки жидкостей; полидисперсного пожаротушения; сжигания суспензионных, жидких и эмульсионных топлив; очистки теплонагруженных поверхностей. В технологических процессах нередко используются неоднородные жидкости, например, неочищенная от растворенных и нерастворенных в ней примесей вода, огнетушащие составы с добавками, топлива на водной основе и др. Исследования процессов нагрева и испарения таких неоднородных капель жидкостей крайне важны.

Большое количество промышленных производств сопровождается выработкой технологических и сточных вод (промстоков), в состав которых входят ухудшающие экологическую обстановку вещества: гликоли, амины, метанол, газовый конденсат, сероводород и различные соли. Очистка промстоков, как правило, осуществляется выпариванием (концентрирование примесей), сушкой (распыление жидкости в газовой среде и дымовых газах), термическим окислением (выжигание горючих примесей). Перечисленные методы реализуются при взаимодействии распылённого потока жидкости и высокотемпературных газов (воздуха, продуктов сгорания топлив, газовых смесей). Определяющую роль играют процессы прогрева и испарения капель таких неоднородных капель.

Исследования процессов прогрева и испарения капель в пламенной зоне при доминировании конвективного и радиационного теплообмена важны в развитии топливных технологий на основе водных суспензий, эмульсий и технологий полидисперсного пожаротушения. Это обусловлено существенным влиянием процессов прогрева и испарения на эффективность зажигания и горения капель таких топлив и, как следствие, на концентрации антропогенных газовых выбросов, в частности, CO_x , NO_x , SO_x и др. Для эффективного управления этими процессами необходимо контролировать состав распыляемых жидкостей. Для многокомпонентных смесей довольно сложно прогнозировать состав струй и отдельных капель. Соответственно, затруднительно предсказывать характеристики испарения соответствующих смесей в технологических установках. Это сдерживает развитие технологий и оптимизацию размеров данных установок.

Степень разработанности темы исследования. Разнородность компонентов в струе значительно влияет на интегральные характеристики испарения жидкости. Определение компонентного состава неоднородных капель суспензионного топлива дает возможность прогнозирования условия их эффективного зажигания и горения с учетом разделения и измельчения. В настоящее время в научной литературе

недостаточно результатов экспериментальных исследований, направленных на определение компонентного состава капель распыленной жидкости и оценки его влияния на характеристики испарения капель. Адаптивные методики определения состава неоднородных капель в процессе их распыления пока не разработаны. Недостаточно экспериментальных данных о скоростях испарения капель воды с типичными примесями и добавками при различных схемах и темпах нагрева. Это обусловлено с тем, что для соответствующих процессов характерны высокие скорости и довольно большая совокупность разнонаправленно влияющих факторов: размеры капель; концентрации основных компонентов, добавок и примесей; температура жидкости и газовой среды; подводимый тепловой поток; схема нагрева и др. Для разработки адекватных моделей необходимы экспериментальные данные, которые можно получить при комбинированном применении контактных и бесконтактных методов регистрации параметров многофазных и многокомпонентных систем. Это мотивировало настоящее исследование.

Цель диссертационной работы – определение скоростей испарения неоднородных капель жидкостей с идентификацией в них примесей и добавок на основе результатов экспериментальных исследований при воспроизведении условий теплообмена, соответствующих работе теплогенерирующих блоков, агрегатов и систем.

Для достижения поставленной цели решались **задачи**:

1. Разработка методики экспериментальных исследований состава капель, а также определение характеристик испарения при варьировании параметров исследуемых процессов: температуры внешней среды, начальной температуры и размеров капель, их компонентного состава, плотности теплового потока, схемы и темпа нагрева.

2. Создание экспериментальных стендов, реализующих совместное применение контактных и бесконтактных оптических методов измерений, с возможностью одновременной регистрации совокупности параметров исследуемого процесса, в том числе размеров, формы, скорости и траектории движения, компонентного состава капель.

3. Адаптация бесконтактных оптических методик (лазерная индуцированная флуоресценция, интерферометрия, теневая макросъемка) для идентификации твердых и жидких компонентов в распыленном аэрозольном потоке, установление состава капель и аэрозольного спрея.

4. Экспериментальное определение скоростей испарения капель воды с технологическими добавками (на примерах твердой, растворимой и нерастворимой) при различных схемах нагрева с доминированием конвективного, радиационного, кондуктивного, а также в условиях смешанного теплообмена.

5. Анализ влияния типа и концентрации примесей и добавок в каплях растворов, суспензий, эмульсий на значения скоростей их испарения.

6. Математическая обработка результатов экспериментов с получением обобщенных выражений для прогнозирования значений скоростей испарения неоднородных капель жидкостей при разных схемах и темпах нагрева.

7. Разработка рекомендаций по использованию полученных экспериментальных результатов при совершенствовании высокотемпературных газопарокапельных топливных, теплообменных и оросительных технологий.

Соответствие диссертации Паспорту научной специальности. Диссертация соответствует паспорту специальности 1.3.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника» в части пункта 6 – «Экспериментальные исследования, физическое и численное моделирование процессов переноса массы, импульса и энергии в многофазных системах и при фазовых превращениях».

Научная новизна. Разработана методика определения значений скорости испарения жидкости в составе аэрозоля при известных значениях скорости испарения одиночных капель. Определены диапазоны изменения скоростей испарения капель воды с типичными (растворимыми и нерастворимыми) примесями и добавками при различных схемах нагрева с доминированием конвективного, радиационного, кондуктивного, а также в условиях смешанного теплообмена. Установлено влияние типа и концентрации примеси и добавки, схемы и темпа нагрева, температуры внешней среды, теплового потока на характеристики испарения капель. Предложен подход к прогнозированию скорости испарения капель при известном компонентном составе. Получены аппроксимационные выражения в безразмерном виде, связывающие скорости испарения жидкости с концентрациями и свойствами примесей и добавок. Предложенный подход к определению компонентного состава неоднородных капель жидкостей обеспечивает возможность одновременной регистрации совокупности параметров: размеры капель, скорость их движения, дисперсность аэрозоля, температура капель и газовой среды и др.

Теоретическая и практическая значимость. Полученные экспериментальные результаты и сформулированные при их математической обработке выражения, связывающие скорости испарения с входными параметрами, являются основой для разработки и модернизации высокотемпературных газопарокапельных теплотехнологий: формирование теплоносителей на базе дымовых газов, капель и паров воды; размораживание сыпучих сред; термическая и огневая очистка жидкостей; полидисперсное пожаротушение; горение суспензионных, жидких и эмульсионных топлив; очистка теплонагруженных поверхностей и др. Предложен универсальный подход к определению компонентного состава неоднородных капель жидкостей в составе смеси при разных условиях теплообмена, отличающийся от известных применением комбинации оптических методов: теневая фотография, лазерно-индуцированная флуоресценция, интерферометрия.

Методология и методы исследований. При выполнении диссертационной работы в рамках предложенного подхода к определению компонентного состава

неоднородных капель жидкостей видеорегистрация с использованием передвижной системы осуществлялась теневая фотография, лазерно-индуцированная флуоресценция, интерферометрия. Обработка полученных видеок кадров позволила определить размеры капель, время их движения на разных участках по всей высоте цилиндрического канала. Для регистрации температуры воздуха и продуктов сгорания в экспериментах применялся измерительный комплекс, включающий высокоскоростную плату аналогового ввода и малоинерционные термодатчики.

Связь работы с научными программами и грантами. Диссертационное исследование выполнено в рамках проекта Министерства науки и высшего образования № 075-15-2020-806 (в консорциуме вузов и институтов РАН, возглавляемом Институтом теплофизики СО РАН). Тема диссертации соответствует приоритетному направлению развития науки в Российской Федерации «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика», а также находится в сфере критических технологий федерального уровня: «Технологии создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования энергии».

Основные положения и результаты, выносимые на защиту:

1. Разработан подход к идентификации типа и концентрации твердых и жидких примесей в каплях, отличающийся от известных применением комбинации бесконтактных оптических методов: лазерно-индуцированная флуоресценция, интерферометрия, теневая фотография. Предложенный подход адаптирован для регистрации характеристик изменения состава отдельных капель и sprays.

2. Наличие твердых частиц в составе капель жидкостей даже с концентрацией до 1 % способствует повышению скоростей испарения более чем на 10 %. Наличие жидких примесей в составе капель воды даже с концентрацией до 5 % способствует изменению скоростей прогрева и испарения более чем на 20 %. Получено математическое выражение для определения скорости испарения капель при известных теплофизических характеристиках и концентрации компонентов.

3. Условия теплообмена капель жидкости с твердыми, растворимыми и нерастворимыми добавками существенно влияют на диапазоны изменения скоростей испарения. В частности, определены значения этих характеристик при разных схемах теплообмена с доминированием конвективного (в потоке продуктов сгорания 0,025-0,08 кг/(м²·с)), радиационного (в муфельной печи 0,15-0,5 кг/(м²·с)), кондуктивного (на твердой поверхности 0,5-1,5 кг/(м²·с)) и смешанного (в пламени 0,02-0,1 кг/(м²·с)) теплообмена.

4. Скорости испарения капель, как элементов аэрозоля, в высокотемпературной газовой среде главным образом зависят от их концентрации и начальных размеров. Получено математическое выражение для определения скоростей этих процессов при известных радиусах капель в составе аэрозоля и одиночной капли с учетом скорости испарения последней.

Степень достоверности и апробация результатов исследования.

Достоверность полученных в ходе экспериментальных исследований результатов подтверждается оценками систематических и случайных погрешностей результатов измерений, удовлетворительной повторяемостью опытов при идентичных начальных значениях параметров, использованием высокоточных оптических методов и программно-аппаратных кросскорреляционных комплексов, а также удовлетворительной корреляцией с известными заключениями других исследователей по тестовым задачам.

Личный вклад состоит в постановке и планировании экспериментальных исследований, разработке методик, создании стендов, проведении экспериментов, обработке результатов, оценке неопределенностей измерений, анализе и обобщении полученных результатов, разработке рекомендаций по практическому использованию результатов, формулировке защищаемых положений и выводов.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на научных мероприятиях: Шестнадцатая всероссийская (восьмая международная) научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2021» (ИГЭУ им. В.И. Ленина, г. Иваново, 7.04.2021 г.); XXII Всероссийская научная конференция с международным участием "Сопряженные задачи механики реагирующих сред, информатики и экологии" (ТГУ, г. Томск, 12-14 октября 2021 г.); III International Scientific Conference «Sustainable and Efficient Use of Energy, Water and Natural Resources» (г. Санкт-Петербург, 19-24 апреля 2021 г.); XVIII Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук» (г. Томск, 27–30 апреля 2021 г.); XXVII Международный научного симпозиума студентов, аспирантов и молодых ученых имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр» (г. Томск, 3-7 апреля 2023 г.); Всероссийская конференция «XXXIX Сибирский теплофизический семинар» (г. Новосибирск, 28-31 августа 2023 г.).

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 11 печатных работах, в том числе 2 статьи в журнале из списка, рекомендованного ВАК РФ: «Письма в Журнал технической физики»; 3 статьи в высокорейтинговых журналах (входят в 1–2 квартили Web of Science) «Powder Technology» (ИФ=5,134), «Fuel» (ИФ=6,609), «Energies» (ИФ=2,676); 6 тезисов докладов на конференциях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы, включающего 151 наименование. Диссертация изложена на 121 страницах машинописного текста, содержит 37 рисунков и 8 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, отражены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, обоснована достоверность результатов исследований, приведены сведения об апробации работы.

Первая глава отражает современное состояние теоретических и экспериментальных исследований процесса испарения капель растворов, суспензий и эмульсий. Проанализированы основные результаты исследований по данной тематике, применяемые подходы и методы экспериментальных исследований. Проведена оценка достижений мировой науки в выбранном направлении. Выделены высокотемпературные газопарокапельные технологии, для которых актуально применение результатов диссертационного исследования. Обоснована целесообразность разработки методик идентификации типа и концентрации примесей и добавок в каплях жидкостей, а также установления влияния последних на интенсификацию испарения.

Во **второй главе** приведены результаты экспериментального обоснования возможности определения компонентного состава неоднородных капель жидкостей путем комбинации бесконтактных методов регистрации (теневая фотография, лазерно-индуцированная флуоресценция, интерферометрия). Комбинированное применение трех оптических методик (рис. 1) позволяет установить экспериментально

компонентный состав отдельных капель, а также распределения компонентов (твердых и жидких) в спрее.

Исследования проводились с применением распыленных суспензий, растворов, эмульсий. Основное внимание уделено композиционным жидким топливам, являющимся объектами исследований по проекту Министерства науки и высшего образования № 075-15-2020-806. В них в качестве основного твердого компонента использовался типичный отход углеобогащения – фильтр-кек длиннопламенного каменного угля (далее кек). В качестве

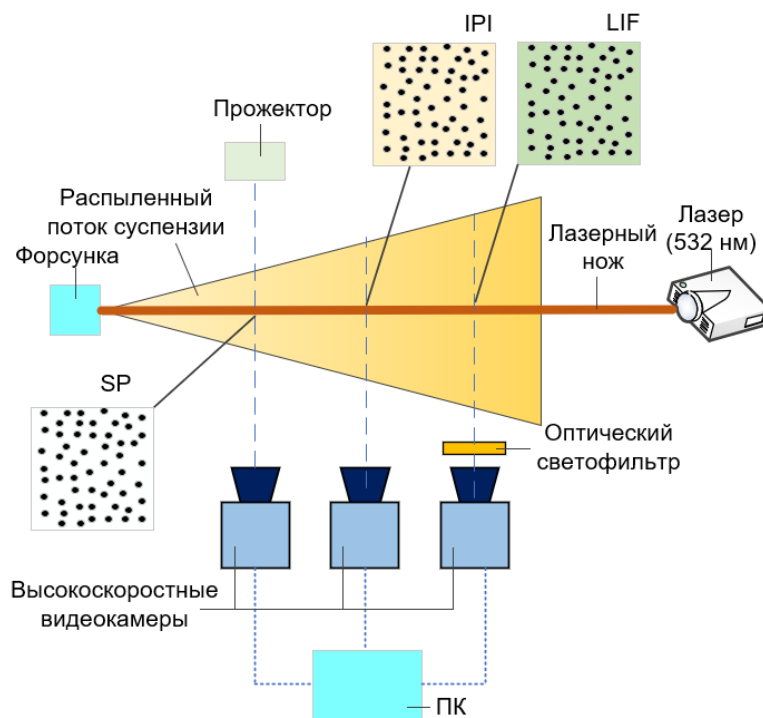


Рисунок 1 - Схема экспериментального стенда с комбинацией оптических методов: лазерно-индуцированная флуоресценция (LIF), интерферометрия (IPI), теневая фотография (SP)

дополнительных компонентов использовались древесные опилки (материал – сосна, размеры частиц 120–140 нм), а также рапсовое масло. Выбор компонентов обусловлен тенденцией обеспечения экологической безопасности мирового энергетического сектора. Во-первых, мировые запасы ископаемого топлива ограничены. Во-вторых, сжигание традиционных твердых топлив при производстве энергии сопровождается значительными антропогенными выбросами в атмосферу. В-третьих, необходимо эффективно утилизировать промышленные отходы, объемы которых быстро растут.

Основными элементами реализации метода лазерно-индуцированная флуоресценция (LIF) являются: импульсный лазер, высокоскоростная видеокамера и оптический светофильтр для нейтрализации лазерного излучения. В суспензию добавлялся органический краситель Rhodamine B. Задачи метода LIF базировались на установлении совокупности определяющих факторов: влияние размера капли воды на интенсивность свечения; влияние концентрации кека в капле и древесных опилок на интенсивность свечения.

По результатам экспериментов получена зависимость интенсивности свечения капли воды без примесей и добавок от ее объема (рис. 2 и 3). Установлено, что в диапазоне объемов капель от 2.5 мкл до 25 мкл среднее значение интенсивности свечения находится в диапазоне от 31000 ед до 42000 ед. С ростом объема капли происходит плавное увеличение средней интенсивности свечения (рис. 2). Данная особенность использовалась для определения размера капель в аэрозольном потоке с учетом интенсивности их свечения (рис. 3).

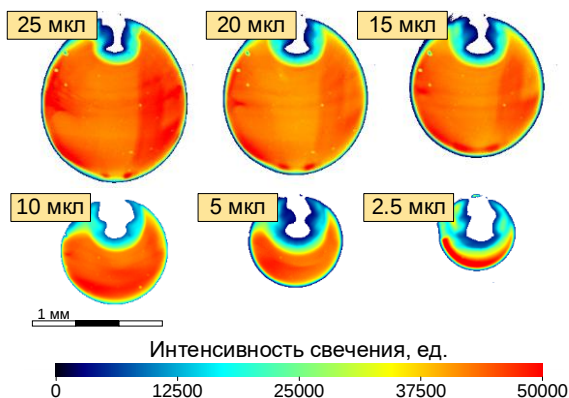


Рисунок 2 - Видеограммы капель воды без примесей при варьировании объема последних в диапазоне $V_d=2,5\text{--}25$ мкл

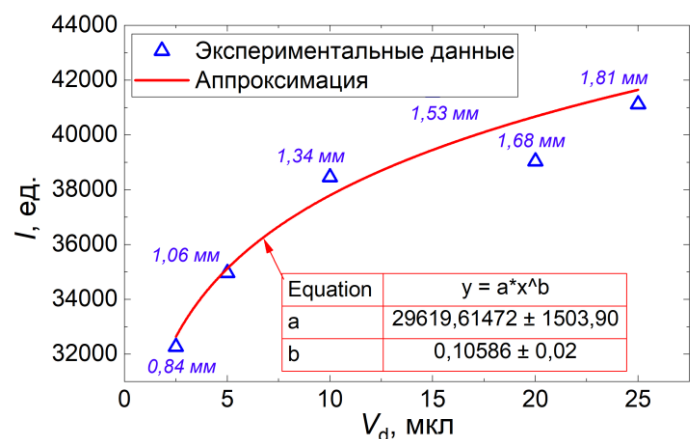


Рисунок 3 - Зависимость интенсивности свечения капли от ее объема

В экспериментах регистрировалось явление абсорбции частицами кека Rhodamine B. Установлено, что при концентрации кека в суспензии более 27 % делает капля становится непрозрачной для лазерного ножа, тем самым способствуя снижению интенсивности свечения капли практически до нуля (рис. 4). На основе

экспериментальных данных получена зависимость интенсивности свечения капли суспензии от массовой концентрации кека в последней (рис. 5).

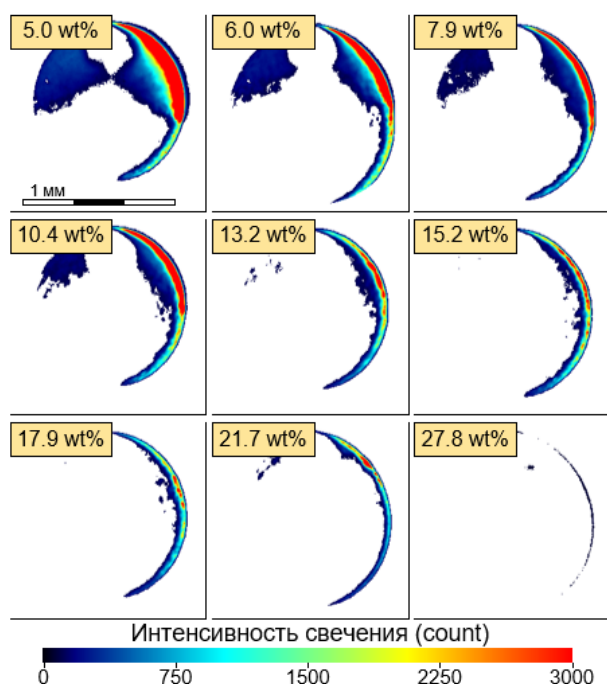


Рисунок 4 - Видеограммы капель суспензии при варьировании массовых концентраций (5–27.8 %) кека

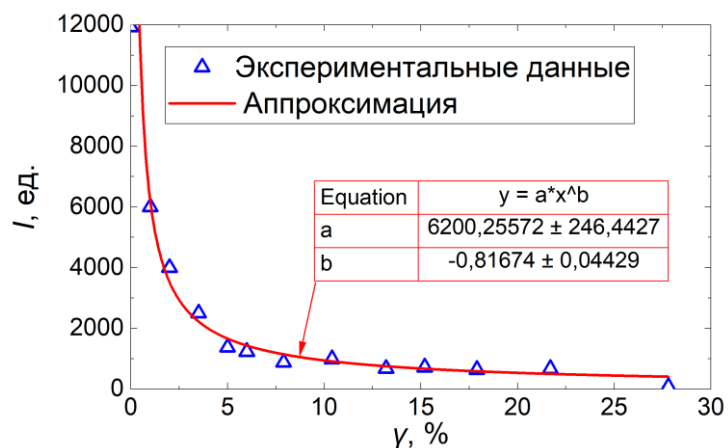


Рисунок 5 - Зависимость интенсивности свечения капли суспензии от массовой концентрации кека

Проанализированы установленные экспериментально значения интенсивности свечения капель с добавками в виде рапсового масла и древесных опилок с использованием двух видов светофильтра (рис. 6). Обосновано (рис. 7), что с использованием светофильтра с диапазоном длины волны 680 нм капли воды можно достоверно отличить от капель рапсового масла.

Проведены эксперименты с распылением исследовавшихся составов. Установлены зависимости интенсивности свечения отдельных капель в потоке от их размеров (рис. 8). Установлено также, что с использованием светофильтра (580 нм) можно отличить капли воды без и с примесью кека от капель воды и рапсового масла. По результатам экспериментов получена зависимость (рис. 9), позволяющая выделять отдельные капли суспензии, концентрация кека в которых составляет менее 7 %.

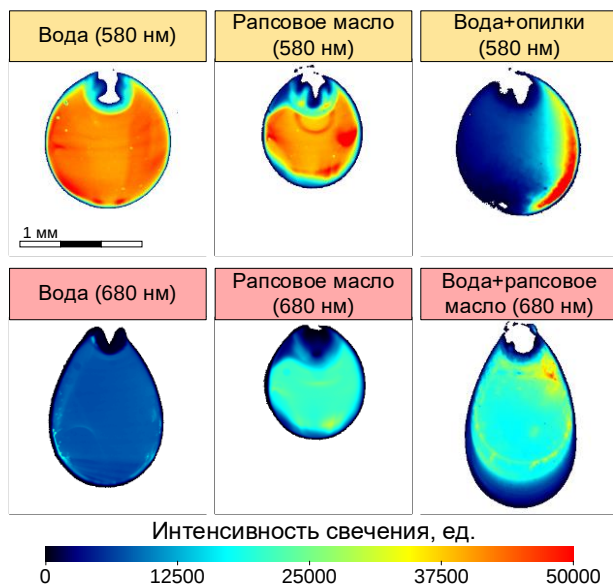


Рисунок 6 - Видеограммы капель исследовавшихся составов, полученные при использовании двух различных типов оптических светофильтров

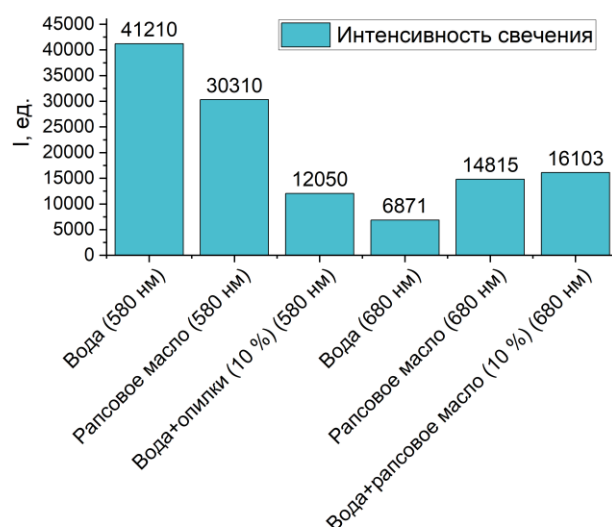


Рисунок 7 - Гистограмма, иллюстрирующая средние интенсивности свечения капель исследовавшихся составов

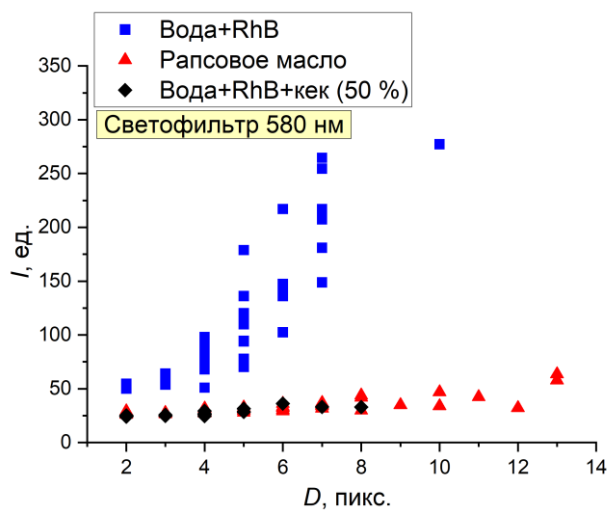


Рисунок 8 - Зависимости интенсивности свечения отдельных капель в потоке от их размеров

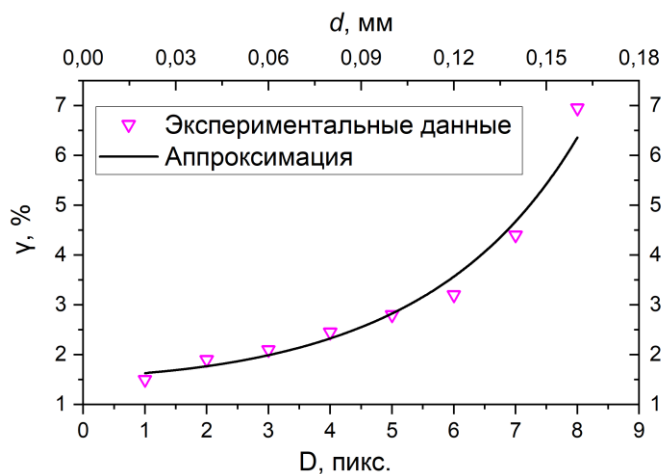


Рисунок 9 - Гистограмма, иллюстрирующая средние интенсивности свечения капель исследовавшихся составов

Таким образом, при помощи метода LIF определялись концентрации кека в отдельных каплях, средние концентрации кека в аэрозольном потоке,

распределения водной компоненты по сечению потока, а также выделялись отдельные капли рапсового масла в потоке.

Метод ИРІ основан на регистрации интерференционных картин капель. В ходе обработки результатов установлены 4 вида интерференционных картин капель (рис. 10): 1 – нормальная (характеризуется вертикально расположенными полосами); 2 – угловая (интерференционные полосы расположены под углом к вертикали); 3 – кривая (характеризуется искривленными или невыраженными полосами); 4 – гексагональная (имеет ярко выраженные ромбы или многоугольники, равномерно заполняющие весь образ). При анализе результатов рассчитывалось интегральное содержание (количество) образов (интерференционных картин) каждого типа: $N(i) = n_i / (n_1 + n_2 + \dots + n_5) \cdot 100$, где (n_i – количество образов отдельного типа) (рис. 10).

Первый тип интерференционных картин представляет собой, соответствующий прозрачной сферической капле. Второй тип картин соответствует несферичным каплям. Количество образов данного типа существенно отличалось (в 2-5 раз) для разных исследованных составов. Также по результатам экспериментов установлено (рисунок 10), что наличие в составе капель частиц кека, опилок или рапсового масла существенно (до 7 раз) увеличивает количество несферичных капель в составе струи. Этот результат крайне важен при прогнозировании поведения капель в струе, особенно в случаях интенсивного столкновения капель, что способно привести к коагуляции, дроблению либо разлету (отскоку) последних. Таким образом, согласно предложенному подходу метод ИРІ позволяет определить средний размер частиц примеси в аэрозольном потоке, а также долю капель воды без примесей в спрее. При этом преимуществом метода ИРІ является возможность регистрации очень малых (менее 10 мкм) капель.

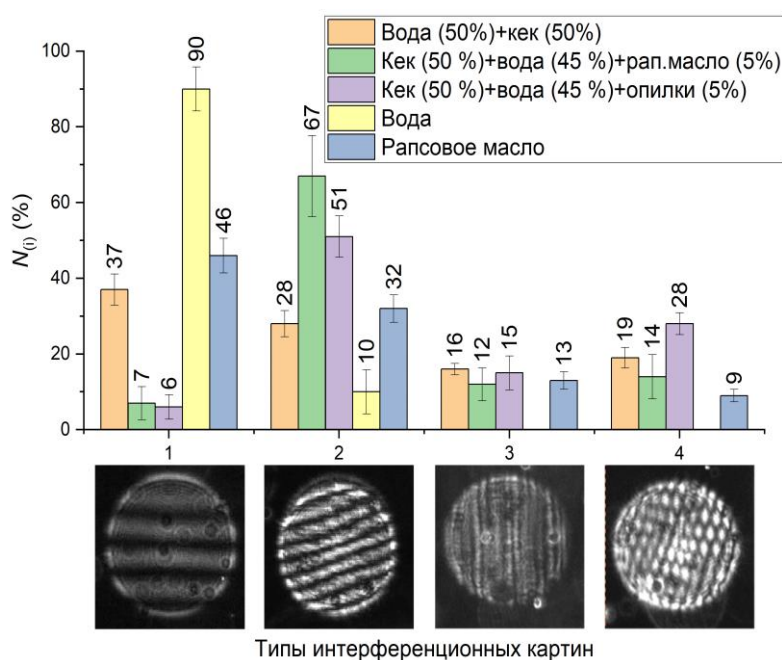


Рисунок 10 - Содержание образов четырех типов интерференционных картин в аэрозольном потоке исследуемых составов ($G_a=50$ кг/ч)

Применение метода теневой съемки (SP) позволяет эффективно определить долю несферичных капель суспензии в общем аэрозольном потоке. На рис. 11 приведены экспериментальные данные о суммарной объемной доли сферичных и не сферичных капель исследованных составов. Видно, что добавление в суспензию (вода, кек) древесных опилок существенно увеличивает долю несферичных капель – до 76% (рис. 11). Капля суспензии обволакивает древесный компонент, тем самым она приобретает неправильную форму (отличную от сферической). По разнице доли несферичных капель (между составами вода+кек и вода+кек+опилки) правомерен вывод, что не менее 23% всего объема капель содержат древесные опилки. Этот результат согласуется с данными, полученными при использовании интерферометрической техники. Он важен при прогнозировании характеристик зажигания и горения капель таких топлив.

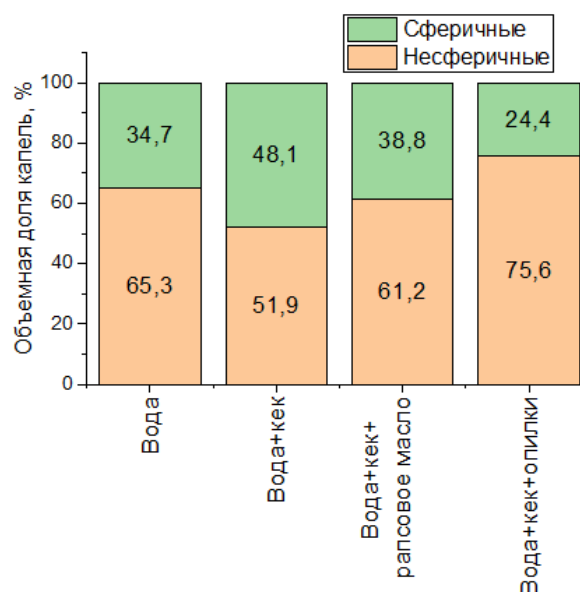


Рисунок 11 - Суммарная объемная доля сферичных и не сферичных капель для нескольких составов

Таким образом, во второй главе экспериментально обоснована возможность определения компонентный состав отдельных капель, а также распределения компонент (твердые и жидкие) в аэрозольном потоке при помощи комбинации трех оптических методик (LIF, IPI, SP).

В третьей главе приведены результаты экспериментального анализа влияния температуры внешней среды, начальной температуры и размера капель, схемы и темпа их нагрева, концентрации примесей и добавок с разными теплофизическими свойствами на характеристики испарения (массовая скорость испарения, время существования капли и др.).

Для проведения экспериментальных исследований разработан стенд (рис. 12). При помощи специализированного дозатора генерировались необходимые капли ($R_d \approx 1$ мм). Далее они двигались в цилиндрическом канале (жаропрочный цилиндр высотой 1 м и внутренним диаметром 0,2 м) с продуктами сгорания керосина. Скорость движения продуктов сгорания в экспериментах регулировалась путем измерения расхода воздуха вытяжной вентиляционной системы и составляла около $U_g \approx 1,5$ м/с. Размеры капель регистрировались методом теневой фотографии на разных участках по всей высоте цилиндрического канала с использованием передвижной системы регистрации на основе координатного механизма. Экспериментальные данные обрабатывались в программном обеспечении «Actual Flow». При помощи программных фильтров выделялись границы капель,

нейтрализовались шумы и определялись радиусы. Погрешность определения R_d не превышала 1,5 %. Экспериментально определялось время прохождения каплями канала с продуктами сгорания (Δt_d) путем слежения за отдельными каплями. Погрешность определения Δt_d не превышала 0,03 с.

Значение скорости испарения в каждом эксперименте и для каждого жидкостного состава вычислялось по формуле: $W_e = \rho_d(R_d - R_d^*) / \Delta t_d = \rho_d \cdot \Delta R / \Delta t_d$, ρ_d – плотность воды, кг/м³; R_d , R_d^* – начальное и конечное значение радиуса капли, м; Δt_d – время прохождения капель канала с продуктами сгорания, с. Погрешность определения массовой скорости испарения капель не превышала 2,5 %.

В экспериментах использована дистиллированная вода (по ГОСТ Р 51232–98); суспензия воды с примесями частиц диоксида титана, частиц глины, ила, песка, графитовых частиц; эмульсия на основе воды и отработанного трансформаторного масла, водоспиртовой раствор, водный раствор соли NaCl. Выбор компонентного состава исследуемых капель обусловлен практическим применением исследования в технологиях термической очистки воды, газопарокапельных теплоносителей, полидисперсного пожаротушения.

На рис. 13 представлены установленные зависимости относительных массовых скоростей испарения капель ($R_d \approx 1$ мм, $T_g \approx 573$ К) от их относительной теплопроводности для трех начальных температур жидкости. Значения относительной массовой скорости испарения, а также относительной теплопроводности рассчитывались по формулам: $W_e' = W_e / W_e^{\max}$; $a' = a / a_{\max}$, где $W_e^{\max}$ и $a_{\max}$ – максимальные полученные по результатам экспериментов значения параметров W_e и a , соответственно.

На рис. 13 видно, что при идентичных условиях (тепловой поток, температура продуктов сгорания, начальная температура и радиус капель) увеличение теплопроводности состава путем добавления в жидкость примесей приводит к росту скорости испарения капель при их распылении. По результатам

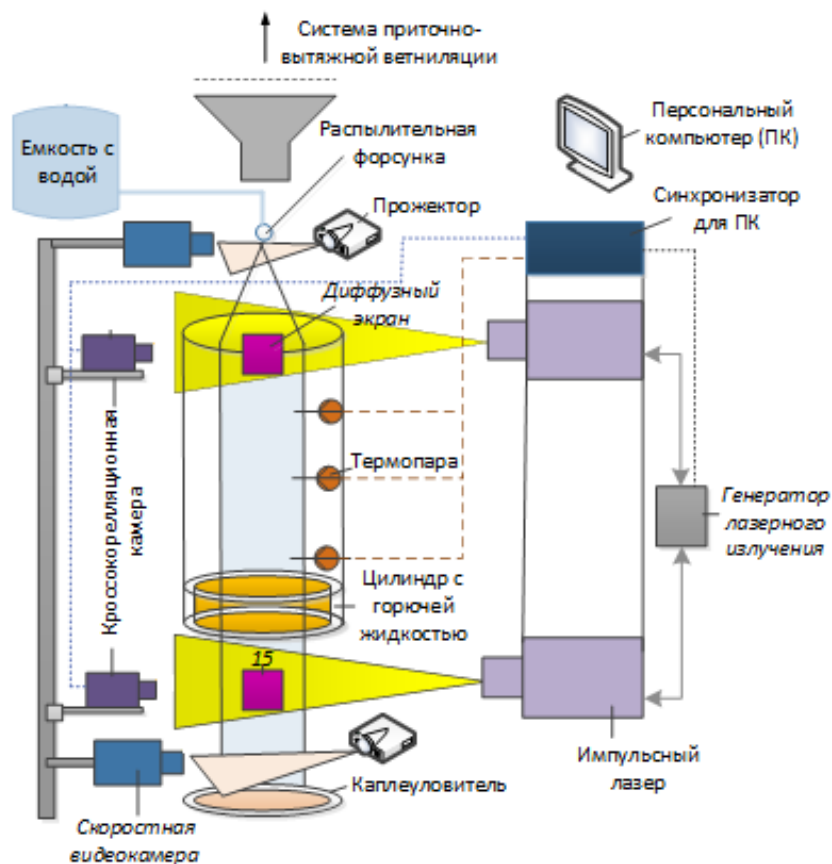


Рисунок 12 - Схема экспериментального стенда

экспериментов (рис. 13) путем аппроксимации получено обобщенное выражение для прогнозирования значений массовой скорости испарения капель жидкости в зависимости от ее температуропроводности для трех начальных температур: $We' = b + c \cdot \exp(d \cdot a')$. Коэффициенты полученной аппроксимационной функции приведены в табл. 1.

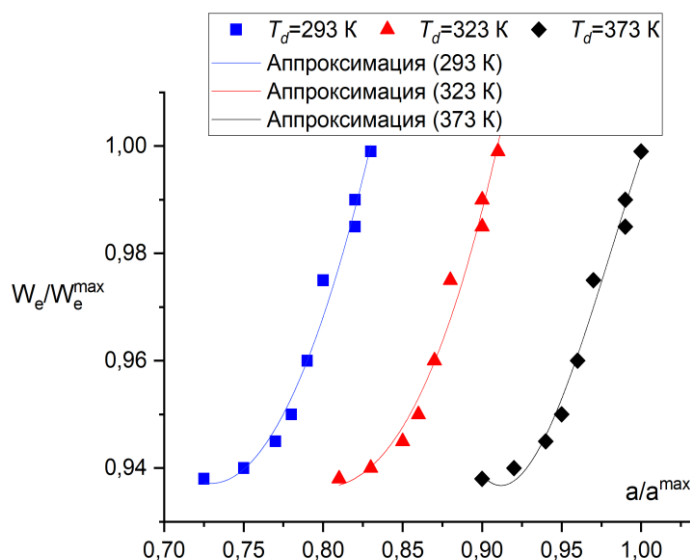


Рисунок 13 - Зависимости относительных массовых скоростей испарения капель исследованных составов от их относительной температуропроводности для трех начальных температур жидкости ($R_d \approx 1\text{ мм}$, $T_g \approx 573\text{ К}$)

Таблица 1. Коэффициенты функции $We' = b + c \cdot \exp(d \cdot a')$

Начальная температура капель, К	Коэффициенты аппроксимационной функции			R^2
	b	c	d	
293	0,9346	$1,21 \cdot 10^{-11}$	27,05	0,9636
323	0,9647	$5,06 \cdot 10^{-18}$	21,58	0,9999
373	0,9176	$3,24 \cdot 10^{-9}$	17,07	0,9908

Проведенные эксперименты позволили установить, что скорости испарения капель растворов с примесями при их распылении в высокотемпературной газовой среде, главным образом, зависят от температуропроводности. Изменяя такие параметры, как концентрацию и тип примеси, а также начальную температуру жидкости можно достаточно гибко управлять характеристиками испарения последней.

При установлении влияния схемы нагрева на характеристики испарения использовались четыре стенда (рис. 14): в потоке продуктов сгорания при доминировании конвективного теплообмена, в трубчатой муфельной печи – радиационного теплообмена, на твердой поверхности – кондуктивного теплообмена, а также в пламени – смешанного теплообмена.

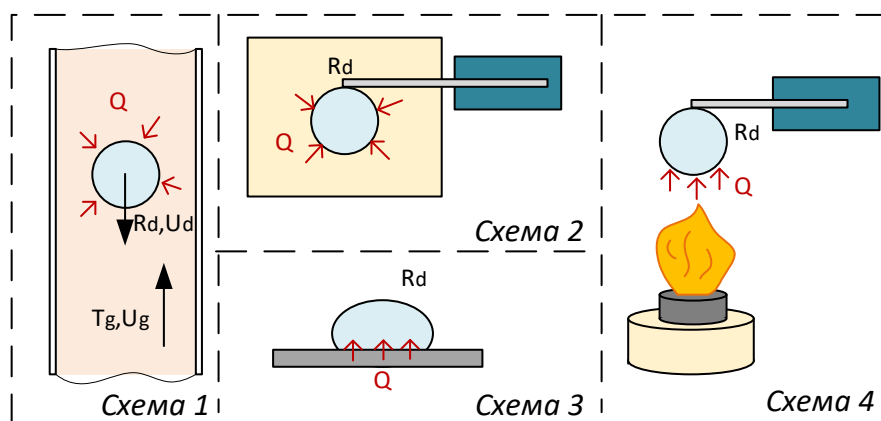


Рисунок 14 - Схемы нагрева капль с доминированием кондуктивного, конвективного, радиационного, а также смешанного теплообмена

На рис. 15 приведены результаты экспериментально полученных средних (за весь период испарения) скоростей испарения капль с добавками для четырёх схем их нагрева. Установлено, что при нагреве капль в потоке продуктов сгорания (схема 1) наибольшая скорость испарения характерна для капль воды с твердой добавкой. Аналогичная тенденция выделена и при нагреве капль в муфельной печи (схема 2). Это обусловлено тем, что в схемах 1 и 2 подвод тепла к капле осуществляется по всей ее свободной поверхности, а твердые частицы графита в процессе нагрева и испарения агломерируются (вследствие гравитационных сил) в нижней части капли. Агломерированные твердые частицы графита активно аккумулируют энергию продуктов сгорания и радиационного излучения муфельной печи, интенсифицируя прогрев и испарение жидкости.

По результатам экспериментов установлена динамика изменения температуропроводности капли с графитовыми частицами (при массовой концентрации 5%) во времени при разных схемах нагрева (рисунок 16) с учетом уменьшения доли воды. Установлено, что быстрое испарение воды из капли суспензии увеличивает относительную долю графита в ее составе. Это приводит к увеличению температуропроводности капли в несколько раз. Данный рост имеет нелинейный характер вследствие нелинейных связей скоростей фазовых превращений и перемешивания слоев суспензий с подводимыми тепловыми потоками.

Обосновано (рис. 16), что капля воды на твердой нагретой поверхности достигает определенного стабильного значения температуропроводности быстрее, чем в опытах при трех других схемах нагрева. Это обусловлено непосредственным контактом нагретой поверхности с частицами графита после их агломерации на ней. Определяющее значение имеет фактор размещения добавок в объеме капли. Чем неравномернее данное размещение по объему капли, тем интенсивнее прогрев последней. Как следствие, чем больше радиус капли, тем масштабнее проявляется данный эффект.

На рис. 17 приведены результаты расчетов относительных массовых скоростей испарения капель ($R_d \approx 0,8$ мм, $T_g \approx 673$ К) с учетом их относительной температуропроводности для четырех схем их нагрева (при начальной температуре капель 293 К). Значения относительной массовой скорости испарения, а также относительной температуропроводности рассчитывались по формулам: $W_e' = W_e / W_e^{\max}$; $a' = a / a_{\max}$, где $W_e^{\max}$ и $a_{\max}$ – максимальные полученные по результатам экспериментов значения параметров W_e и a , соответственно ($W_e^{\max} = 2,5$ кг/(м²с), $a_{\max} = 148 \cdot 10^{-8}$ м²/с). Максимальные значения данных параметров соответствуют условиям, реализующимся в большинстве промышленных приложений.

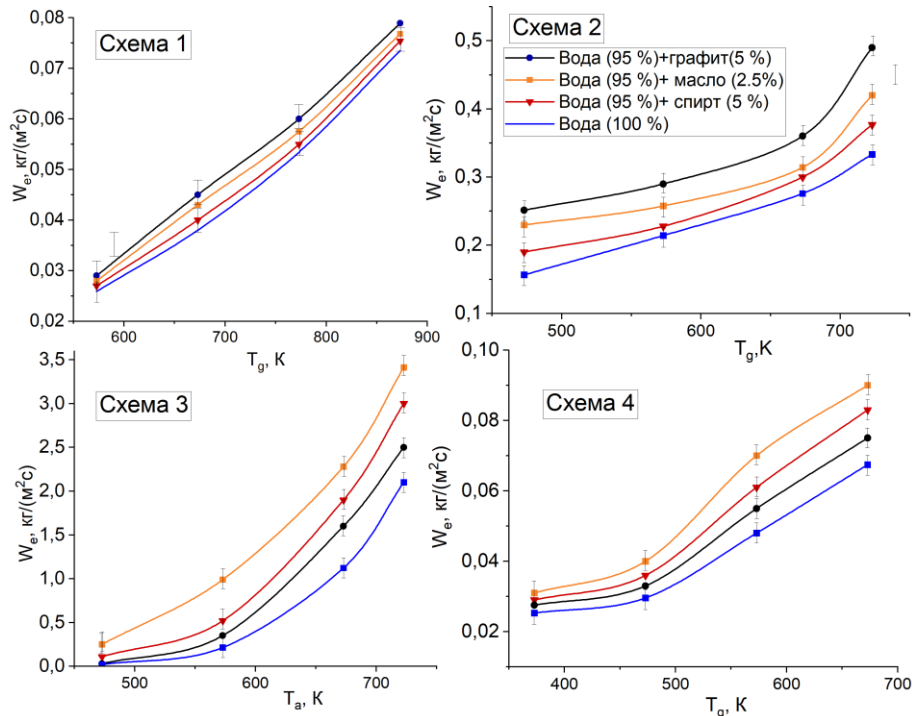


Рисунок 15 - Зависимости скоростей испарения жидкостей ($R_d = 0,8$ мм) от температуры внешней среды для четырех схем нагрева

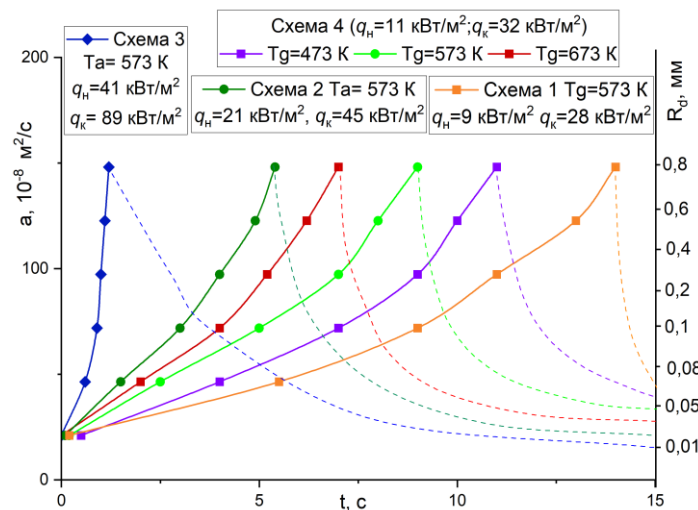


Рисунок 16 - Изменение температуропроводности капли с добавкой графитовых частиц (5 %) в процессе ее испарения при разных схемах нагрева

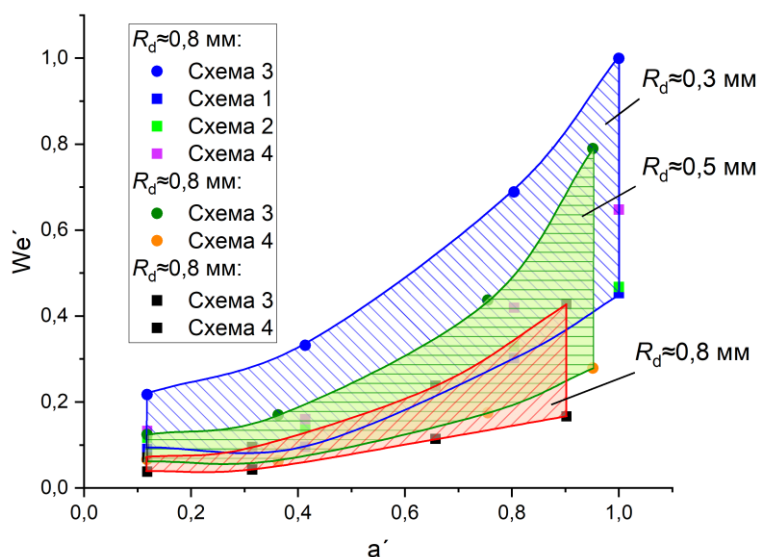


Рисунок 17 - Значения относительных массовых скоростей испарения капель исследованных составов ($T_g \approx 673$ К) с учетом изменения их относительной температуропроводности для четырех схем нагрева при варьировании начальных размеров капель ($R_d = 0,3-0,8$ мм) и их начальной температуре около 293 К

Установлено, что схема нагрева существенно влияет на скорость испарения при аналогичных значениях начальной температуры и радиуса капель, а также температуры греющей среды. Обосновано (рис. 17), что достичь одного и того же значения скорости испарения можно как изменением схемы нагрева, так и величины температуропроводности, в частности, варьированием компонентного состава капель и их размера. Полученный результат имеет важное прикладное значение. Так, при фиксированной температуре жидкости можно прогнозировать концентрацию и тип добавки для получения необходимых характеристик испарения при разных схемах нагрева. При таких условиях становится возможным гибкое управление характеристиками испарения жидкости, что является важным для развития практических приложений и прогнозирования роли добавок в составе капель.

На стенде с передвижной системой регистрации, приведенном на рис. 12, проведены эксперименты с распылением капель воды различной концентрации в аэрозольном облаке. Методика эксперимента и обработка данных аналогична, описанной ранее в этой главе. На рис. 18 и 19 представлены установленные зависимости скоростей испарения воды от концентрации и размера капель.

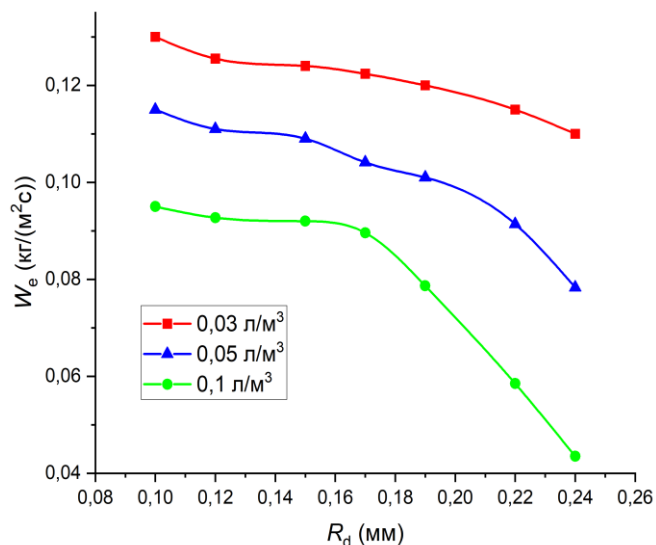


Рисунок 18 - Значения скоростей испарения каплей воды в высокотемпературной газовой среде при разных начальных размерах

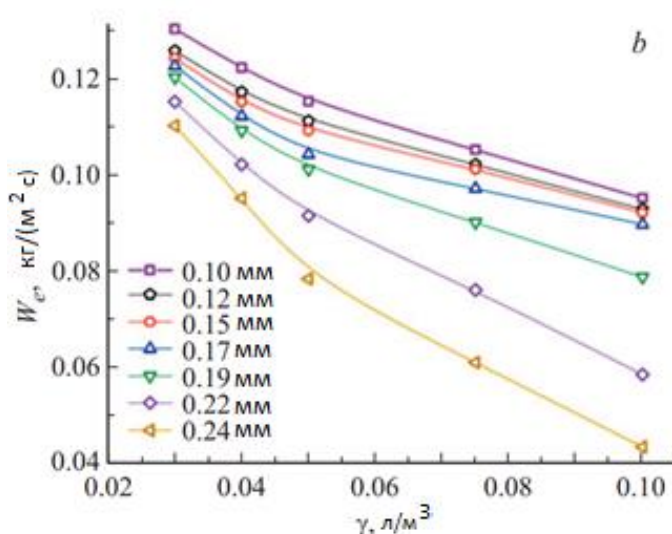


Рисунок 19 - Зависимости скорости испарения каплей от концентрации при разных начальных размерах

На рис. 19 видно, что чем выше концентрация каплей аэрозоля, тем ниже значения скорости испарения при равных начальных радиусах каплей. Это обусловлено, во-первых, ростом концентрации паров в аэрозольном потоке и долей жидкой фазы (вода вследствие высокой теплоемкости существенно снижает температуру газов вокруг) в газопарокапельной смеси, во-вторых, снижением межкапельного расстояния в облаке, что приводит к более сильному влиянию на характеристики испарения соседних каплей. Аппроксимация результатов приведенных экспериментов показала, что при $\gamma=0$ и $R_d=0,1-0,25$ мм (для $T_g=750$ К) значения W_e совпадают и изменяются, в среднем, в диапазоне $0,15-0,17$ кг/(м²·с). На основании данного заключения получена формула для оценки скорости испарения каплей аэрозоля на основе коэффициента k :

$$W_e = k \cdot (R_d^*/R_d)^2 \cdot W_e^*;$$

$$k = (-0.00496 + 1.66589 \cdot \exp(-24.05801 \cdot \gamma)) \cdot (R_d^*/R_d)^{(-1.65795 + 7.58382 \cdot \gamma)},$$

где R_d , R_d^* – радиус капли аэрозоля и одиночной капли, мм; W_e , W_e^* – массовая скорость испарения капли аэрозоля и одиночной капли, кг/(м²·с).

На рис. 20 приведена номограмма, иллюстрирующая значения коэффициента k при соотношении $R_d^*/R_d=4-18$ и концентрации каплей аэрозоля $\gamma=0-0,1$ л/м³. Экспериментально определив скорость испарения (W_e^*) одиночной капли ($R_d^*>1$ мм) и задаваясь значениями среднего радиуса каплей (R_d) и их концентрацией (γ) в спрее, можно вычислить скорость испарения аэрозоля. Численные оценки показали, что погрешность определения W_e с использованием такого подхода составила 7–10%. Полученные по результатам обработки опытов математические выражения

позволяют выполнять прогнозирование интенсивности испарения аэрозольных облаков по результатам опытов с одиночными каплями.

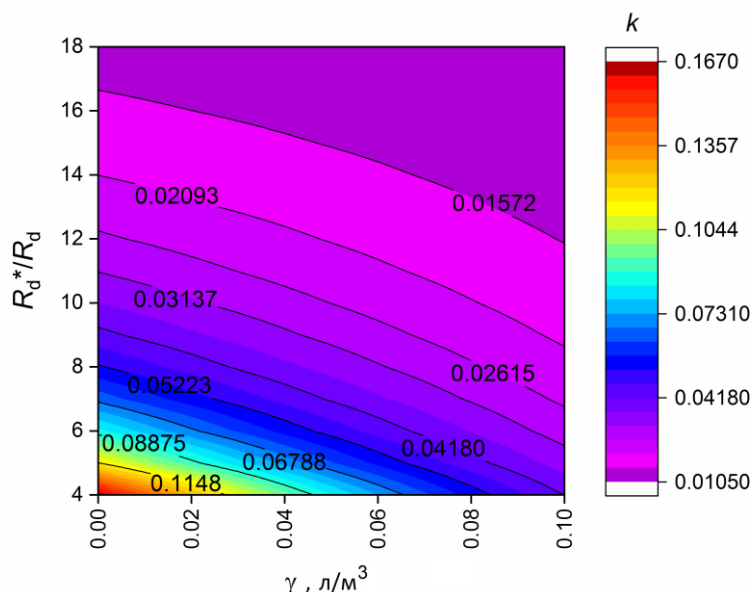


Рисунок 20 - Номограмма, иллюстрирующая значения коэффициента k при разном соотношении R_d^*/R_d и концентрации капель в аэрозоле (γ)

В заключении представлены основные выводы по результатам диссертационных исследований, а также сформулированы соответствующие рекомендации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработаны методики и созданы стенды для определения компонентного состава неоднородных капель жидкостей, а также исследования характеристик их испарения при интенсивном нагреве с применением высокоскоростной регистрирующей аппаратуры и оптических методов диагностики многофазных сред. Стенды отличаются условиями нагрева капель (с доминированием кондуктивного, конвективного, радиационного и смешанного теплообмена), а также диапазонами воспроизводимых тепловых потоков: 21-45 кВт/м² в муфельной печи, 9-28 кВт/м² в потоке продуктов сгорания, 41-89 кВт/м² на разогретой подложке, 41-89 кВт/м² в пламени спиртовой горелки.

2. Эксперименты на разработанных стендах позволили установить влияние схемы и темпа нагрева (в потоке продуктов сгорания, на разогретой подложке, в муфельной печи, в пламени горелки), температуры греющей среды, теплофизических характеристик капель, концентрации и типа добавок к ним на значение скоростей их испарения.

3. По результатам выполненных экспериментов обосновано, что комбинированное применение трех оптических методик (LIF, IPI, SP) позволяет установить компонентный состав капель, а также распределение компонентов в

составе спрея. При обобщении результатов исследований предложен способ идентификации примесей в каплях и компонентов спреев.

4. При математической обработке результатов экспериментов установлены зависимости скоростей испарения капель жидкостей от температуры и подведенного теплового потока с учетом раздельного и совместного влияния совокупности параметров, в частности, начального размера и формы капли, концентрации и свойств примесей и добавок.

5. По результатам комплексного исследования условий и характеристик испарения совокупности капель жидкостей получены математические выражения для прогнозирования значений скоростей испарения аэрозолей при известных скоростях таких процессов для одиночных капель и концентрации дисперсной фазы в спрее.

6. Определены синергетические и коллективные эффекты, вызванные раздельным и совместным влиянием твердых и жидких примесей в каплях на характеристики испарения капель и спреев.

7. Сформулированы рекомендации по применению результатов выполненных исследований для развития технологий зажигания многокомпонентных жидких топлив, а также технологий термической и огневой очистки жидкостей от загрязняющих их нерегламентированных примесей.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. **Керимбекова С.А.,** Волков Р.С., Стрижак П.А. Влияние концентрации капель воды в аэрозольном облаке на скорости их испарения // Письма в Журнал технической физики. – 2021. – Т. 47, № 22. – С. 28-32 (из перечня ВАК).
2. **Kerimbekova S.A.,** Islamova A.G. Shlegel N.E., Strizhak P.A. Droplet-droplet, droplet-particle, and droplet-substrate collision behavior // Powder Technology. – 2022. – V. 403. – Article number 117371 (входит в базы данных Scopus и Web of Science).
3. **Kerimbekova S.A.,** Kuznetsov G.V., Volkov R.S., Strizhak P.A. Identification of Slurry Fuel Components in a Spray Flow // Fuel. – 2022. – V. 323. – Article number 124353 (входит в базы данных Scopus и Web of Science).
4. **Kerimbekova S.A.,** Kuznetsov G.V., Dorokhov V.V., Vershinina K.Y., Romanov D.S., Strizhak P.A. Composite Liquid Biofuels for Power Plants and Engines: Review // Energies. -2023. – V. 16, Article number 5939 (входит в базы данных Scopus и Web of Science).
5. **Керимбекова С.А.,** Волков Р.С., Стрижак П.А. Влияние примесей в каплях суспензий, эмульсий и растворов на скорости их испарения // Письма в Журнал технической физики. – 2023. – Т. 49, № 20. – С. 3–7 (из перечня ВАК).