

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования



**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

На правах рукописи

**Керимбекова Сусанна Александровна**

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

**1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника**

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор физико-математических наук, профессор  
Стрижак Павел Александрович

Томск – 2023

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССОВ ПРОГРЕВА И ИСПАРЕНИЯ НЕОДНОРОДНЫХ КАПЕЛЬ ЖИДКОСТЕЙ.	14
1.1. Теоретические и экспериментальные исследования процессов прогрева и испарения неоднородных капель жидкостей.....	15
1.1.1 Математическое моделирование процессов прогрева и испарения неоднородных капель жидкостей.....	15
1.1.2 Экспериментальные исследования процессов прогрева и испарения неоднородных капель жидкостей.....	19
1.2 Определение компонентного состава неоднородных капель растворов, суспензий и эмульсий.....	24
1.3. Выводы по первой главе.....	28
2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОМПОНЕНТНОГО СОСТАВА КАПЕЛЬ РАСТВОРОВ, СУСПЕНЗИЙ И ЭМУЛЬСИЙ.....	30
2.1. Определение компонентного состава капель растворов, суспензий и эмульсий методом LIF.....	32
2.1.1. Экспериментальные исследования одиночных капель.....	32
2.1.2. Экспериментальные исследования совокупности капель суспензий в составе аэрозольного потока.....	42
2.1.3. Основные выводы по результатам экспериментального определения компонентного состава капель методом LIF.....	56
2.2. Определение компонентного состава капель растворов, суспензий, эмульсий методом IPI.....	57
2.2.1. Экспериментальный стенд и методика исследований.....	57
2.2.2. Результаты и обсуждение.....	58

2.2.3. Основные выводы по результатам экспериментального определения компонентного состава капель методом ПРІ.....	63
2.3. Определение компонентного состава капель растворов, суспензий и эмульсий методом теневой макросъемки.....	64
2.3.1. Экспериментальный стенд и методика исследований.....	64
2.2.4. Результаты и обсуждение.....	66
2.3.3. Основные выводы по результатам экспериментального определения компонентного состава капель методом теневой макросъемки.....	69
2.4. Выводы по второй главе.....	69
<b>3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА СКОРОСТЕЙ ИСПАРЕНИЯ КАПЕЛЬ РАСТВОРОВ, СУСПЕНЗИЙ И ЭМУЛЬСИЙ.....</b>	<b>71</b>
3.1. Компонентный состав исследовавшихся капель растворов, суспензий и эмульсий.....	71
3.2. Влияние теплофизических свойств капель суспензий, эмульсий и растворов на скорость их испарения.....	72
3.2.1. Экспериментальный стенд и методы исследований.....	72
3.2.2. Результаты и обсуждение.....	74
3.3. Влияние схемы нагрева капель растворов, суспензий и эмульсий на скорость их испарения.....	79
3.3.1. Экспериментальные стен и методики исследований.....	79
3.3.2. Результаты и обсуждение.....	83
3.4. Влияние концентрации капель воды в аэрозольном облаке на скорости их испарения.....	90
3.4.1. Экспериментальный стенд и методики исследования.....	90
3.4.2. Результаты и обсуждение.....	92
3.5. Выводы по третьей главе.....	97

ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	100
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	102

## ВВЕДЕНИЕ

Традиционно разработка новых и модернизация используемых в настоящее время высокотемпературных технологий требует решения наиболее значимых задач, в частности, интенсификации физико-химических и тепломассобменных процессов. Среди перспективных можно выделить технологии создания теплоносителей на базе дымовых газов, капель и паров воды [1–4], смесей для размораживания сыпучих сред [5,6], термической и огневой очистки жидкостей [7–10], полидисперсного пожаротушения [11–13], горения суспензионных, жидких и эмульсионных топлив [14–18], очистки теплонагруженных поверхностей [19–21] и др.

В технологических процессах нередко используется неочищенная от растворенных и мелких нерастворенных в ней примесей вода [22], либо она смешивается в определенной концентрации со специализированными добавками [23,24]. В зависимости от технологий и причины попадания в воду данных веществ их принято считать примесями или добавками. К примеру, при термической очистке эти вещества – примеси, поскольку не было их специализированного введения в жидкость. В технологиях пожаротушения, горения топлив, создания теплоносителей соответствующие вещества являются добавками. В диссертации принята соответствующая терминология.

Большое количество промышленных производств сопровождается выработкой технологических и сточных вод (промстоков) [25]. Вещества, входящие в состав таких промстоков, а именно гликоли, амины, метанол, газовый конденсат, сероводород и различные соли, сильно ухудшают экологическую обстановку. Очистка промстоков, как правило, реализуется в несколько этапов: многоступенчатая фильтрация, химическая нейтрализация примесей, термическая очистка. Среди высокотемпературных методов очистки воды можно выделить выпаривание (концентрирование примесей), сушку (распыление жидкости в среде горячего воздуха или дымовых газов), термическое окисление (выжигание горючих примесей) [26–28]. Перечисленные

методы реализуются при взаимодействии распылённого потока жидкости и высокотемпературных газов (воздуха, продуктов сгорания топлив, газовых смесей) [25]. Как правило, в их основе лежит принцип фазовых превращений жидкости (парообразования) [10,26,27,29–31].

Исследования процессов прогрева и испарения капель в пламенной зоне при доминировании конвективного и радиационного теплообмена крайне важны в развитии топливных технологий на основе водных суспензий, эмульсий и технологий полидисперсного пожаротушения. Наиболее актуальными считаются результаты исследований процессов сжигания распыленных капель топливной суспензии и эмульсии в камерах сгорания двигателей и котельных агрегатов [32,33]. Прогрев и испарение капель суспензий существенно влияют на эффективность их зажигания и горения и, как следствие, на концентрации выбросов, в частности CO и NO<sub>x</sub> [2–4]. Установлено [34], что тушение лесных пожаров на больших площадях без специализированного распыления (сплошным потоком жидкости) неэффективно, поскольку большая часть тушащей жидкости уходит грунт, не испарившись. Эксперименты [34] показали, что испаряется менее 15 % общего объема тушащей жидкости. Для эффективности пожаротушения необходимо специализированное распыление сбрасываемой воды [34], также использование специализированных добавок к воде с целью интенсификации прогрева и испарения последних [35–38].

Введение в жидкость твердых включений [39–41] значительно интенсифицируют процесс прогрева и испарения капель, также фазовые превращения на границе раздела сред «жидкость-газ». Введение добавки в виде металлических и углеродистых частиц повышает критическую плотность теплового потока от теплообменной поверхности при испарении суспензии [42]. Также установлена интенсификация процессов прогрева и испарения капель растворов и суспензий [44–46] вследствие введения в их состав твёрдых добавок в виде наночастиц серебра, алюминия, меди и др. металлов. В области повышенных температур (более 800 К) механизм фазовых превращений крайне сложен [40] и недостаточно изучен. Поэтому параметры реализации, требуемые

для высокотемпературных практических приложений, определяются по результатам анализа экспериментальных данных [43].

В последние годы приобретает все большую значимость идея использования композиционных жидких топлив, например, в виде суспензий на базе типичного отхода углеобогащения (фильтр-кека), жидкой биодобавки в виде рапсового масла, биомассы (опилок), жидкой негорючего связующего (воды) [47]. Предпочтительными добавками для жидких биотоплив являются растительные масла или продукты их термохимической конверсии [48,49]. Помимо растительных масел в качестве добавки могут выступать ациклические углеводороды или их производные, спирты, отработанные масла, биомасса, муниципальные отходы и др. [50]. Помимо жидких компонентов для синтеза биотоплив можно использовать такие твердые отходы различных отраслей промышленности, как скорлупа кедрового ореха и подсолнечника, продукт пиролиза сосны, рисовая шелуха, арахисовая скорлупа, стебель бамбука, кукурузный отход, пальмовый жмых и др. [50]. Одним из важнейших факторов, влияющих на эффективность сгорания топлива любого происхождения, является процесс их распыления. Композиционные жидкие топлива имеют высокую вязкость. Обзор результатов исследований биотоплив [50] показал, что в последнее десятилетие активно исследуется их распыление с целью поиска оптимальных параметров этого процесса при варьировании их компонентного состава и, как следствие, изменении физико-химических свойств. Но на данный момент общая теория в области рационального распыления биотоплив не выстроена, в том числе и по причине разнообразия состава топлив и их свойств, сложности обеспечения равномерного прогрева, испарения и горения [50].

Важной фундаментальной задачей в процессе распыления топливных суспензий, эмульсий, тушащих составов и других жидкостей с добавками является контроль распределения компонентов в струе. К примеру, при распылении топливной суспензии в струе распыленного топлива регистрируются компоненты как в отдельном, так и в смешанном виде. Идентификация структуры топливных струй с различным компонентным

составом (тип, концентрация добавок) дает возможность прогнозирования условия их эффективного зажигания и горения с учетом их разделения и измельчения. Определяя компонентный состав распыленных каплях тушащей жидкости, можно судить о том степени интенсификации их прогрева и испарения и, как следствие, о эффективности применения этой добавки в определенной концентрации. В настоящее время в научной литературе недостаточно экспериментальных исследований, направленных на определение компонентного состава распыленных каплях жидкости. Адаптивные методики идентификации типа и концентрации примесей и добавок в каплях в процессе их распыления пока не разработаны.

Широкое применение капельных потоков в условиях повышенных (более 500 К) температур обусловлено возможностью существенной минимизации времени процессов нагрева или охлаждения, а также использованием нескольких механизмов теплопереноса: конвективный, кондуктивный, радиационный, смешанный. Эти факторы позволяют расширить диапазоны варьирования параметров технологических процессов. Однако, стоит отметить, что большинство экспериментальных и теоретических работ в данной научной области не учитывают влияние таких факторов как концентрация капель в потоке и их компонентной состав. Любое изменение компонентного состава жидкости приводит к изменению ее теплофизических свойств: плотности, теплоемкости, теплопроводности. Пока недостаточно экспериментальных данных о скоростях испарения капель воды с типичными примесями и добавками при различных схема и темпах нагрева. Это обусловлено с тем, что для соответствующих процессов характерны высокие скорости и довольно большая совокупность 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 достоверные экспериментальные данные, которые можно получить при комбинированном применении



современных контактных и бесконтактных методов регистрации основных параметров многофазных и многокомпонентных систем.

**Целью диссертационной работы** является 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 следующие 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.

**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 спреев при разных условиях теплообмена, отличающийся от известных применением комбинации оптических методов: теневая фотография, лазерно-индуцированная флуоресценция, интерферометрия.

#### **Степень достоверности полученных экспериментальных результатов.**

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

**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 спреев.

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 доминировании разных схем теплообмена: конвективного (в потоке продуктов сгорания) 0,025-0,08 кг/(м<sup>2</sup>·с), радиационного (в муфельной печи) 0,15-0,5 кг/(м<sup>2</sup>·с), кондуктивного (на твердой поверхности) 0,5-1,5 кг/(м<sup>2</sup>·с), смешанного (в пламени) 0,02-0,1 кг/(м<sup>2</sup>·с).

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.

**Личный вклад автора** 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.

**Благодарности.** Особую благодарность автор выражает научному руководителю д.ф.-м.н., профессору П.А. Стрижаку за помощь при постановке задачи, выборе методов решения, анализе и обобщении результатов, а также сотрудникам лаборатории тепломассопереноса ТПУ (Р.С. Волкову и Д.С. Романову) за помощь при проведении исследований.

**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.

## 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССОВ ПРОГРЕВА И ИСПАРЕНИЯ НЕОДНОРОДНЫХ КАПЕЛЬ ЖИДКОСТЕЙ

Анализ современного состояния исследований показал, что закономерности процессов прогрева и испарения капель жидкостей исследуются экспериментально и теоретически коллективами научных центров и лабораторий многих стран. В частности, лидерами являются коллективы из Японии (Watanabe, H., Tomoyoshi Maeno, Ken-ichiro Mori, Chihiro Unou, Yuji Kawabata, Yoshikazu Todaka, Minoru Umemoto, Koichi Tsuchiya), США (Di Chang, Aidin Panahi, Aki Fujinawa, Yiannis A. Levendis, Jeffrey M. Bergthorson, Manuel Garcia-Pérez), Китая (You-Rong Li, Yuan-Qing Lin, Chun-Mei Wu, Ruyue Zhang, Yilin Zhao и др.), Франции (D. Tarlet, C. Allouis, J. Bellettre, E. Mura, C. Josset, K. Loubar, P. Massoli, C. Maqua, G. Castanet, F. Lemoine), Великобритании (S.S. Sazhin, O. Rybdylova, C. Crua, M. Heikal, M.A. Ismael, Z. Nissar, A.R.B.A. Aziz, J. Shinjo, J. Xia, L.C. Ganippa, A. Megaritis), Германии (M. Schiemann, B. Rilling, C. Herbes, N. Riefler, T. Wriedt, L. Mädler), Индии (Madhu Bala, Vickramjeet Singh), Австралии (Chalani Marasinghege, Ross Broadfoot, Steven Bottle, John Bartley, M. Monjurul Ehsan, Zhiqiang Guan), России (Терехов В.И., Дедов А.В., Комов А.Т., Варава А.Н., Ягов В.В., Мисюра С.Я., Алексеенко С.В., Маркович Д.М., Кузнецов В.В., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А., Волков Р.С., Высокоморная О.В.).

Процессы прогрева и испарения неоднородных капель растворов, эмульсий, суспензий, эмульсий являются основным для многих технологий, в частности, термическая очистка сточных вод, тушение пожаров составами со специализированными добавками, технологии разделения эмульсий и суспензий на компоненты (выпаривание, сушка, выжигание), технология сжигания жидких топлив и топливных композиций в двигателях, теплогенерирующих установках, и др. [32,51–57]

## **1.1. Теоретические и экспериментальные исследования процессов прогрева и испарения неоднородных капель жидкостей**

### **1.1.1 Математическое моделирование процессов прогрева и испарения неоднородных капель жидкостей**

Понимание физики протекающих процессов при движении капель жидкости с примесями через высокотемпературные газы (более 600 К) важно для создания новых технологий термической очистки промстоков или усовершенствования используемых в настоящее время. В последнее десятилетие технологии очистки воды и различных эмульсий на ее основе [32,58,59] получили активное развитие. В настоящее время нет законченной теории тепломассопереноса и фазовых превращений для таких условий. В технологиях сформировались две основные проблемы: высокие затраты энергии и большая длительность времени термообработки [60,61]. Анализ современного состояния данной научной области показал отсутствие подобных теоретических исследований, что обусловлено большим количеством границ раздела сред с нелинейными краевыми условиями (интенсивное парообразование) при математическом моделировании.

Одни из самых ранних работ по изучению процесса испарения в высокотемпературных средах (более 1000 К) принадлежат М. Renksizbulut и М.С. Yuen [83–85]. Итогом исследований [83–85] являются эмпирические выражения  $Nu=f(Re,Pr)$ , применимые для теплообменных процессов с участием капель жидкости и внешней газовой среды. Эти уточненные эмпирические выражения послужили основой для разработки физических и математических моделей испарения капель жидкостей в газовых средах [86–91]. Согласно допущениям, использованным при разработке данных моделей, вся подведенная к границе раздела сред энергия расходуется на прогрев и испарение. Это явилось причиной отличий результатов моделирования и экспериментов [40,41]. Кроме этого, моделирование теплообменных процессов и фазовых

превращений жидкости представляет сложную задачу, в том числе и гидродинамическую, в которой необходимо учитывать влияние совокупности факторов: температура и тепловой поток; начальный размер капли; начальная температура и компонентный состав жидкости. При температурах ниже 600 К аналогичные отклонения экспериментальных и теоретических исследований не более 10-15 % [40,41]. Одной из возможных причин является отсутствие пока адекватного описания эндотермических фазовых превращений в условиях, когда вокруг капель образуются пары воды, которые снижают тепловой поток к жидкости за счет конвекции и усиливают тепловой поток за счет излучения водяных паров [62,63]. Подробное описание данной проблемы, сдерживающей развитие интенсификации прогрева и испарения капель топлив (эмульсий на их основе), приведено в обзорной статье [64]. Таким образом, необходимо найти разумный компромисс, который упрощает модель и дает более точные прогнозы. Результаты таких исследований по моделированию распыла, процессов нагрева и испарения капель воды, ориентированных на поиск оптимального сочетания простоты модели и точности прогнозирования, резюмированы в [64,65]. Несколько моделей для этого предложены [66]. В этих исследованиях использовался ряд упрощающих предположений модели, в том числе игнорирование температурного градиента внутри капель.

В отличие от ранее предложенных модель, описанная в [67], не только учитывает влияние факторов, которые игнорировались в предыдущих моделях, но и намного проще, чем предлагалось ранее. В модели [67] твердые частицы в окружающей испаряющейся жидкости считаются неиспаряющимся компонентом. Аналитические решения уравнений теплопереноса внутри капель в этой модели аналогичны [65], но для граничных условий предполагалось, что относительная массовая доля твердых частиц в паровой фазе равна нулю. Парциальное давление пара на поверхности капли оценивалось по формуле Закон Рауля. Результатом исследований [67] являются тренды изменения радиуса капли во времени. Установлено, что процесс испарения капли протекает в течение 0,127 с. Затем испарение прекращается, и капля превращается в



частицу в виде твердого полимерного шара радиусом 1,51 мкм. Этот радиус примерно на 6% больше, чем полученная из начальной массы полимера. Но причина этого до конца не изучена. Кроме этого, проблемы, связанные с точным расчетом радиуса капель на конечных стадиях испарения, хорошо известны [65].

Стоит отметить, что в большинстве экспериментов, посвященных исследованию процессов нагрева и испарения капель, последние подвешены на держателе. Наличие стержня, на котором подвешивается капля жидкости, усложняет процесс моделирования нагрева и испарения, поскольку в этом случае нельзя предполагать, что задача сферически симметрична (как для капли в условиях гравитации) и невозможно использовать модели диффузии, как в случае движущихся капель [65]. Традиционно в таких случаях применяются технологии, основанные на применении 2D или даже 3D моделей, например, [68]. Проблема использования такого подхода к моделированию заключается не только в его сложности, но и в том, что это сложность, как правило, не приводит к повышению точности и надежности модели. В этих моделях также предполагается, что капли имеют сферическую форму, а площадь контакта между каплей и опорой можно точно определить. Однако, точность этих предположения далеко не очевидна. Этот фактор обычно вносит неконтролируемые ошибки в прогнозировании значений характеристик прогрева и испарения.

Основная идея при формулировании модели, предложенной в [69], заключается в переходе от трехмерной задачи моделирования с учетом влияния опоры на нагрев и испарение капель к одномерной задаче с минимальными потерями точности прогнозирования. Новая модель нагрева капли при наличии опоры основана на предположении, что капли имеют сферическую форму, их поверхность нагревается за счет конвекции, а эффект опоры описывается термином «источник тепла» (аналогично тепловому излучению). Предполагается, что этот источник является сферически симметричным, а ошибка, вызванная этим предположением, сравнима с тем, что вызвано предположением о сферической форме капли [65]. В [70] предложена

математическая модель работы диффузионной камеры с ламинарным потоком, учитывающая взаимное влияние роста капель и зародышеобразования на процессы тепломассообмена. Сравнение данных моделирования с экспериментальными показало [70], что существуют дополнительные механизмы, влияющие на скорость роста и зародышеобразования, в частности, природа газа-носителя существенно влияет на объем зоны зародышеобразования. Кроме этого обозначена необходимость [70] при численном моделировании учитывать концентрационные и температурные зависимости факторов переноса в парогазовой смеси.

Проведено качественное исследование процессов тепло- и массообмена и их влияние на рост капель. Установлены границы применимости ранее разработанной математической модели ЛФДК. Представлено численное моделирование новой математической модели работы LFDC. Обнаружено, что природа газа-носителя существенно влияет на объем зоны зародышеобразования в ЛДДК. В частности, для аргона как газа-носителя объем зоны зародышеобразования на порядок больше, чем для гелия как газа-носителя. Обсуждаются эффекты локальной структуры поля пересыщения вблизи растущих капель.

В [71] проанализирован градиент температуры капли с целью разработки математических (упрощенных) моделей процесса испарения. Итогом работы [71] являются определенные безразмерные критерии и величина температурного градиента, также влияние последнего на скорость испарения жидкости. Однако такого рода экспериментальных исследований в настоящее время нет. Известные на сегодняшний день модели испарения (кинетические и диффузионные) [73–75] удовлетворительно соответствуют экспериментальными данными только в области температур внешней газовой среды до 750 К. Данное заключение еще раз подтверждает необходимость расширения экспериментальной базы в направлении исследования процессов прогрева и испарения капель растворов, суспензий и эмульсий с различного рода добавками.

### 1.1.2 Экспериментальные исследования процессов прогрева и испарения неоднородных капель жидкостей

Анализируя результаты и выводы [64], правомерно сделать вывод о том, что получение адекватных математических и физических моделей возможно лишь при наличии данных экспериментов, полученных с применением малоинерционных панорамных оптических методов и высокоскоростной регистрации. Эти инструменты активно используются для изучения быстропротекающих процессов исследователями по всему миру [76,77]. Кроме этого широко применяются кросскорреляционные измерительные системы [78,79], в частности, метода «Laser Induced Phosphorescence» (LIP). Такие методы обеспечивают получение большее количество детальной и достоверной информации о температурных полях парогазовых смесей, образующихся при смешении парокапельного аэрозоля и высокотемпературных газовых сред, в частности, продуктов сгорания. Стоит отметить, что применение термографических люминофоров в значительной степени упростило процедуру измерения температуры, а также повысило быстродействие и достоверность [78,79].

В большом количестве работ, в частности [40,41,80], показано, что на интегральные характеристики прогрева и испарения капель жидкости влияют большое количество факторов, условий и процессов. В частности, установлено [40,41,80] влияние на интегральные характеристики прогрева и испарения таких факторов как начальный размер и скорость движения капель жидкости, температура и скорость движения продуктов сгорания. Стоит отметить, что на интенсивность испарения также влияет температура поверхности фазового перехода и концентрация паров жидкости вблизи поверхности раздела сред. Определяющими для испарения в этой области является теплопередача и диффузия. Экспериментальные исследования тепломассопереноса в таких условиях в настоящее время не представлены.

Среди других методов интенсификации теплообмена можно выделить такие как, изменением свойств жидкостей и газов путем смешивания с различными добавками, совершенствования поверхности теплообмена, создания закрученного потока. В [81–87] установлено влияние теплофизических свойств жидких сред (растворов, суспензий, эмульсий и др.) на интенсификацию фазовых превращений. Смешивание с водой жидких добавок приводит к изменению температуры кипения [88] и критических условий Лейденфроста [89]. Часто добавляют поверхностно-активные вещества (ПАВ) с целью снижения поверхностного натяжения (увеличения смачивающей способности жидкости) [90]. В [12] установлена определяющее влияние на процессы теплопереноса радиационной составляющей. Установлено также влияние температуры газовой среды на скорость испарения и время жизни капли [12]. Кроме этого, в настоящее время наиболее актуальными являются исследования в области интенсификации за счет использования наножидкостей [82,90–92]. Во многом такая популярность неоднородных жидкостей обусловлена важностью в исследованиях, актуальных во многих отраслях промышленности [93–95].

Другой важный фактор, влияющий на интенсивность испарения капель при высокотемпературном нагреве – их начальный размер [63]. Установлено [96,97], что доля испарившихся при прохождении расстояния 1-2 м через газовую среду 1200 К капель с начальным диаметром 0,1-5 мм в среднем не более 7 %. Предложено применение капель размерами до нескольких микрон в высокотемпературных приложениях, что представляет собой так называемые аэрозольные потоки [98–101]. В [9] обосновано, что при незначительном содержании паров воды температура капли в процессе испарения достигает стационарного значения, которое ниже температуры потока на сотни градусов. Этот эффект определяет создание некоторой тепловой защиты (буферного парового слоя) капли относительно внешней газовой среды [9]. Детально исследован [102] процесс деформации капель воды, растворов, суспензий и эмульсий, движущихся в газовых средах до 1100 К. Результатом исследования

[102] является установление влияния начальных параметров капель воды (размеры, скорость движения, температура, дисперсность, состав) и газов (температура, скорость движения) на интенсивность фазовых превращений и их деформации. Исследован рост гетерогенных капель в диффузионных камерах [103]. Установлено [103], что в паровоздушных смесях радиус гетерогенных капель воды может достигать нескольких микрометров, а эффективная конденсация начинается на сферических наночастицах, когда их радиус превышает 5 нм.

В [104] проведено экспериментальное исследование испарения капель, радиус которых варьировался в диапазоне 0,05-0,35 мм распыленного потока суспензий на основе воды с типичными грунтовыми примесями (ил и глина) при движении в высокотемпературной (около 1100 К) газовой среде (на примере продуктов сгорания ацетона). Относительная массовая концентрация грунтовых компонентов в суспензии варьировалась в диапазоне  $\gamma \approx 0-1\%$ . Установлено значительное влияние наличия указанных примесей на относительное изменение радиуса капель  $\Delta R$ . Определено влияние начальной температуры распыляемой суспензии на интенсивность испарения последней. Показано, что значения интегральных характеристик процесса испарения суспензий с грунтовыми примесями могут быть существенно (в 2-3 раза) выше, чем для воды без этих компонентов.

Аналогично постановке [104] в исследовании [105] преследовалась цель определения интегральных характеристик процесса испарения капель суспензий на основе воды с типичными грунтовыми примесями в среде высокотемпературных продуктов сгорания. Основным результатом [105] является зависимость изменения размера капель  $\Delta R$  от относительной массовой доли примесей  $\gamma$ . Установлено [105], что наличие последних значительно интенсифицирует процесс испарения суспензий. Это обусловлено тем, что теплофизические (теплопроводность, теплоемкость и температуропроводность) и оптические характеристики суспензий выше по сравнению с водой без примесей. Полученные экспериментальные зависимости иллюстрируют

значительно более интенсивный прогрев и испарение капель суспензий по сравнению с водой без примесей при изменении относительной массовой доли последних в небольшом диапазоне ( $\gamma = 0-0,1$  для песка,  $\gamma = 0-0,01$  для глины, земли и ила). Установленный эффект обусловлен отличием процессов прогрева и аккумуляции энергии газов суспензиями по сравнению с однородной водой.

Активно исследуется технология пожаротушения с применением различного рода добавок [36,40,106,107], ПАВ и растворов солей [108,109]. Установлено [110–112], что применение сбрасываемой (нераспыленной) тушащей жидкости ведет к ее прохождению через пламенную зону горения без испарения. Актуально использование пароводяных завес для большего охвата площадей пожаров с целью минимизации расхода тушащей жидкости [113,114]. Добавление примесей соли в жидкость существенно снизит скорость ее испарения [115]. Это свойство применимо для достижения большего количества рабочей жидкости торфяников и лесных горючих материалов [115]. Поэтому наиболее важными задачами достижения максимальной эффективности пожаротушения являются определение дисперсности аэрозольного потока и выбор тип примеси.

Кроме этого, для твердых типов добавок к воде важен ее размер. В частности, при варьировании размеров твердых включений от 1 до 5 мм можно добиться существенной интенсификации парообразования при движении капель жидкости в зоне пламени [36]. Однако в [36] использованы углеродистые включения в весьма ограниченном диапазоне размеров 50–500 мкм. В экспериментах [36] взаимодействие высокотемпературных продуктов сгорания с каплей жидкости являлось достаточно скоротечным (менее 1 с). В работах [36,40,106,107] регистрировались изменения параметров капель (размер, форма, скорость движения) с добавлением примесей при их взаимодействии с высокотемпературной газовой средой. Поскольку процесс нагрева капель жидкостей являлся кратковременным, наблюдалось лишь испарение с их свободной поверхности. При пожаротушении время прохождения капли

жидкости через высокотемпературные продукты сгорания может существенно превышать характерные для [36,40,106,107] времена нагрева. В этом случае в процессе нагрева капле жидкости реализуются несколько механизмов фазовых превращений [84,85], включая режимы кипения на внутренних границах раздела сред «твердая частица – жидкость», если речь идет о неоднородных каплях.

Нередко условия выполнения экспериментов влияют на воспроизводимые условия теплообмена. К примеру, капля (аэрозоль) водится в высокотемпературную среду как непосредственным распылением, так и на держателе [55–57,76,77,116] или подложке [117]. Использование держателя и подложки имеют ряд преимуществ и ограничений [118]. Выбор держателя все-таки рациональнее по причине меньших затрат и сведения к минимуму сложности проведения эксперимента при достаточно высокой достоверности регистрации условий и характеристик испарения. Однако выбор материала держателя еще не изучен в достаточной мере. Изучение этого вопроса представляет большой интерес, особенно при использовании неоднородных капле жидкости [119–121]. Влияние материала держателя изучено в исследованиях [118], посвященных зажиганию капле топливной суспензии. Установлено [118], что при диапазонах температур свыше 900 К влиянием материала можно пренебречь. При температурах ниже 900 К наблюдается существенное влияние материала держателя на процесс испарения капли суспензионного топлива [118].

Еще один важный момент, который необходимо учитывать при исследовании мелких капле (до 100 мкм) – это унос капле из зоны нагрева при малых скоростях их движения. В экспериментах [122] наблюдался унос капле по причине встречного движения высокотемпературных газов и термогравитационной конвекции, а также их контакт со стенками камер нагревательных камер. Предварительное измельчение капле (менее 100 мкм) может снизить коэффициент полезного действия, в частности контактных теплообменников, камер сгорания, блоков для термической очистки жидкостей [122].

## **1.2. Определение компонентного состава неоднородных капель растворов, суспензий и эмульсий**

Контроль компонентного состава спрея является важной задачей в процессе распыления топливных суспензий и эмульсий, тушащих жидкостей и др. К примеру, при распылении топливной суспензии в составе спрея регистрируются компоненты в отдельном и/или смешанном виде. Идентификация структуры топливных струй с различным компонентным составом (тип, концентрация и свойства добавок) дает возможность прогнозирования условия их эффективного зажигания и последующего горения с учетом разделения и измельчения. Идентифицируя тип и концентрацию примесей и добавок в распыленных каплях тушащей жидкости, можно судить о том степени интенсификации их прогрева и испарения и, как следствие, о эффективности применения этой добавки в определенной концентрации. В настоящее время в научной литературе недостаточно экспериментальных исследований, направленных на определение компонентного состава распыленных капель жидкости. Известно исследование дисперсного состава водоотливной эмульсии [123], где приведены экспериментальные данные о диаметре капель воды в их составе. Установлено [123], что для капель размером менее 1 мкм существенно изменяются параметры, важные для использования эмульсии: увеличивается количество капель воды в нем, увеличиваются давление внутри капель и температура кипения, значительно уменьшается время нагрева капель до температуры кипения, существенно увеличивается скорость нагревания капель до кипения и уменьшается время до микровзрыва капель эмульсии. Пока не разработаны методики идентификации типа и концентрации примесей и добавок в каплях в процессе их распыления.

Актуальной задачей в области эффективных способов очистки является определение в составе капель жидкости растворимых и нерастворимых примесей, металлов, песка, ила и пр. Идентификация подобных примесей возможно оптическими методами, в частности, интерференционным.



Достоинства интерференционного метода заключается в бесконтактности и невозмущающем характере измерений. Применим этот метод при исследовании размеров капель и пузырей (оптически прозрачных), поверхности тел, определение размеров непрозрачных частиц по спекловой картине и др. [22]. Также о наличии в жидкости нерастворимых добавок можно судить по изменению коэффициента преломления жидкости.

Большинство известных работ в области энергетики посвящены вопросам минимизации антропогенных выбросов [1-4], перспективам использования альтернативных, в том числе и возобновляемых источников энергии [5-10], а также разработке новых типов накопителей электрической энергии [11, 12]. Не менее перспективным направлением, с точки зрения решения экологических проблем и утилизации отходов, а также производства электрической энергии, является использование суспензий на основе отходов углеобогащения [13-17]. Вопросы вовлечения отходов углеобогащения в энергетику как альтернативного топлива все чаще изучаются различными исследователями [13-17]. Также важную роль играют результаты исследований, направленных на установление характеристик распыления таких суспензионных топлив [29-37]. Как правило, определяется совокупность характеристик распыления [37]: размеры и скорости движения капель, угол раскрытия струи и ее отклонения. Но пока не установлены распределения компонентов водоугольных (ВУТ) и органоводоугольных (ОВУТ) топлив в струе при их распылении форсуночными устройствами. В [19-22] применены равномерно перемешанные составы. Однако при распылении суспензионных топлив может реализовываться их разделение на отдельные компоненты (жидкие и твердые), что не позволяет в полной мере использовать результаты [19-22] для прогнозирования характеристик зажигания и горения капель суспензионных топлив в струе. По этой причине перспективна задача идентификация отдельных твердых и жидких компонентов в аэрозольном потоке, которая решается использованием бесконтактных панорамных оптических техник (плоскостная лазерная индуцированная флуоресценция – LIF, интерферометрическая техника – IPI, теневая макросъемка – SP).

Метод лазерной индуцированной флуоресценции (LIF) [38-40] основан на регистрации естественной флуоресценции молекул флуорофора (органического красителя), возбуждаемой лазерным излучением, специализированными видеокамерами с набором оптических светофильтров. Данная совокупность методов предназначена для определения таких характеристик, как толщина пленок [38], температура жидкости [39] и концентрация примесей [40] и др. Как правило, используются следующие флуоресцентные красители [38-40]: Rhodamine B, Rhodamine 6G, Sulforhodamine B. Выбор флуорофора обусловлен характеристиками используемого оборудования (прежде всего длиной волны источника лазерного излучения), условиями эксперимента и внешними факторами (температура, освещенность, свойства объекта исследований).

Идентификация добавок и примесей в составе капель жидкостей с использованием интерферометрической техники предполагает усиление или ослабление амплитуды результирующей волны в зависимости от соотношения между фазами складывающихся в пространстве двух или нескольких волн с одинаковыми периодами. Интерференция имеет место для волн любой природы (акустических, радио, световых и др.). Наилучшие условия для наблюдения устойчивой картины интерференции могут быть созданы, если в качестве источников света использовать лазеры, излучение которых обладает очень высокой степенью когерентности. Кроме того, излучение лазера монохроматично, а в монохроматическом свете интерференционная картина получается наиболее четкой. Известна совокупность способов определения наличия примеси в жидкости, зависящих от типа загрязняющих веществ [44]: органолептические, химические, физико-химические, микробиологические и др. Большое внимание уделяется наличию в воде инородных органических (как правило, растворимых водой) и неорганических примесей, таких как металлы и их производные, частицы глины, ила и прочие твердые включения [44]. В последнее время оптические методы получают все большее распространение. Так, например, интерферометрические методы имеют целый ряд расширений, среди которых исследование размеров оптически прозрачных капель и пузырей,

контроль поверхности тел, определение размеров непрозрачных частиц по спекловой картине и др. Известны результаты [45], с применением которых обоснована возможность применения интерференционной техники для определения типа и концентрации примеси твердых частиц в каплях воды по их интерференционной картине. Так, установлено влияние типа и концентрации примеси на интегральные характеристики интерференционных картин (количество и вид), а также предложен подход к определению концентрации и размеров частиц примеси, основанный на анализе интерференционных картин [45].

Возможна также идентификация добавок и примесей в составе капель жидкостей с использованием теневой макросъемки (метод теневой фотографии). Она представляет оптическую методику [37], в которой исследуемый объект подсвечивается источником со стороны, противоположной средству видеофиксации (видеокамере). Световой поток находится на одной оптической оси с видеокамерой и направлен в сторону объектива. Такой подход приводит к тому, что на фото объект исследования визуализируется как тень с четкими границами (темный объект на светлом фоне). В качестве средств генерации светового потока традиционно используются мощные светодиодные прожекторы, а также импульсные лазеры в комплекте с оборудованием для создания объемной засветки объекта (оптоволоконный световод и рассеивающий диффузионный экран с флуоресцентным напылением). Главная сложность при теневой макросъемке состоит в получении контрастного (не размытого) изображения движущегося объекта. Для этих целей часто применяются два подхода. Первый – использование световых прожекторов. В данном случае для четкого изображения используются, как правило, высокоскоростные CMOS видеокамеры с очень малым временем экспозиции (1–5  $\mu$ s). Вторым – применением для подсветки импульсных лазеров. В этом случае четкое изображение достигается за счет кратковременного (7–9 ns) лазерного импульса. Первый подход обычно применяют для регистрации формы и отслеживания динамических характеристик перемещающегося или

деформирующегося объекта. Второй – для регистрации положения и формы объекта в конкретный момент времени (может применяться для объектов, движущихся со сверхзвуковыми скоростями).

### 1.3. Выводы по первой главе

1. Известные результаты исследований процессов прогрева и испарения неоднородных капель растворов, суспензий и эмульсий являются научными основами для развития технологий сжигания жидких топлив и топливных композиций в двигателях и теплогенерирующих установках, технологиях разделения эмульсий и суспензий на компоненты (выпаривание, сушка, выжигание), термической очистки сточных вод, тушении пожаров специализированными смесевыми составами и др.

2. Неизученными экспериментально остаются процессы прогрева и испарения капель жидкостей с примесями и добавками при различных схемах нагрева с доминированием конвективного, радиационного, кондуктивного, а также в условиях смешанного теплообмена.

3. Пока не получены результаты исследований, направленные на определение компонентного состава неоднородных капель жидкостей при интенсивном нагреве. Рациональным представляется разработка новой методики определения компонентного состава неоднородных капель жидкостей путем комбинации трех оптических регистрации (лазерная индуцированная флуоресценция, интерферометрическая техника, теневая макросъемка).

4. Целесообразным является проведение экспериментальных исследований характеристик испарения капель неоднородных капель жидкостей для развития совокупности газопарокапельных технологий.

5. Следует экспериментально определить раздельное и совместное влияние совокупности основных варьируемых параметров (схема нагрева, начальная температура капель, концентрация примесей и добавок) на характеристики испарения неоднородных капель жидкостей.

6. Целесообразно при математической обработке результатов экспериментов сформулировать выражения для прогнозирования значений характеристик испарения капель с известными свойствами и концентрациями компонентов.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОМПОНЕНТНОГО СОСТАВА КАПЕЛЬ РАСТВОРОВ, СУСПЕНЗИЙ И ЭМУЛЬСИЙ

Экспериментальные исследования возможности определения компонентного состава распыленных неоднородных капель проводились на основе суспензионного топлива. Для приготовления суспензий в качестве основного компонента использовался типичный отход углеобогащения – фильтр-кек длиннопламенного каменного угля (далее – кек). В качестве дополнительных компонентов использовались древесные опилки (материал – сосна, размеры частиц 120–140 нм), а также рапсовое масло. Выбор такого вида компонент обусловлено экологической эффективностью мирового энергетического сектора. Во-первых, мировые запасы ископаемого топлива ограничены [124]. Во-вторых, сжигание традиционных твердых видов топлива для производства энергии сопровождается значительными антропогенными выбросами в атмосферу (углекислый газ, метан, оксид азота, сера, водяной пар и другие газы) [125,126]. В течение очень долгого времени на долю традиционных (ископаемых) видов топлива приходилось не менее 80% всей энергии, потребляемой в мире [127]. Доля угля в 2018 г. достигала 38 % [127], а прогнозы на 2030 год дают не менее 35%. Поэтому многие страны пытаются внедрять в свой топливный сектор более чистые и доступные виды топлива [128,129]. Одним из наиболее перспективных технологических решений, позволяющих существенно снизить концентрацию антропогенных газов в продуктах сгорания угля, в настоящее время являются водоугольные и органоводоугольные системы [130].

Известны экспериментальные исследования, посвящённые реологическим характеристикам [131–134], механизмам горения [135,136], влиянию добавки древесной пыли на характеристики воспламенения капель [134], фрагментации [137–139] суспензионных и эмульгированных топлив; эффективности [140] и экологичности [141–143] их сжигания. Также важную роль играют результаты исследований, направленных на установление характеристик распыления таких

суспензионных топлив [144–146]. Как правило, определяется совокупность характеристик распыления [147]: размеры и скорости движения капель, угол раскрытия струи и ее отклонения. Но пока не установлены распределения компонентов ВУТ и ОБУТ в струе при их распылении форсуночными устройствами. В ранее упомянутых исследованиях [8-24] рассматриваются равномерно перемешанные составы. Однако при распылении суспензионных топлив может реализовываться их разделение на компоненты (жидкие и твердые). Это, в свою очередь, не позволяет в полной мере использовать результаты [8-24] для прогнозирования характеристик зажигания и горения капель суспензионных топлив в струе. Рациональней представляется экспериментальное определение возможности идентификации компонентов суспензионного топлива в распыленном потоке.

Твердый компонент в виде фильтр-кека (далее кек) предварительно измельчался в быстроходной роторной мельнице «Pulverisette 14» и затем просеивался с применением набора сит. Размеры твердых частиц кека не превышали  $d_p \approx 80$  нм. Результаты технического анализа кека и древесных опилок, а также их элементный состав приведены в таблице 1 и 2. Теплофизические характеристики биодобавки (рапсового масла) приведены в таблице 3.

Таблица 1 - Основные характеристики кека и древесных опилок

Тип примеси	W <sup>a</sup> (%)	A <sup>d</sup> (%)	V <sup>daf</sup> (%)	Q (МДЖ/кг)
Фильтр-кек угля марки Д	-	36,99	41,47	19,24
Опилки	6,05	1,5	72,35	18,25

Таблица 2 - Элементный состав кека и древесных опилок

Тип примеси	C <sup>daf</sup> (%)	H <sup>daf</sup> (%)	N <sup>daf</sup> (%)	S <sub>t</sub> <sup>d</sup> (%)	O <sup>daf</sup> (%)
Фильтр-кек	73,27	4,904	1,02	0,218	20,59
Опилки	45,96–52,5	4,54–6,00	0,08–0,22	0,64	32,82–43,30

Таблица 3 - Основные теплофизические характеристики рапсового масла

Тип примеси	$\rho$ , (кг/м <sup>3</sup> )	$C$ , Дж/(кг·К)	$k$ , Вт/(м·К)	$\mu$ , Па·с	$Q$ , МДж/кг
Рапсовое масло	872,1	2006,6	0,16663	0,00589	100,57

## 2.1. Определение компонентного состава капель растворов, суспензий и эмульсий методом LIF

### 2.1.1. Экспериментальные исследования одиночных капель

#### 2.1.1.1. Экспериментальный стенд и методика исследований

В качестве основных элементов стенда (рисунок 1) для реализации измерений методом LIF использовались: импульсный лазер «Quantel EverGreen 200» (длина волны 532 нм, частота импульсов 4 Гц, максимальная энергия импульса 200 мДж), CCD видеокамера «Imperx IGV B2020M» (разрешение кадра – 2048×2048 пикселей, тип изображения – монохромное, разрядность изображения – 16 бит, частота съемки – 4 кадров в секунду), объектив «Nikon 200 мм f/4 AF-D Macro», оптический светофильтр для нейтрализации избыточного лазерного излучения.

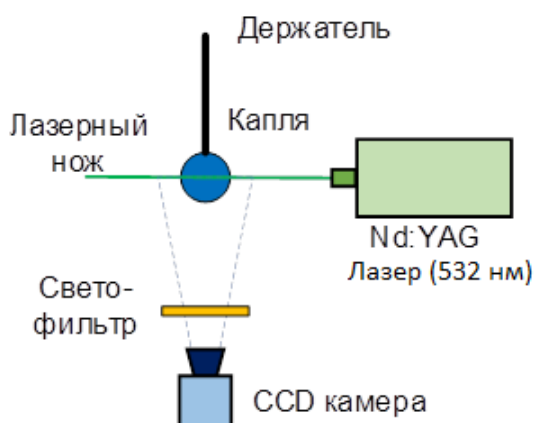


Рисунок 1- Схема экспериментального стенда метода LIF



Задачи исследования базировались на установлении совокупности определяющих факторов: влияние размера капли воды на интенсивность свечения; влияние концентрации в капле кека и древесных опилок на интенсивность свечения; интенсивность свечения капель рапсового масла.

Каждый эксперимент включал несколько этапов:

- капля с фиксированным компонентным составом и объемом от 2,5 мкл до 25 мкл формировалась электронным одноканальным дозатором «Finpipete Novus» (диапазон генерируемых объемов 2,5-50 мкл; шаг варьирования объема – 0,1 мкл);

- капля с использованием вышеописанного дозатора закреплялась на стальном держателе (представляющим собой тонкую полую трубку с внутренним и внешним диаметрами 0,3 мм и 0,5 мм, соответственно) по аналогии с [41] (Рисунок 1);

- между каплей и видеокамерой устанавливался светофильтр (рисунок 1), пропускающий свет с длиной волны свыше 580 нм (для исключения попадания на матрицу CCD видеокамеры отраженного от капли зеленого света лазера);

- с частотой 4 кадров в секунду запускалась регистрация кадров капли на CCD видеокамеру, капля рассекалась по оси симметрии (вдоль вертикальной плоскости) плоским ножом Nd:YAG лазера. Для управления экспериментом, контроля параметров видеокамеры и лазера, сохранения видеок кадров использовалось программное обеспечение «Actual Flow». Для каждой капли выполнялась серия из 30-50 кадров. Для каждого состава не менее трех серий;

- полученные видеок кадры обрабатывались с использованием программного обеспечения «DaVis».

Обработка видеок кадров осуществлялась с учетом последовательных этапов (рисунок 2):

- полученные ранее изображения из каждой экспериментальной серии загружались в ПО «DaVis»;

- проводилось усреднение интенсивности серии изображений с использованием процедуры «Statistics». Для каждой серии получалось одно

усредненное изображение, интенсивность каждого отдельного пикселя на котором рассчитывалось как среднее арифметическое значение интенсивности аналогичных пикселей на каждом кадре из серии изображений;

- выполнялась нейтрализация шумов на изображении (сглаживание исходного изображения) с использованием процедуры «Smoothing Filter» (по области  $3 \times 3$  пикселей);

- проводилась процедура маскирования фона с использованием процедуры «Algorithmic Mask». В процессе данной операции всем пикселям, имеющим значение интенсивности ниже интенсивности фона, присваивалось нулевое значение. Интенсивность остальных пикселей оставалась без изменений;

- вычислялась средняя интенсивность капли. Находилось среднее арифметическое значение интенсивности всех пикселей (имеющих значение интенсивности выше нуля) на изображении.

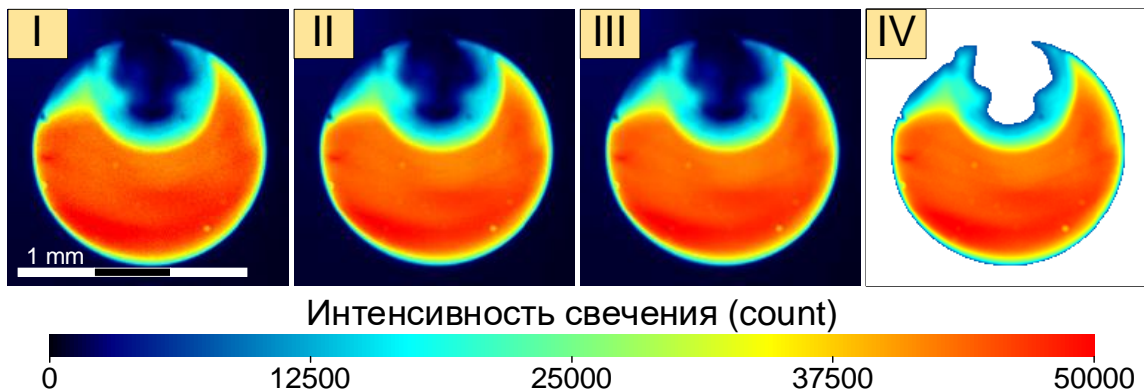


Рисунок 2- Иллюстрация процесса обработки кадров с одиночными каплями в ПО «DaVis» (I – исходное изображение; II – процедура «Statistics»; III – процедура «Smoothing Filter»; IV – процедура «Algorithmic Mask»)

Систематическая погрешность определения мгновенной (на каждом отдельном кадре) интенсивности изображений принималась равной диапазону колебаний интенсивности фона, которая в выполненных экспериментах не превышала значений 160 ед. Кроме этого, результаты всех измерений неизбежно включали в себя случайную ошибку. Источниками случайных ошибок могут являться множество факторов: неоднородность состава суспензии, колебания

мощности лазерного излучения, изменение естественной освещенности помещения. Вклад случайных факторов в результирующие значения параметров оценивался путем расчета полосы ошибок. Для обработки результатов (включая выявление и устранение грубых ошибок) использовались стандартные подходы [42], включающие расчет математического ожидания (1), дисперсии случайной величины (2) и стандартного отклонения для каждого ряда (3), с последующим расчетом ширины полос погрешностей (4):

$$M_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (1)$$

$$V = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - M_x)^2 \quad (2)$$

$$\sigma = V^{1/2} \quad (3)$$

$$\Delta = t_{\alpha n} \cdot \sigma \quad (4)$$

При выборе значений  $t_{\alpha n}$  задавались значением доверительной вероятности, равной 0,95. Далее в настоящей работе на всех основных рисунках приведены значения доверительного интервала, которые иллюстрируют диапазон возможных значений измеренного параметра (с вероятностью 95%). В случае, когда доверительные интервалы не показаны, либо их значения слишком малы, либо приведены результаты непрерывных/мгновенных измерений соответствующего параметра (например, размеры и интенсивности отдельных капель), точность которых описывается систематическими погрешностями измерений соответствующих параметров.

При выполнении экспериментов применялись следующие составы: вода с добавлением флуорофора Rhodamine B (в массовой концентрации 50 мг/л); рапсовое масло без примесей; вода с добавлением флуорофора Rhodamine B (в массовой концентрации 50 мг/л) с примесью кека (в массовой концентрации 5–50 %). На рисунке 3 приведены видеограммы капель воды без примесей при варьировании объема последних в диапазоне  $V_d=2.5-25$  мкл (соответствует изменению радиуса капель в диапазоне  $R_d=0,84-1,81$  мм).

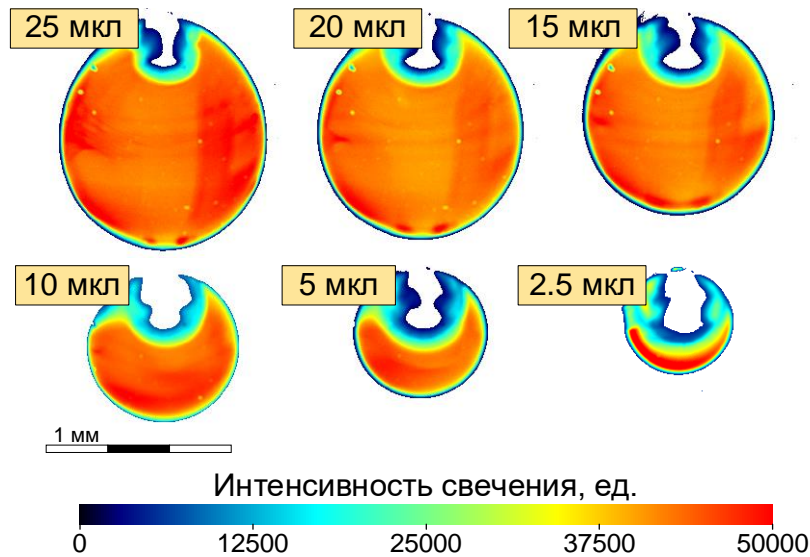


Рисунок 3 - Видеограммы каплей воды без примесей при варьировании объема последних в диапазоне  $V_d=2,5-25$  мкл

### 2.1.1.2. Результаты и обсуждение

На рисунке 4 приведена установленная зависимость интенсивности свечения капли воды без примесей от объема последней.

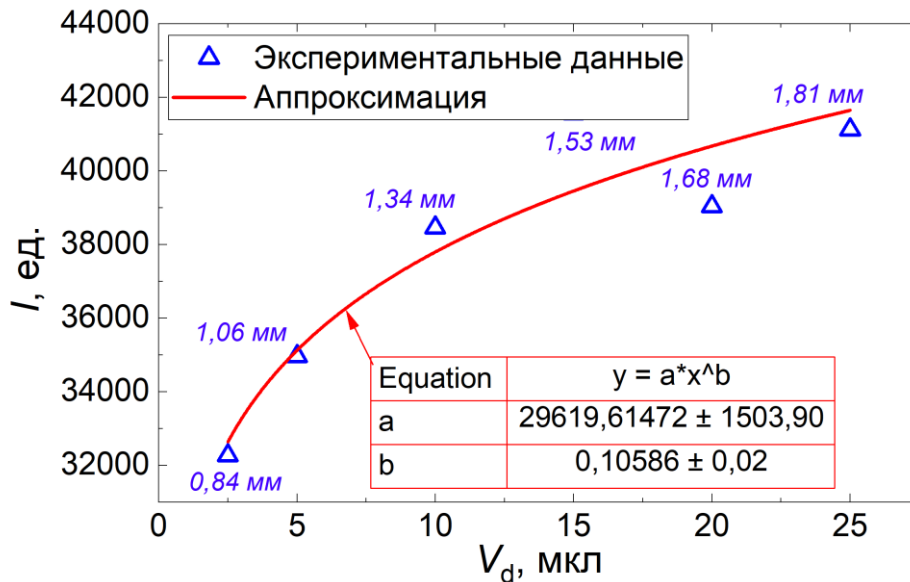


Рисунок 4 - Зависимость интенсивности свечения капли от ее объема (рядом с каждой экспериментальной точкой приведено значение соответствующего ей среднего радиуса капли)

Установлено (рисунок 4), что в диапазоне объемов капель от 2,5 до 25 мкл среднее значение интенсивности свечения находится в диапазоне от 31000 до 42000 ед. С ростом объема капли происходит плавное увеличение средней интенсивности свечения. Данная особенность (рисунок 4) может быть использована для определения истинного размера капель в аэрозольном потоке по их интенсивности свечения.

При определении интенсивности свечения капель суспензии воды (с примесью флуорофора Rhodamine В) и кека (в концентрации 50 %) установлен важный и неочевидный момент: частицы кека способны абсорбировать Rhodamine В. Так, например, светимость воды (на примере капли с  $R_d=1,3-1,8$  нм) до добавления в ее состав кека составляла 39000–42000 ед. (рисунок 5). После приготовления суспензии (спустя 30 мин после оседания частиц кека) проведены эксперименты, в которых анализировалась ее светимость (на примере капли), оставшейся в верхней части емкости. Определено, что светимость капли такой воды составила 10000–12000 ед. (рисунок 5). Таким образом, за счет абсорбирования кеком Rhodamine В светимость жидкости снизилась на 70–75%. Сопоставляя полученные результаты с данными работы [41], можно сделать вывод о том, что концентрация флуорофора Rhodamine В в воде снизилась с 50 мг/л (начальная) до 1 мг/л (в 50 раз).

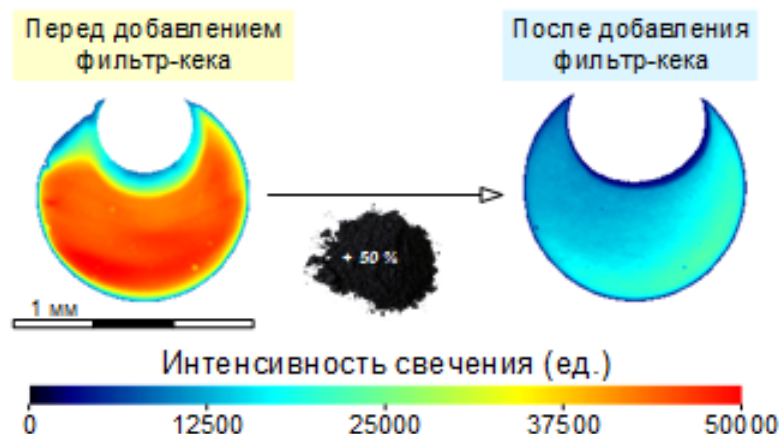


Рисунок 5 - Интенсивность свечения воды (на примере капли) с примесью флуорофора Rhodamine В (в начальной концентрации 50 мг/л) до (слева) и после (справа) добавления в ее состав кека (в концентрации 50 %).

Последующие эксперименты выполнялись следующим образом:

1) приготавливалась суспензия на основе воды с примесью флуорофора Rhodamine В и кека (относительная концентрация около 50 %), наполнялись две емкости с разной массой вылитой суспензии: 30 г, 500 г;

2) по истечении 30 минут начинались эксперименты. Суспензия в первой емкости перемешивалась до однородного состояния. Из первой емкости электронным одноканальным дозатором «Finpipete Novus» забиралась капля суспензии объемом 20 мкл, подвешивалась на держатель (рисунок 1), после чего, в соответствии с методикой, описанной ранее, определялась ее интенсивность свечения (выполнялись 3 эксперимента);

3) из второй емкости забиралась вода объемом 10-25 мл (так как частицы кека к этому моменту оседали на дно емкости) и добавлялась в первую емкость. После этого повторялись действия, описанные в предыдущем пункте;

4) пункт 3 повторялся до тех пор, пока полностью не заканчивалась вода во второй емкости.

Таким образом, вышеописанные процедуры позволили выполнить эксперименты при варьировании концентрации кека в суспензии в диапазоне 5-50 % с целью анализа абсорбирования кеком флуорофора Rhodamine В. На рисунке 6 приведены видеограммы капель суспензии для нескольких массовых концентраций кека. Установлено (рисунок 6), что увеличение концентрации кека в суспензии более 27 % делает каплю абсолютно непрозрачной для лазерного ножа, тем самым способствуя снижению интенсивности свечения (флуоресценции) капли практически до нуля. На рисунке 7 приведена зависимость интенсивности свечения капли суспензии от массовой концентрации кека в последней. Установленная особенность (рисунок 7) может быть использована для определения концентрации кека в отдельных каплях ВУТ в аэрозольном потоке.

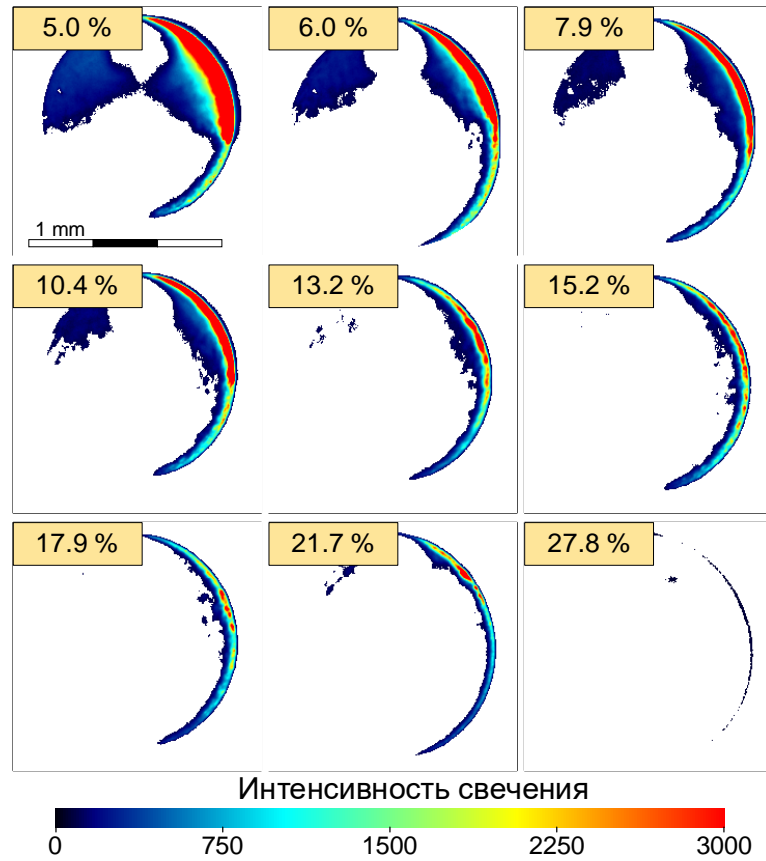


Рисунок 6 - Видеограммы каплей суспензии для нескольких массовых концентраций (5–27,8 %) кека

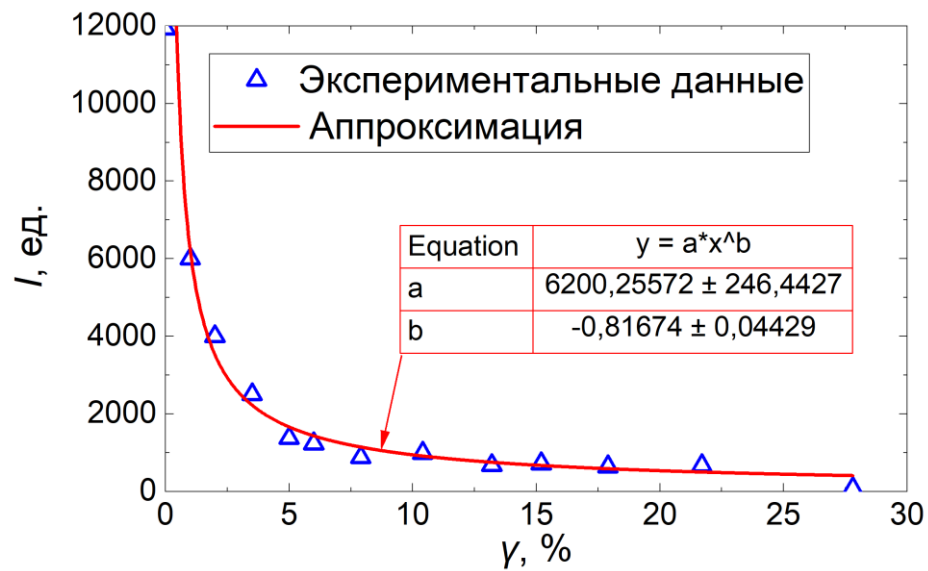


Рисунок 7 - Зависимость интенсивности свечения капли суспензии от массовой концентрации кека

На рисунке 8 приведены видеогаммы капли суспензии (концентрация кека 12,5 %) в начале эксперимента, а также спустя 45 с после старта. Регистрировалось (рисунок 8) непрерывное оседание твердых частиц в капле (т.е. интенсивная седиментация). В начале эксперимента средняя светимость капли суспензии составила около 2000 ед., а после оседания частиц кека в нижней части капли – около 9000 ед., что очень близко к интенсивности свечения капли чистой воды без примеси кека (рисунок 7). Однако стоит отметить, что в случае рассмотрения аэрозольного потока данная особенность, очевидно, не способна повлиять на интенсивность свечения капель вследствие малых (как правило, менее 300 мкм) размеров и высоких (более 5 м/с) скоростей движения.

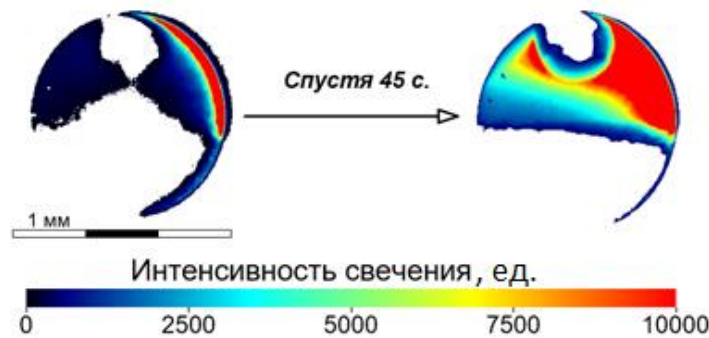


Рисунок 8 -Видеогаммы капли суспензии (концентрация кека 12,5 %) в начале эксперимента (слева), а также спустя около 45 с после его начала (справа)

Также проанализированы установленные значения интенсивности светимости капель с типичными добавками в виде рапсового масла и древесных опилок, использовавшихся при приготовлении ОБУТ. На рисунке 9 приведены видеогаммы капель воды, рапсового масла, эмульсии воды и рапсового масла (в концентрации 10 %), а также суспензии воды и опилок (в концентрации 10 %). В экспериментах использовались два разных оптических светофильтра, пропускающих свет с длиной волны свыше 580 нм и 680 нм, соответственно. На рисунке 10 приведена гистограмма, иллюстрирующая средние интенсивности свечения капель воды, рапсового масла, эмульсии воды и рапсового масла (в концентрации 10 %), а также суспензии воды и опилок (в концентрации 10 %), соответствующие видеогаммам, показанным на рисунке 9.



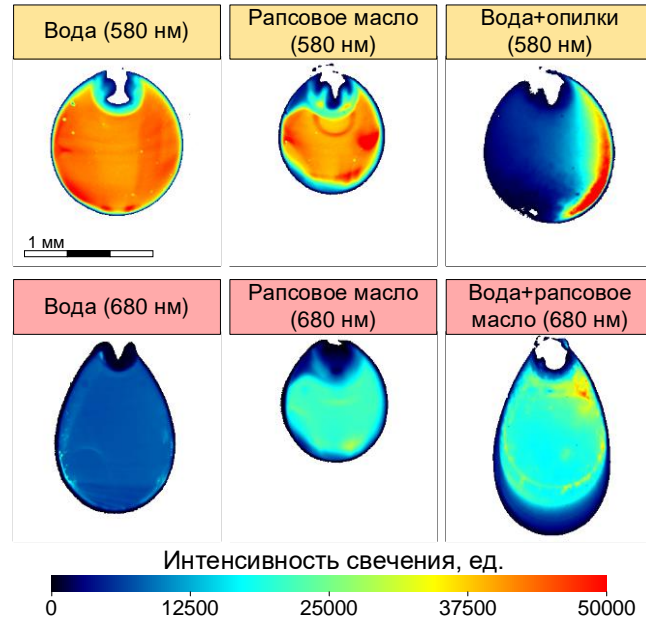


Рисунок 9 - Видеограммы капель воды, рапсового масла, эмульсии воды и рапсового масла (в концентрации 10 %), а также суспензии воды и опилок (в концентрации 10 %)

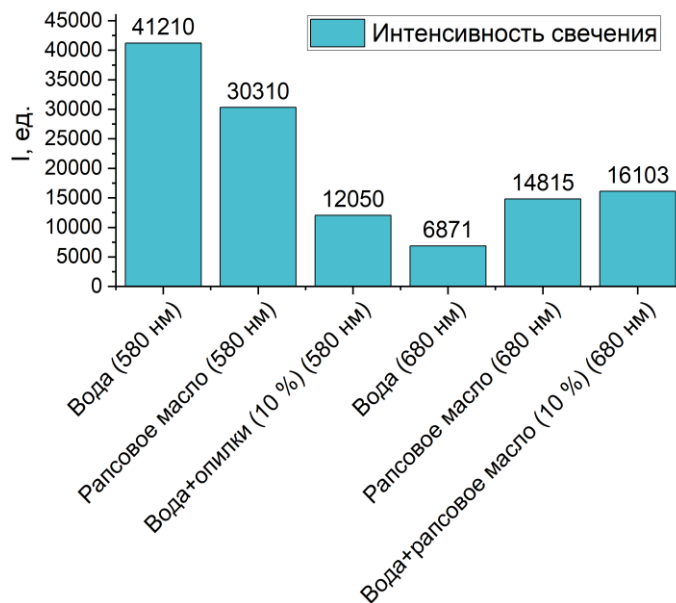


Рисунок 10 - Гистограмма, иллюстрирующая средние интенсивности свечения капель воды, рапсового масла, эмульсии воды и рапсового масла (в концентрации 10 %), а также суспензии воды и опилок (в концентрации 10 %)

По результатам экспериментов (рисунок 9, 10) установлено, что рапсовое масло обладает свойствами флуоресценции. Интенсивность эмиссии рапсового масла ниже, чем у воды на 26%, в диапазоне длин волн свыше 580 нм, а в диапазоне длин волн свыше 680 нм, напротив, на 115% выше (рисунок 10). То есть, даже при наличии в воде флуорофора Rhodamine В в диапазоне свыше 680 нм капли воды можно достоверно отличить от капель рапсового масла (при одинаковых настройках регистрирующей аппаратуры). Эмульсия воды и рапсового масла в том же диапазоне длин волн отличается по светимости от однородного рапсового масла всего на 8%. Также важным является то, что при добавлении к воде древесных опилок в концентрации 10 % интенсивность свечения (флуоресценции) капли снижается в 3,4 раза по сравнению с каплей воды без примесей (рисунок 10). При содержании в капле твердых частиц кек с такой же концентрацией (10 %) светимость снижается более, чем в 12 раз (рисунок 7). Таким образом, можно заключить, что при одновременном содержании в капле двух вышерассмотренных компонентов сигнал флуоресценции зарегистрировать невозможно.

## **2.1.2. Экспериментальные исследования совокупности капель суспензий в составе аэрозольного потока**

### **2.1.2.1. Экспериментальный стенд и методика исследований**

На рисунке 11 приведен внешний вид стенда, использовавшегося для определения характеристик распыления суспензий. Экспериментальный стенд включал основные элементы:

- шток 1 для выдавливания исследуемого топлива (использовался шприц объемом 150 мл с диаметром поршня 30 мм);
- форсунка 2, принцип работы которой основан на эффекте Коанда [37];

- прозрачная камера 3, выполненная из стекла (передняя и задняя стенки) и прозрачного поликарбоната (боковые стенки) размерами 1×0,5×0,6 м (толщина стенок – 3 мм);
- три прожектора 5 «Multiled PT-V9 GS Vitec» (количество светодиодов – 24; световой поток – 7700 лм; мощность – 84 Вт, угол рассеивания – 30°);
- высокоскоростная видеокамера 6. Использовалась видеокамера «Phantom MIRO M310» (тип изображения – монохромное; максимальное разрешение 1280×800 pix; максимальная скорость съемки –  $6.5 \cdot 10^5$  кадров/сек; минимальное время экспозиции – 1 мкс; максимальная разрядность изображения – 12 бит);
- компрессор 8 «PATRIOT EURO 24/240» (тип – поршневой масляный; рабочее давление – 0,1-0,8 МПа; объем ресивера – 24 л; максимальная производительность – 240 л/мин);
- объектив 10 видеокамеры. Использовалось три объектива: «SIGMA 50 мм 1:2.8D MACRO EX» (фокусное расстояние – 50 мм, относительное отверстие – 2,8); «Carl Zeiss Distagon 1,4/35 мм ZF.2» (фокусное расстояние – 35 мм, относительное отверстие – 1,4); №Nikon Micro-Nikkor 200мм f/4D ED-IF A» (фокусное расстояние – 200 мм, относительное отверстие – 4).

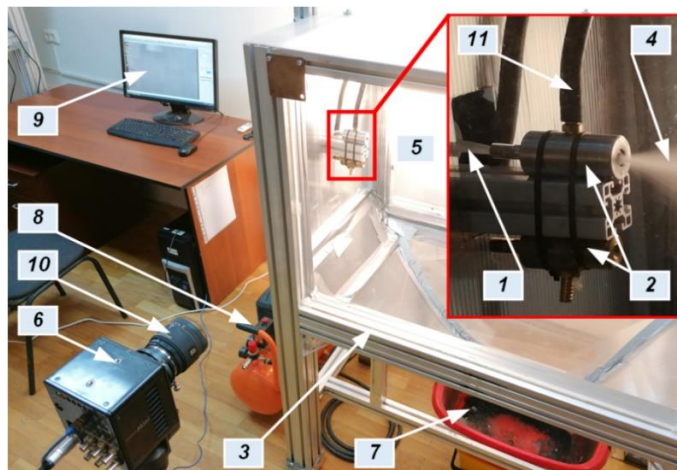


Рисунок 11 - Внешний вид стенда: 1 – шток для выдавливания суспензии; 2 – форсунки; 3 – камера для распыления суспензии; 4 – струя топлива; 5 – система прожекторов; 6 – высокоскоростная видеокамера; 7 – емкость для сбора топлива; 8 – воздушный компрессор; 9 – персональный компьютер; 10 – объектив; 11 – канал подачи воздуха на форсунку

На рисунке 12 приведен внешний вид форсунки, разработанной для распыления суспензий. Универсальная конструкция форсунки позволяет впрыскивать в камеру сгорания жидкие и пылевидные топлива. Конструкция форсунки (рисунок 12) представляет три соединенных между собой детали: корпус для формирования потока воздуха, распылитель (сопло) с нестандартной схемой головной части с внутренней подачей жидкости или суспензии и штуцера для нагнетания воздуха с определенным давлением. Материал корпуса и сопла – нержавеющая сталь, штуцер латунный. Диаметр выходного сопла форсунки – 4 мм. Следует отметить, что штуцер расположен перпендикулярно корпусу. Это важно, так как характеристики формируемого потока воздуха влияют на размеры, скорость и на траектории движения генерируемых капель (геометрию струи).

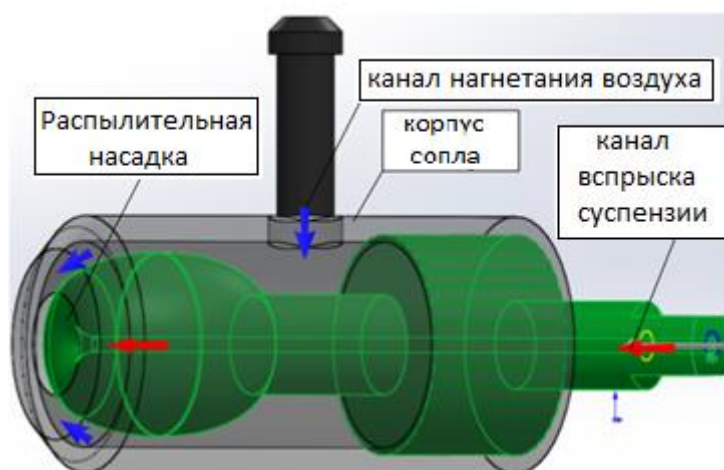


Рисунок 12 - Внешний вид использованной форсунки

При выполнении экспериментальных исследований использовались несколько жидких композиций: (№1) кек – 50 %, вода – 50 % (ВУТ); (№2) кек – 50 %, вода – 45 %, рапсовое масло – 5 % (ОВУТ); (№3) кек – 50 %, древесные опилки – 5 %, вода – 45 % (ОВУТ); (№4) вода без примесей; (№5) рапсовое масло без примесей. Для приготовления составов (№1-4) использовалась как вода с добавлением флуорофора Rhodamine B (в концентрации 50 мг/л), так и без него. Приготовление суспензий (№1-3) выполнялось не ранее чем за 10–15 минут до начала соответствующего эксперимента. Топливо подавалось в форсунку

посредством штока (рисунок 11), который создавал избыточное давление в диапазоне 60–140 кПа (давление увеличивалось с ростом вязкости суспензии с целью поддержания относительно постоянного расхода последней). Подача воздуха на форсунку осуществлялась компрессором «PATRIOT EURO 24/240» по гибкому шлангу. Давление воздуха перед форсункой (в ресивере воздушного компрессора) варьировалось в диапазоне 400–800 кПа. Подаваемая суспензия разбивалась потоком воздуха, тем самым образуя на выходе форсунки топливную капельную струю. Массовый расход воздуха на распылительную форсунку варьировался в диапазоне 35–70 кг/ч.

Для подсветки аэрозольного потока в верхней части стенда дополнительно устанавливался комплект оборудования (рисунок 13): непрерывный DPSS лазер «KLM-532A» (длина волны 532 нм, максимальная мощность 5 Вт) для генерации светового пучка; коллиматор (угол раскрытия 22°) для преобразования пучка лазера в плоский лазерный нож; оптическое зеркало для позиционирования направления лазерного ножа.

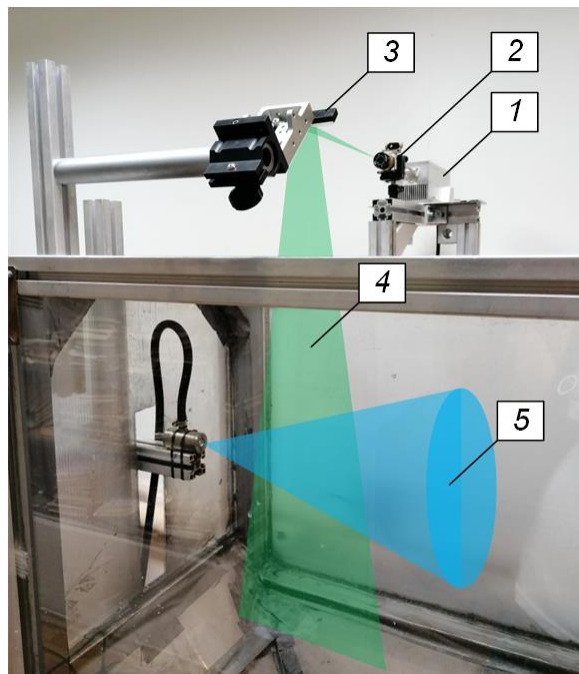


Рисунок 13 - Схема подсветки аэрозольного потока (1 – DPSS лазер; 2 – оптика лазера (коллиматор); 3 – оптическое зеркало; 4 – лазерный нож; 5 – струя)

Каждый эксперимент включал несколько этапов:

- при помощи штока, компрессора и распылительной форсунки (рисунок 1) генерировался распыленный поток одного из вышеперечисленных составов;
- поток рассекался ножом DPSS лазера «KLM-532A», параллельно с чем велась его фотофиксация высокоскоростной CMOS видеокамерой «Phantom MIRO M310» с частотой 1000 кад/сек. Для управления экспериментом, контроля параметров видеокамеры, сохранения видеокадров использовалось программное обеспечение «Phantom Camera Control». Для каждого эксперимента выполнялась серия из 1000-2000 кадров (для каждого состава не менее трех серий);
- полученные видеокадры обрабатывались с использованием программного обеспечения «DaVis».

Обработка видеокадров включала следующие этапы:

- полученные ранее изображения из каждой экспериментальной серии загружались в ПО «DaVis»;
- выполнялась нейтрализация шумов на изображении с использованием процедуры «Smoothing Filter» (по области  $3 \times 3$  пикселей);
- проводилась процедура маскирования фона с использованием процедуры «Algorithmic Mask». В процессе данной операции всем пикселям, имеющим значение интенсивности ниже интенсивности фона, присваивалось нулевое значение. Интенсивность остальных пикселей оставалась без изменений;
- вычислялись интенсивности свечения капель в потоке. Также определялись средние интенсивности свечения потока в целом (для каждого состава) с применением процедуры «Statistics».

Систематическая погрешность определения мгновенной (на каждом отдельном кадре) интенсивности изображений принималась равной диапазону колебаний интенсивности фона, которая в выполненных экспериментах не превышала значений 6 ед.

### 2.1.2.2. Результаты и обсуждение

На рисунок 14 приведены мгновенные и усредненные видеограммы потока каплей для всех исследованных составов (с использованием, а также без использования оптического светофильтра, не пропускающего свет с длиной волны менее 580 нм).

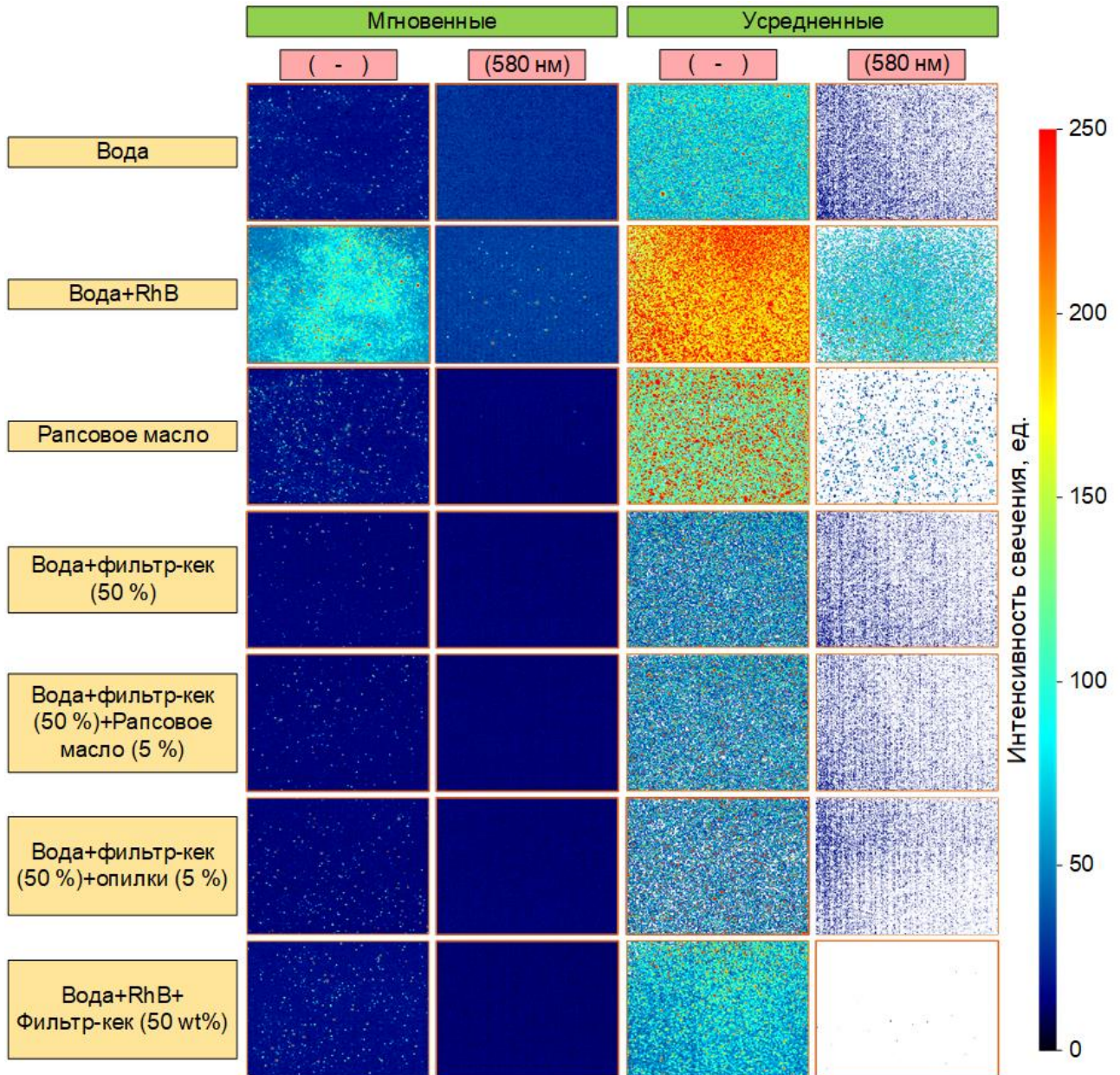


Рисунок 14 - Мгновенные и усредненные при обработке видеограммы аэрозольного потока для всех исследованных составов (с использованием (справа), а также без использования (слева) оптического светофильтра, не пропускающего свет с длиной волны менее 580 нм)

На мгновенных видеограммах потока (рисунок 14) видно, что без использования оптического светофильтра для всех исследованных составов хорошо визуализируются отдельные капли. Однако при установке светофильтра, не пропускающего свет с длиной волны менее 580 нм, капли остаются видимыми лишь для воды с примесью флуорофора Rhodamine B, а также рапсового масла. Данный результат обусловлен наличием свойств к флуоресценции данных составов. Для составов с примесью кека (рисунок 14) интенсивность свечения потока колеблется на уровне светимости фона изображения (20-24 ед.). Однако, при наличии в суспензии флуорофора Rhodamine B становится возможным идентифицировать отдельные капли в потоке. Такие капли обладают интенсивностью свечения в диапазоне 26-32 ед. Столь низкая светимость обусловлена высокой концентрацией кека в выделенных каплях. Для вычисления абсолютной средней интенсивности свечения исследованных составов найдены усредненные изображения потоков (рисунок 14).

На рисунке 15 приведена гистограмма, иллюстрирующая средние интенсивности свечения составов с использованием, а также без использования оптического светофильтра, не пропускающего свет с длиной волны менее 580 нм. При анализе результатов, представленных на рисунке 15, обосновано, что последние хорошо согласуются с результатами, полученными при анализе интенсивности свечения одиночных капель (рисунки 7, 10). Так, средняя интенсивность свечения аэрозоля рапсового масла (при регистрации через оптический светофильтр, не пропускающий свет с длиной волны менее 580 нм) ниже аналогичной интенсивности водяного аэрозоля с примесью флуорофора Rhodamine B (согласуется с результатами рисунок 10). Для составов, не обладающих флуоресцентными свойствами (вода; вода +кек (50 %); вода +кек (50 %)+рапсовое масло (5%)) средняя светимость аэрозольного потока падает до минимальных значений, сопоставимых с интенсивностью свечения фона (рисунок 15). При регистрации через оптический светофильтр, не пропускающий свет с длиной волны менее 580 нм. Для состава (вода+ Rhodamine B +кек (50%)) средняя интенсивность свечения зарегистрированных капель составила 28 ед.



(рисунок 15), что все же выше интенсивности фонового шума, но, за вычетом фонового шума, почти в 8 раз ниже интенсивности свечения воды с примесью флуорофора Rhodamine B (80 ед.). Используя ранее полученную зависимость (рисунок 7), можно обосновать, что средняя концентрация кека в таких каплях составляет 5–6 %. Использование оптического светофильтра, не пропускающего свет с длиной волны менее 580 нм, позволяет выделить отдельные капли суспензии с достаточно малой (1–6 %) концентрацией кека, но не позволяет проанализировать весь поток в целом.

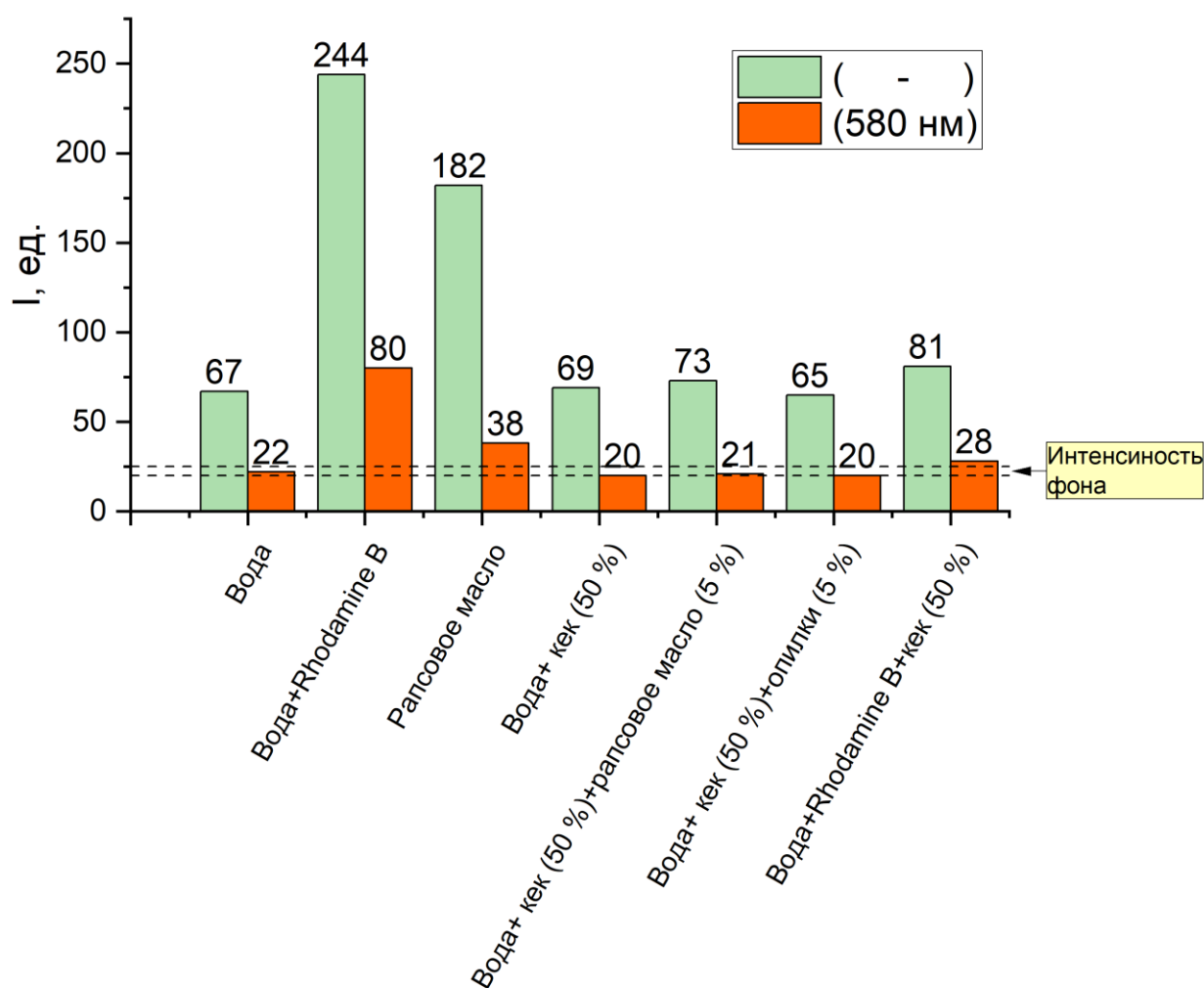


Рисунок 15 - Гистограмма средних интенсивностей свечения исследованных составов (с использованием и без оптического светофильтра, не пропускающего свет с длиной волны менее 580 нм)

Установлен интересный результат при съемке аэрозольных потоков исследованных составов без использования оптического светофильтра (рисунок 15). При отсутствии в распыляемом составе флуорофора (Rhodamine В) видеокамера регистрирует лишь отраженный каплями свет от DPSS лазера (532 нм):  $I=I_r$ . Вследствие малых значений коэффициента поглощения используемых компонентов, интенсивности отраженного каплями исследовавшихся составов вода; вода +кек (50 %); вода +кек (50 %)+рапсовое масло (5%) света практически сопоставимы и находятся в диапазоне 65–69 ед. (рисунок 15). Когда состав (компонент) обладает свойствами флуоресценции, то к отраженному каплей свету добавляется эмитированный (излученный) каплей свет во всем диапазоне спектра эмиссии (5):

$$I=I_r+I_e. \quad (5)$$

За счет этого итоговая интенсивность свечения капли многократно возрастает. Такое явление характерно, например, для составов Water+ Rhodamine В и рапсовое масло, а также отчасти проявляется при добавлении в суспензию рапсового масла в концентрации 5 % (рисунок 15). Пренебрегая коэффициентом поглощения флуорофора, в первом приближении можно принять, что при прочих равных условиях (тип состава, концентрация компонентов, характеристики распыления) интенсивность отраженного каплями света для одного и того же состава будет постоянна:  $I_r=\text{const}$ . Таким образом, за вычетом фонового шума (порядка 22 ед.) получаем значения  $I_r$  для воды и воды с кеком (50 %) около 45 ед. и 47 ед., соответственно. Также за вычетом фонового шума по значениям средней интенсивности для составов вода+ Rhodamine В и вода+ Rhodamine В +кек (50 %) по формуле (1) находим значения  $I_e$ , которые составили 177 ед. и 12 ед., соответственно. Получаем, что интенсивность эмитированного каплями суспензии (вода+ Rhodamine В +кек (50 %)) света в 15 раз ниже, чем у воды без примесей твердой компоненты (вода+ Rhodamine В). Руководствуясь данными рисунка 7, можно определить, что средняя концентрация частиц кека в отдельных каплях потока составляет не менее 15 %. Соответствующий подход, во-первых, не учитывает капли, концентрация кека в которых выше 25–30 %, по

причине отсутствия сигнала флуоресценции (рисунок 7), во-вторых, не принимает в расчет снижение интенсивности свечения капли при уменьшении ее размера (рисунок 4), а, в-третьих, не позволяет зарегистрировать капли и частицы, размер которых менее или сопоставим с 1 пикс. (интенсивность таких капель «размывается» фоновым шумом).

На рисунке 16 приведена усредненная видеограмма потока суспензии (вода+ Rhodamine В +кек (50 %)).

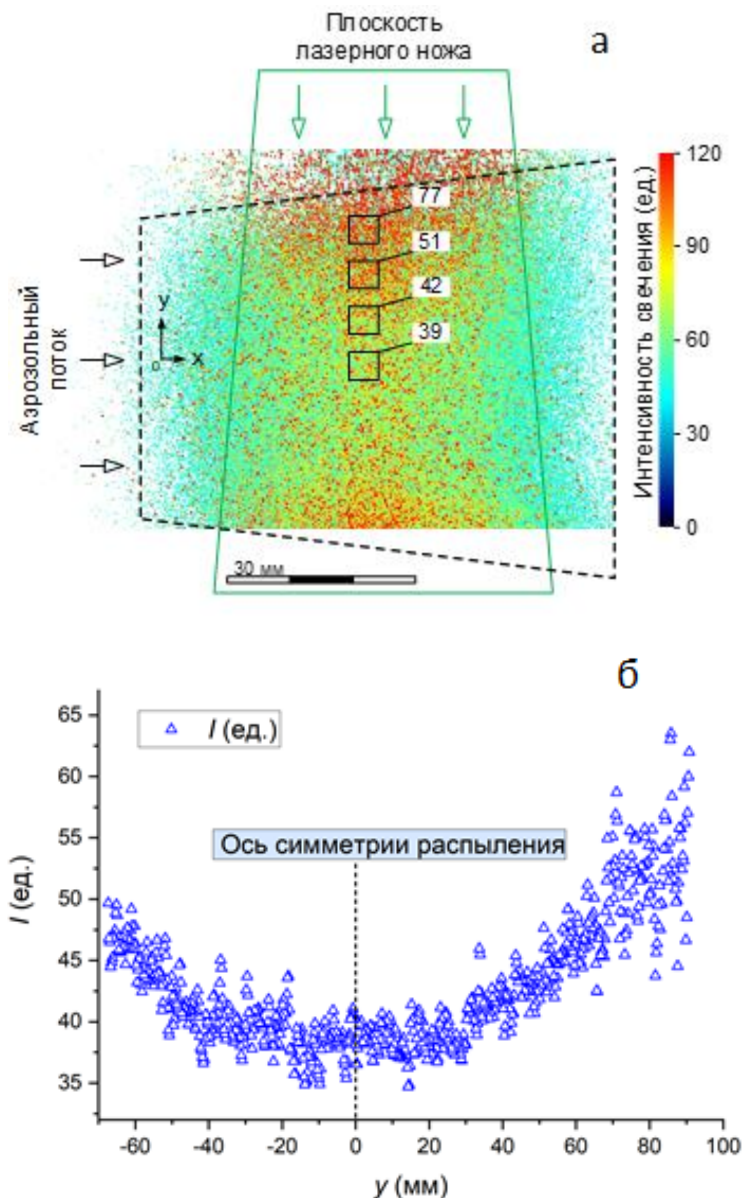


Рисунок 16 - Усредненная видеограмма (после обработки) потока ВУТ (вода+ Rhodamine В +кек (50 %)) (а), а также распределение интенсивности в вертикальном сечении потока (б). Эксперимент без использования оптического светофильтра.

На рисунке 16 показано, что на периферии аэрозольного потока суспензии интенсивность свечения каплей почти в 2 раза выше, чем в ядре (вблизи оси симметрии форсуночного устройства). Такой результат (в совокупности с ранее полученными данными, представленными на рисунке 7) свидетельствует о том, что по мере удаления от оси симметрии факела распыления концентрация воды в отдельных каплях суспензии возрастает. Снижение интенсивности свечения потока в центральной части не связано с существенным поглощением каплями лазерного излучения, так как по мере движения ножа лазера ближе к нижней кромке потока (рисунок 16) интенсивность свечения также возрастает.

На рисунке 17 приведены установленные зависимости интенсивности свечения отдельных каплей в потоке от их размеров для нескольких исследованных в экспериментах составов. Рост размера капли приводит к увеличению интенсивности ее свечения. Данный результат хорошо согласуется с результатами, полученными при анализе интенсивностей свечения одиночных каплей (рисунок 4). Так же видно (рисунок 17а), что без использования оптического светофильтра при анализе отдельных каплей в общем потоке нет возможности определить компонентный состав аэрозольного облака, в отличие от анализа средних полей интенсивности свечения (рисунок 14, 15). В то же самое время при использовании фильтра, не пропускающего свет с длиной волны менее 580 нм (рисунок 17б) становится возможным отличить капли воды без и с примесью кека, но невозможно отделить капли рапсового масла от капель суспензии. Так, при равных размерах каплей, интенсивность свечения каплей воды без примесей в 2-10 раз выше интенсивности свечения каплей суспензии. С ростом размеров каплей эта разница существенно возрастает, что (при сопоставлении с данными рисунка 7) говорит о росте концентрации кек в каплях суспензии. Сопоставление данного результата (рисунок 17) с данными рисунка 16 позволяет утверждать, что капли с минимальной концентрацией кек находятся на периферии потока, а с максимальной, наоборот, движутся в его центре. По результатам данного анализа установлена связь концентрации кек и размеров капли суспензии (рисунок 18).

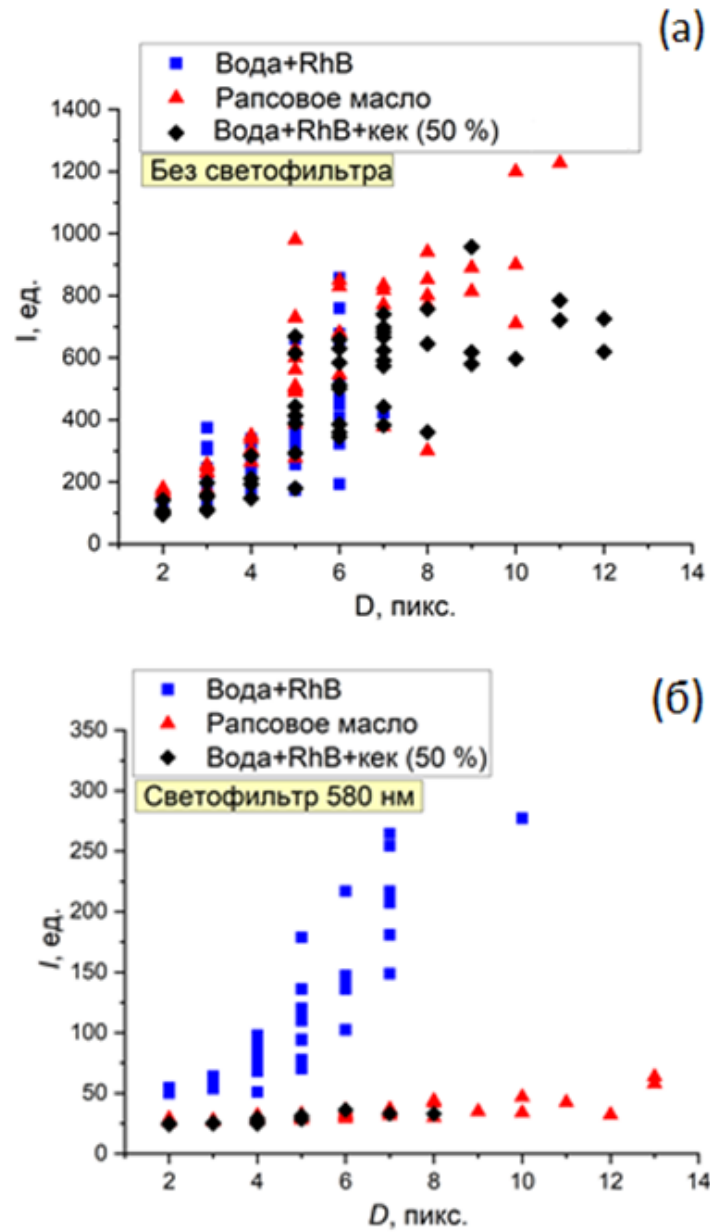


Рисунок 17 - Значения интенсивности свечения отдельных капель в потоке от их размера для нескольких рассмотренных в экспериментах составов без использования (а), а также с использованием (б) оптического светофильтра, не пропускающего свет с длиной волны менее 580 нм

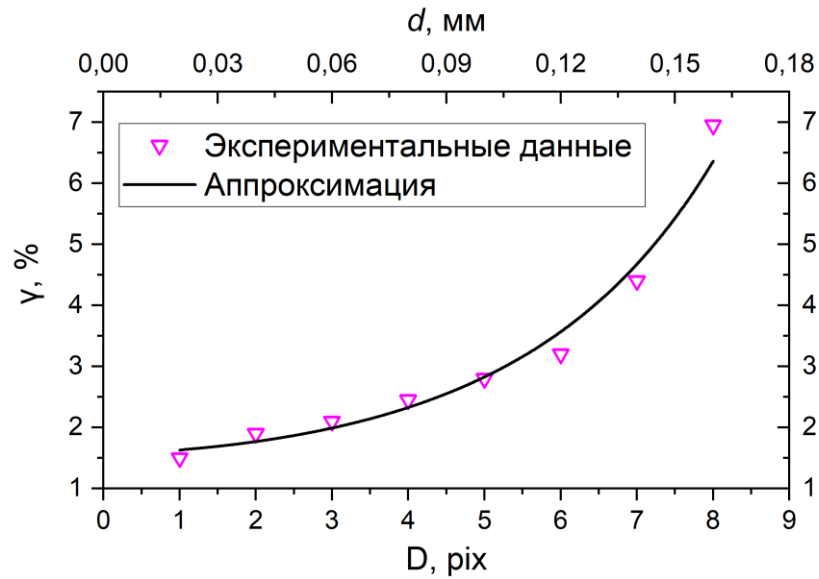


Рисунок 18 - Связь концентрации кека в суспензии с размерами капель.

По результатам анализа рисунка 18 можно сделать обоснованное заключение о том, что используемый в настоящем исследовании подход позволяет выделять отдельные капли суспензии, концентрация кека в которых составляет менее 7 % (хорошо согласуется с выводами по результатам анализа, представленными на рисунке 15). При  $\gamma > 7$  % интенсивность свечения капель слишком мала и сопоставима с фоновым шумом (в данном случае, порядка 20-24 ед.). Использование полученной зависимости (рисунок 18) создает условия для оценки концентрации примеси кек в отдельных каплях суспензионного аэрозольного потока. На рисунке 19 приведена зависимость интенсивности свечения отдельных капель в потоке от их размеров для трех значений масштабного коэффициента  $S$ , а также приведены видеogramмы, иллюстрирующие интенсивность свечения капель различных размеров.

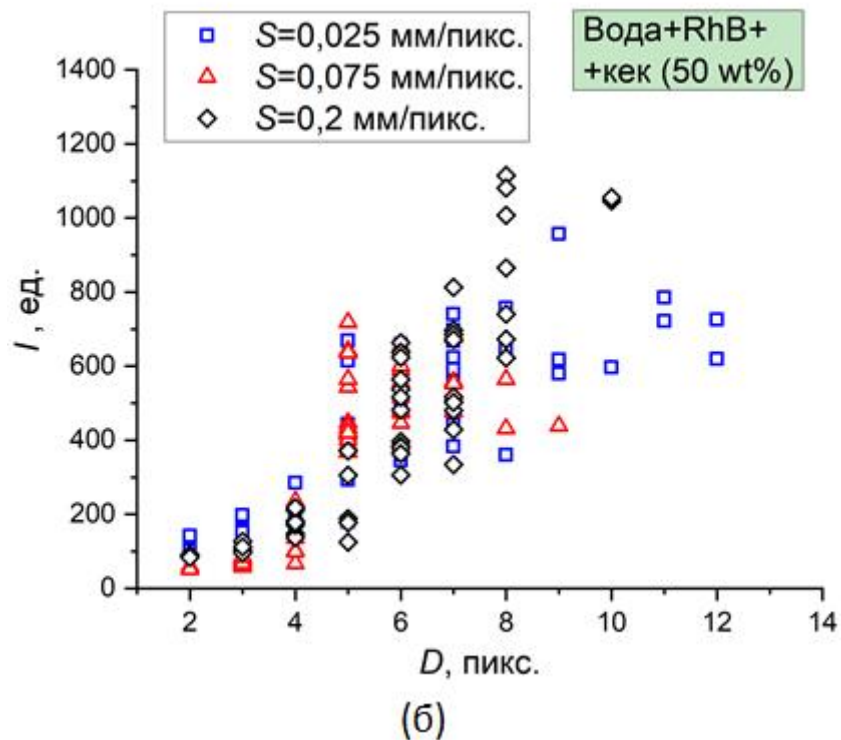
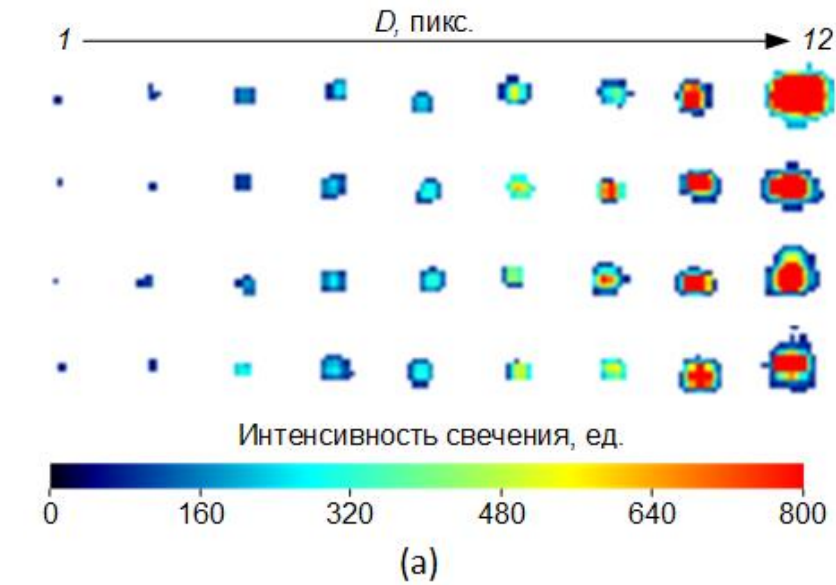


Рисунок 19 - Видеограммы отдельных капель (а), а также зависимость интенсивности свечения отдельных капель в потоке от их размеров (б) для состава вода+RhB+фильтр.кек (50 %) без использования оптического светофильтра, не пропускающего свет с длиной волны менее 580 нм (для трех значений масштабного коэффициента S)

На рисунке 19 видно, что независимо от увеличения объектива (значения масштабного коэффициента) интенсивность свечения капли обусловлена

размерами капли на изображении (измеренного в пикселях). Установленная особенность характерна для всех исследованных составов и должна учитываться при анализе компонентного состава отдельных капель в потоке.

### **2.1.3. Основные выводы по результатам экспериментального определения компонентного состава капель методом LIF**

1. Метод лазерной индуцированной флуоресценции (LIF) позволяет выделить в общем аэрозольном потоке ВУТ и ОВУТ как отдельные капли жидкостей (вода, рапсовое масло), входящих в исходный состав суспензионных топлив, так и оценить среднюю концентрацию твердой компоненты (кек) в каплях аэрозоля.

2. Вне зависимости от исследуемого состава рост размера капли приводит к увеличению интенсивности ее свечения. Для разных составов скорость роста отличается.

3. Частицы кека в составе суспензии абсорбируют флуорофор Rhodamine В, в результате светимость воды в исследуемом составе после его приготовления снижается на 70-75% относительно начального значения.

4. Увеличение концентрации кека в капле приводит к нелинейному снижению интенсивности ее свечения (флуоресценции). При концентрации кека в суспензии свыше 27-30% капля становится абсолютно непрозрачной для лазерного ножа, тем самым интенсивность свечения (флуоресценции) капли снижается практически до нуля.

5. При фоторегистрации потока с использованием оптического светофильтра, не пропускающего свет с длиной волны менее 580 нм, при равных размерах капель, интенсивность свечения отдельных капель воды в 2-10 раз выше интенсивности свечения капель суспензии воды с кеком (50 %).

6. При распылении состава вода+кек (50 %) средняя концентрация кека в зарегистрированных (по результатам анализа среднего поля интенсивности потока) каплях суспензионного аэрозоля составила выше 15 %.



7. При использовании оптического светофильтра, не пропускающего свет с длиной волны менее 580 нм, метод LIF позволяет достоверно определить компонентный состав отдельных капель суспензии в общем потоке, концентрация кека в которых составляет менее 7 %. При  $\gamma > 7$  % интенсивность свечения отдельных капель слишком мала и сопоставима с фоновым шумом.

8. Капли с минимальной концентрацией кека находятся на периферии потока, а с максимальной, наоборот, движутся в его центре (ядре).

9. При анализе интенсивности свечения отдельных капель в аэрозольном потоке ВУТ зарегистрировано, что с уменьшением размера (диаметра) капли ниже 0,15 мм концентрация кека в последней снижается с 7% до 1%.

## **2.2. Определение компонентного состава капель растворов, суспензий, эмульсий методом IPI**

### **2.2.1. Экспериментальный стенд и методика исследований**

При проведении исследований использовалась установка, описанная в п. 2.1.2.1 Как и в случае реализации метода лазерной индуцированной флуоресценции (LIF), использовалась лазерная подсветка измерительной области (рисунок 20).

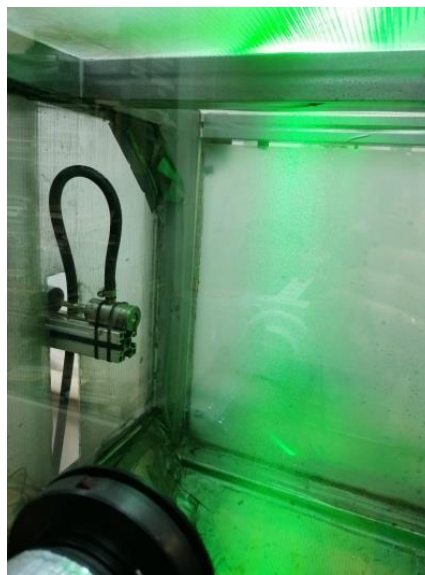


Рисунок 20 - Кадр с подсветкой измерительной области

С применением распылительной форсунки, представленной на рисунке 12, генерировался полидисперсный аэрозольный поток. Поток рассекался в вертикальной плоскости вдоль оси симметрии факела распыла форсунки световым ножом непрерывного DPSS лазера «KLM-532A» (длина волны – 532 нм, угол раскрытия ножа –  $22^\circ$ , толщина ножа – 0,2 мм, мощность – 5 Вт). При попадании капли аэрозоля в плоскость лазерного ножа регистрировалась интерференция (на расфокусированном изображении) между преломленным и отраженным каплей светом [22]. Регистрация интерференционных картин капель осуществлялась видеокамерой «Phantom MIRO M310» (разрешение кадра –  $1280 \times 800$  пикс., размер регистрационной области –  $50 \times 50$  мм, расстояние от центра регистрационной области до распылительной форсунки – 0,2 м), оптическая ось которой перпендикулярна плоскости лазерного ножа. В комплекте с видеокамерой использовался объектив «Sigma DG 105 мм f/2.8 EX Macro» (расстояние от линзы объектива до области регистрации составило 300 мм, расстояние расфокусировки для последующего получения интерференционной картины – около 35 мм). Для каждого состава выполнялись три эксперимента, в которых регистрировались не менее 250 кадров. Каждый кадр содержал от 30 до 70 образов. Выводы относительно каждой концентрации примеси делались на основе анализа около 500 интерференционных картин капель. Случайные ошибки определения количества образов каждого типа оценивались с использованием формул (1)-(4) (п. 2.1.1.1).

### 2.2.2. Результаты и обсуждение

В ходе выполненных исследований зарегистрирована совокупность изображений, примеры которых представлены на рисунке 21. Визуализируемые на видеogramмах образы являются только теми каплями, которые способны частично или полностью пропустить и преломить поток излучения (лазерный нож), тем самым вызвав интерференцию.

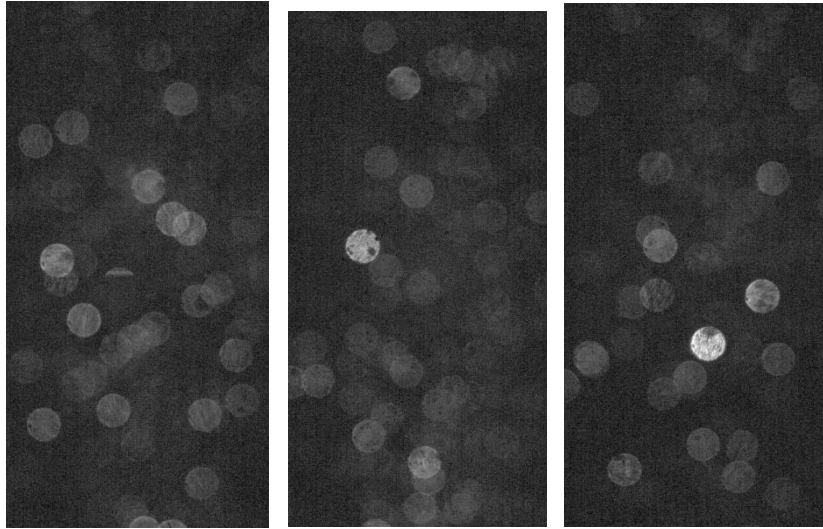


Рисунок 21 - Примеры видеокадров, полученных в ходе проведения экспериментов

В ходе обработки результатов (изображений, аналогичных представленным на рисунке 21) установлены пять видов интерференционных картин каплей (рисунок 22): 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); 5 – «ошибочная» (очевидно, связана с формой лазерного ножа, а также характерна каплям, расположенным на границе лазерного ножа). Анализ выполнялся аналогично [22].

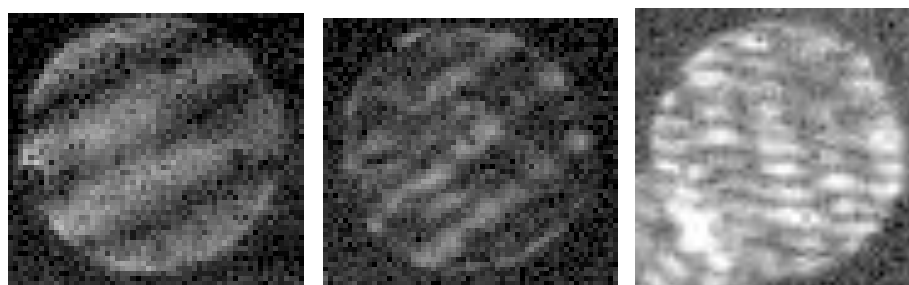
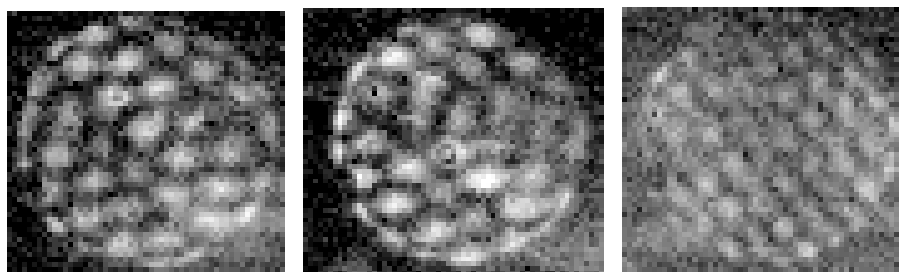
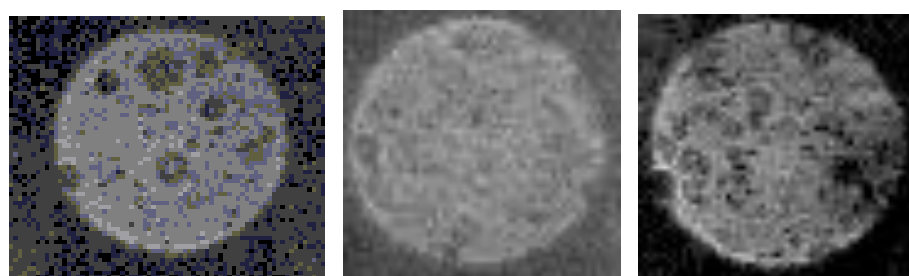
*a**b**c**d**e*

Рисунок 22 - Интерференционные картины капель в проведенных экспериментах: *a* – нормальная, *b* – угловая, *c* – кривая, *d* – гексагональная, *e* – «ошибочная»

При анализе результатов (по аналогии с [22]) рассчитывалось интегральное содержание (количество) образов (интерференционных картин) каждого типа:  $N_{(i)}=n_i/(n_1+n_2+\dots+n_5)\cdot 100\%$  ( $n_i$  – количество образов отдельного типа). Далее строились гистограммы распределения образов капель в потоке (рисунок 23). В [22] присутствовал зашумленный образ пятого типа, соответствующей спекловой картине. В настоящем исследовании такие образы не зарегистрированы. По этой причине далее анализируется только соотношение образов первых четырех типов. На рисунке 23 приведено содержание образов каждого типа для различных исследованных составов (вертикальные линии на гистограмме соответствуют рассчитанным доверительным интервалам – случайной погрешности измерений).

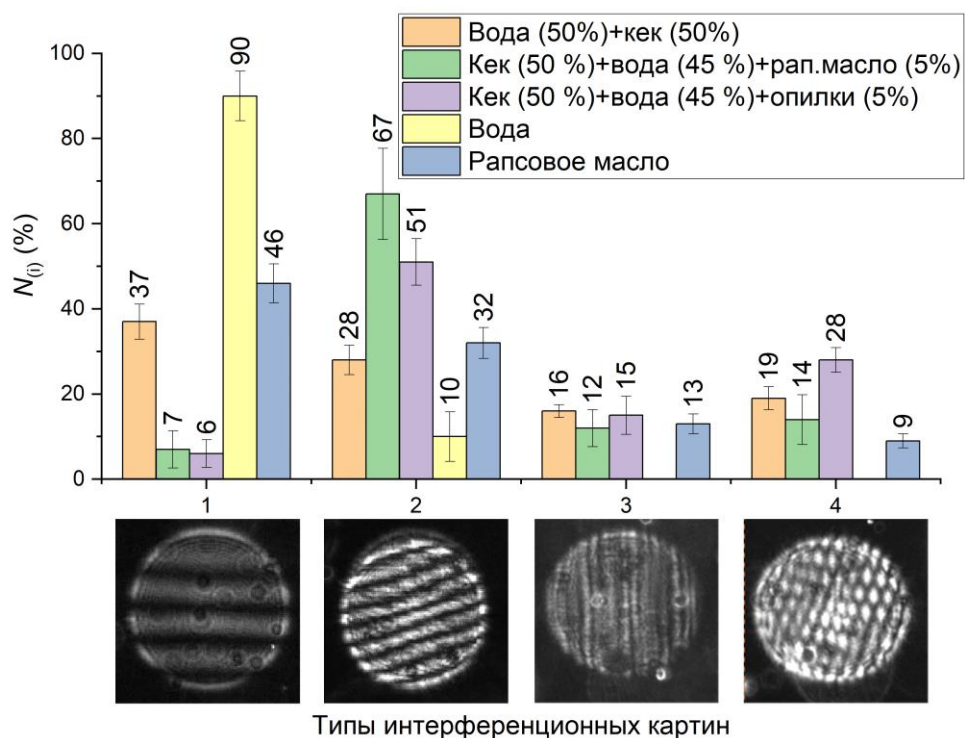


Рисунок 23 - Содержание ( $N(i)$ ) образов четырех выделенных типов в аэрозольном потоке для пяти рассмотренных составов (при  $G_a \approx 50$  кг/ч).

Первый тип интерференционных картин представляет образ, соответствующий прозрачной сферической капле [22]. Видно, что содержание данного типа образов зависит от типа примеси. Второй тип картин соответствует несферичным каплям. Количество образов данного типа существенно

отличалось (в 2-5 раз) для разных исследованных составов. Как и в [22] интерес представляют образы третьего и четвертого типов, так как именно они обуславливают наличие, концентрацию и тип примеси в капле. В [22] сформулирован вывод о том, что доля (суммарный процент) образов четвертого типа зависит, главным образом, от размеров частиц примеси. По этой причине с использованием выражения (6), полученного в [22], вычислялся средний размер частиц примеси в каплях аэрозоля.

$$d_p = 0.6259 \cdot \exp(0.2171 \cdot N_{(4)}), \text{ мкм.} \quad (6)$$

Результаты вычислений по формуле (6) представлены в таблице 4.

Таблица 4 - Средний размер частиц примеси в каплях аэрозоля, полученный по формуле (6)

Состав	Процент образов четвертого типа	$d_p$ , (мкм)
Вода (50 %)+кек (50 %)	18,56	35,19
Вода (45 %)+кек (50 %) +рапсовое масло (5 %)	14,29	13,93
Вода (45 %)+кек (50 %)+опилки (5 %)	27,62	251,57
Рапсовое масло	9,33	4,74

Полученные значения  $d_p$  удовлетворительно коррелируют с известным начальным размером частиц примесей. Неочевидным результатом является наличие примеси в рапсовом масле, которые, скорее всего, остались в его составе после приготовления, отжима и фильтрации.

Рисунок 23 показывает, что в потоке суспензии воды и кека (50 %) доля капель, не содержащих частицы кека, достигает 37 %. Такой результат можно объяснить тем, что в отличие от метода LIF (п. 2.1), где минимальный размер идентифицированных капель обусловлен, главным образом, значением масштабного коэффициента ( $S$ ), интерферометрическая методика позволяет идентифицировать капли размерами менее 10 мкм. По причине малых размеров такие капли практически не содержат примеси кека, что хорошо согласуется с результатами, представленными на рисунке 18. При добавлении в состав

суспензии примеси рапсового масла или древесных опилок процент капель воды без примесей в общем потоке снижается на 6–7% (рисунок 23). Такой результат обусловлен ростом вязкости итогового состава. Количество мелких капель снижается. В случае добавления древесной биомассы в состав суспензии опилки, по-видимому, впитывают воду, дополнительно препятствуя образованию мелких капель воды в общем потоке.

Также по результатам экспериментов установлено (рисунок 23), что наличие в составе капель частиц кека, опилок и рапсового масла существенно (до 7 раз) увеличивает количество несферичных капель в составе струи. Этот интересный и неочевидный 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.

### **2.2.3. Основные выводы по результатам экспериментального определения компонентного состава капель методом IPI**

1. Интерферометрический метод (IPI) позволяет косвенно определить средний размер частиц примеси в каплях аэрозольного потока.
2. Количественная концентрация капель воды без примесей в общем потоке для исследованных составов составила: Water+Filter-Cake (50 %) – 37%; Water+Filter-Cake (50 %)+Rapesed Oil (5 %) – 7%; Water+Filter-Cake (50 %)+Sawdust (5 %) – 6%.
3. Интерферометрическая методика позволяет зарегистрировать в распыленном потоке самые мелкие капли размерами менее 10 мкм.
4. Наличие в составе капель частиц кека, опилок и рапсового масла существенно (до 7 раз) увеличивает количество несферичных капель в составе струи.

## 2.3. Определение компонентного состава капель растворов, суспензий и эмульсий методом теневой макросъемки

### 2.3.1. Экспериментальный стенд и методика исследований

Для определения размеров капель суспензий использовался метод «Shadow Photography» (SP). Регистрация размеров капель суспензий осуществлялась в трех различных областях (на оси симметрии потока, на 30 мм выше и ниже оси симметрии, соответственно) на удалении около 150 мм от сопла распылительной форсунки. Использование такого подхода обусловлено неоднородностью генерируемой струи – размеры капель в каждой точке ее вертикального сечения существенно отличались. Для более точного определения размеров капель необходим минимальный размер измерительной области. Поэтому регистрация видеogramм капель выполнялась поочередно в нескольких областях. Центры регистрационных областей располагались на расстоянии около 100 мм от сопла форсунки и смещены относительно друг друга на 30 мм по вертикали [37], так как на данном участке для всей совокупности начальных параметров осуществлялся полный распад струи на отдельные капли. Генерируемая форсункой струя регистрировалась высокоскоростной видеокамерой «Phantom MIRO M310» (разрешение 1280×800 пикс.; частота съемки – 3200 кадр/с; время экспозиции – 1 мкс; разрядность изображения – 12 бит) в комплекте с объективом «Nikon Micro-Nikkor 200мм f/4D ED-IF A». Фоновая подсветка обеспечивалась прожектором «Multiled PT-V9 GS Vitec». Плоскость фокусировки оптической системы находилась на оси симметрии форсунки. Глубина резкости оптической системы составляла около 1,5-2 мм. Размеры каждой регистрационной области составляли около 33×21 мм, значение масштабного коэффициента –  $S \approx 0,0262$  мм/пикс. Для каждого исследуемого состава выполнялась серия из трех экспериментов. Каждый эксперимент включал от 700 до 1000 кадров процесса распыления. Полученные видеокдры обрабатывались в программном обеспечении «Actual Flow» (Рисунок 24).



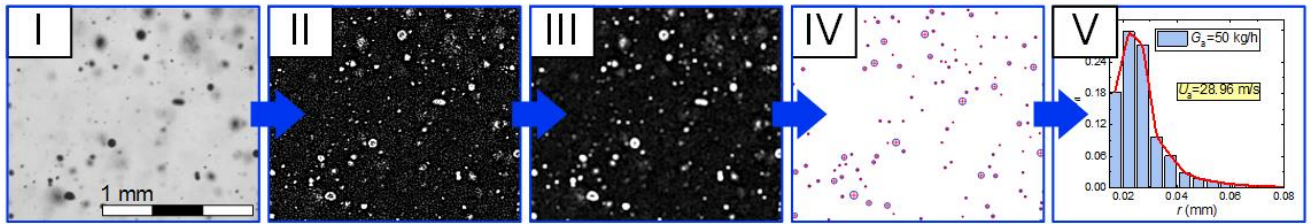


Рисунок 24 - Иллюстрация процесса обработки данных при определении размеров капель методом SP (для состава #1 при  $G_f \approx 146 \text{ kg/h}$ ,  $G_a \approx 50 \text{ kg/h}$ ): (I) – исходное изображение; (II) – выделение границ капель при наложении фильтра «Laplace Edge Detection»; (III) – удаление шумов с изображения при наложении «Median Filter»; (IV) – определение средних радиусов капель с использованием процедуры «Bubbles Identification»; (V) – построение итоговой гистограммы распределения размеров капель

Процесс обработки включал этапы (рисунок 24): (I) совокупность исходных изображений струи из каждой серии экспериментов импортировалась в «Actual Flow»; (II) выполнялось выделение границ капель суспензии программным фильтром «Laplace Edge Detection» на каждом кадре. По результатам обработки капли имели светлые границы; (III) выполнялась нейтрализация шумов на изображениях с использованием «Median Filter»: выполнялось усреднение интенсивности каждого пикселя изображения по области  $3 \times 3 \text{ pix}$ ; (IV) с использованием процедуры «Bubbles Identification» определялись средние размеры (радиусы –  $r$ ) капель, попавших в регистрационную область. На первом шаге задавался порог бинаризации изображений – минимальное значение интенсивности границ капель на изображении. На втором шаге задавались геометрические параметры капель, подлежащих идентификации: значение минимальной и максимальной площади, коэффициент несферичности  $\zeta$  (отношение максимального и минимального поперечного размеров капли, в настоящих экспериментах задавался  $\zeta = 1,1-10$ ). Итогом обработки являлось пространственное поле распределений размеров капель для каждого кадра; (V) строилась итоговая гистограмма распределения капель по размерам. При построении гистограммы задавалась ширина столбца

(шаг по  $r$ ). Суммарное количество частиц каждого размера (группы, обусловленной шириной столбца) определялось по результатам анализа всех кадров эксперимента для конкретной элементарной области.

По результатам обработки рассчитывались значения относительных количественных ( $N_n$ ) и объемных ( $N_V$ ) долей капель суспензии в струе. Использовались следующие формулы (для каждой совокупности капель):

$$N_{n(i)} = (N_{\#1(i)} + N_{\#2(i)} + N_{\#3(i)}) / (n_{\#1} + n_{\#2} + n_{\#3}) \quad (7)$$

$$N_{V(i)} = (V_{\#1(i)} + V_{\#2(i)} + V_{\#3(i)}) / (V_{\#1} + V_{\#2} + V_{\#3}), \quad (8)$$

где  $N_{n(i)}$  – количественная доля капель  $i$ -ой совокупности в струе;  $N_{V(i)}$  – объемная доля капель  $i$ -ой совокупности в струе;  $N_{\#1(i)}$ ,  $N_{\#2(i)}$ ,  $N_{\#3(i)}$  – суммарное число капель  $i$ -ой совокупности в регистрационной области #1, #2 или #3;  $V_{\#1(i)}$ ,  $V_{\#2(i)}$ ,  $V_{\#3(i)}$  – суммарный объем капель  $i$ -ой совокупности в регистрационной области #1, #2 или #3;  $n_{\#1}$ ,  $n_{\#2}$ ,  $n_{\#3}$  – суммарное количество капель в регистрационной области #1, #2 или #3;  $V_{\#1}$ ,  $V_{\#2}$ ,  $V_{\#3}$  – суммарный объем капель в регистрационной области #1, #2 или #3.

Также по результатам исследований определялась доля сферичных (коэффициент несферичности менее и равен 1,1) и несферичных (коэффициент несферичности более 1,1) капель каждого состава и строились соответствующие гистограммы. При обработке результатов экспериментов принято, что сферичные капли соответствуют значениям  $\zeta \leq 1,1$  во избежание ошибок, связанных с неравномерной подсветкой контура капли, а также с ее размытием в направлении движения в случае высоких (более 20-25 м/с) скоростей потока. Систематическая погрешность определения размеров (радиусов) капель суспензии не превышала 5 мкм.

#### 2.2.4. Результаты и обсуждение

На рисунке 25 приведены установленные распределения (объемные доли капель) с учетом различных коэффициентов несферичности ( $\zeta$ ) четырех

исследованных в экспериментах составов. Видно, что объемная доля несферичных капель для различных составов существенно отличается.

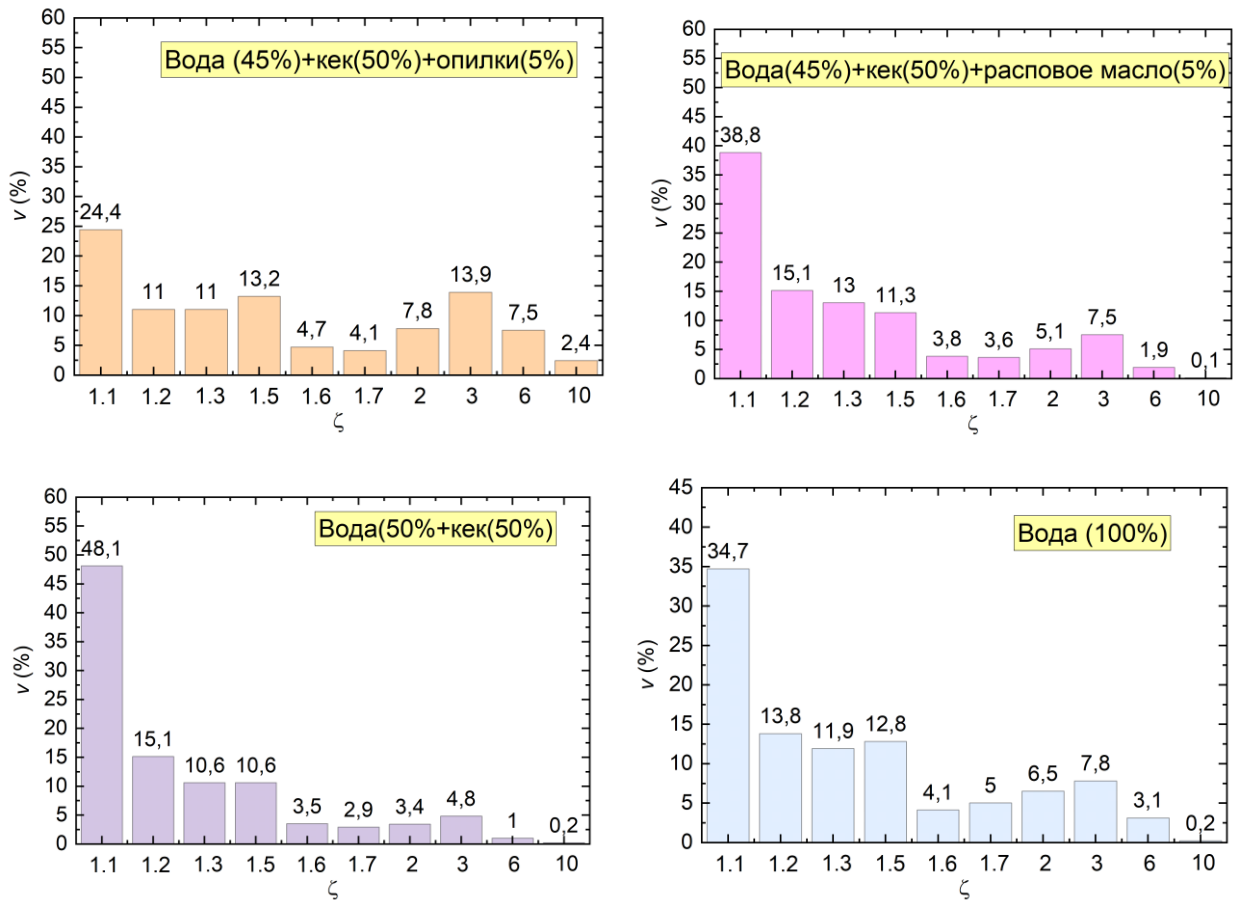


Рисунок 25 - Распределения (объемная доля) капель по коэффициентам несферичности ( $\zeta$ ) для исследованных составов

На рисунке 26 приведена суммарная объемная доля сферичных ( $\zeta \approx 1,1$ ) и несферичных ( $\zeta > 1,1$ ) капель для нескольких исследованных составов. Видно, что добавление кека приводит к снижению доли несферичных капель в потоке на 20%. Такой результат, скорее всего, связан с большей вязкостью данной суспензии по сравнению с водой без примесей. Необходимо отметить, что этот результат не совсем согласуется с данными, полученными при использовании интерферометрической техники (рисунок 23), где при добавлении при добавлении кека в воду процент несферичных капель, наоборот, возрастал. Данный факт связан с низким пространственным разрешением SP метода: минимальный размер регистрируемых капель сопоставим со значением

масштабного коэффициента ( $S$ ). По этой причине результаты IP1 метода (учитывающего самые мелкие капли) представляются более достоверными. Добавление в состав суспензии рапсового масла (рисунок 26) способствует росту объемной доли несферичных капель. Этот результат можно объяснить тем, что за счет многокомпонентности состава (вода, кек, масло) при движении капель происходит их активное разделение на отдельные компоненты (в большинстве случаев, очевидно, вода и масло «стараяются» отделиться друг от друга по причине сильно отличающихся вязкости, плотности и поверхностного натяжения). В процессе разделения капли зачастую принимают вытянутую (несферичную) форму.

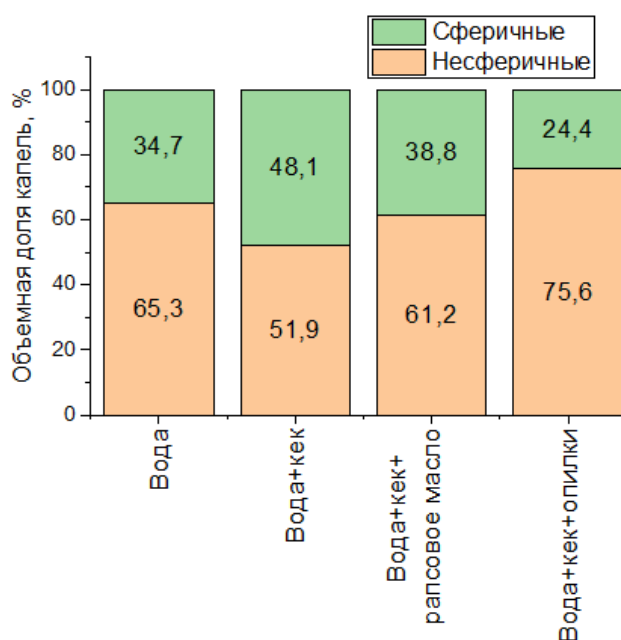


Рисунок 26 - Суммарная объемная доля сферичных и не сферичных капель для нескольких составов

Добавление в суспензию (вода + кек) древесных опилок существенно увеличивает долю несферичных капель – до 76% (рисунок 26). Соответствующий результат обусловлен неправильной формой древесных опилок. 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 (рисунок 25). Данный результат хорошо согласуется с данными, полученными при использовании интерферометрической техники (рисунок 23), а также крайне важен при прогнозировании характеристик зажигания и горения капель суспензионных топлив.

### **2.3.3. Основные выводы по результатам экспериментального определения компонентного состава капель методом теневой макросъемки**

1. Метод SP позволяет эффективно определить долю несферичных капель суспензии в общем аэрозольном потоке, что дает возможность оценить долю капель, содержащих примеси в виде крупных (более 100 мкм) частиц твердых компонентов.

2. Добавление в суспензию воды с кеком древесных опилок существенно увеличивает долю несферичных капель – до 76%.

3. Установлено, что не менее 23% всего объема капель в распыленном потоке суспензии (вода + фильтр. кек + опилки) содержат в своем составе древесные опилки.

## **2.4. Выводы по второй главе**

1. Комбинированное применение оптических методов (лазерно-индуцированная флуоресценция – LIF, интерферометрия – IPI, теневая фотография – SP) позволяет установить экспериментально компонентный состав отдельных капель, а также распределения компонентов (твердых и жидких) в спрее. С использованием метода LIF определены концентрации кека в отдельных каплях, средние концентрации кека в аэрозольном потоке, распределения водной компоненты по сечению потока, а также выделены капли рапсового масла в потоке. Метод IPI использован для определения среднего размера частиц примеси в аэрозольном потоке, а также для оценки

количественной доли капель воды без примесей в аэрозольном потоке. Преимуществом метода IP1 является возможность регистрации очень малых (с характерным размером менее 10 мкм) капель. Применение метода SP позволяет эффективно определить долю несферичных капель суспензии в общем аэрозольном потоке. Это дает возможность оценки объемной доли капель, содержащих крупные (более 100 мкм) частицы.

2. По результатам комплексного анализа результатов выполненных экспериментов сформулированы заключения:

– капли с минимальной концентрацией кека находятся на периферии потока, а с максимальной, наоборот, движутся в его центральной части;

– в аэрозольном потоке состава вода с кеком (50 %) с уменьшением размера (диаметра) капли ниже 0,15 мм концентрация кека в последней снижается с 7% до 1%;

– при распылении состава вода (50 %) + кек (50 %) средняя концентрация кека в зарегистрированных каплях (размерами более 10 мкм) суспензионного аэрозоля составила выше 15 %;

– количественная концентрация капель (размерами 1 мкм и более) воды без примесей в общем потоке для исследованных составов составила: вода + кек (50 %) – 37%; вода + кек (50 %) + рапсовое масло (5 %) – 7%; вода + кек (50 %) + опилки (5 %) – 7%;

– не менее 23 % всего объема капель в распыленном потоке суспензии (вода+кек+опилки) содержат в своем составе древесные опилки.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА СКОРОСТЕЙ ИСПАРЕНИЯ КАПЕЛЬ РАСТВОРОВ, СУСПЕНЗИЙ И ЭМУЛЬСИЙ

#### 3.1. Компонентный состав исследовавшихся капель растворов, суспензий и эмульсий

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 исследовавшихся капель обусловлен практическим применением исследования в технологиях термической очистки воды, газопарокапельных теплоносителей, полидисперсного пожаротушения. В таблице 5 приведены теплофизические характеристики (плотность, теплопроводность, теплоемкость, температуропроводность), размеры частиц и концентрация добавок к воде.

Таблица 5 - Теплофизические характеристики использованных добавок

Тип примеси	Теплофизические характеристики при 20 °С				Массовая концентрация, % (размер, мкм)
	Теплопроводность, $\lambda$ , Вт/(м·К)	Удельная теплоемкость $C$ , Дж/(кг·К)	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Температуропроводность $a$ , 10 <sup>-6</sup> м <sup>2</sup> /с	
Диоксид титана	59	720	4235	19,35	0.5 (0.1-2)
Глина	1.2	730	1500	1,09	1 (10-20)
Ил	1.5	1200	1050	1,19	1 (300-800)
Песок	1.8	960	1440	1,3	1 (100-200)
Графитовые частицы	70	714	1700	57,67	5 (20-30)
Трансформаторное масло	2	2100	820	1,16	2.5
Спирт этиловый	1	1000	987	1,01	5
NaCl	1,2	3200	1128	1,94	5

Теплофизические параметры примесей (таблица 5) варьируются в широком диапазоне. Использование разнородных примесей обуславливалось необходимостью дальнейшего обобщения полученных экспериментальных результатов, а также получения математических зависимостей скорости испарения капель суспензии или раствора от его теплофизических и реологических параметров. При помощи лабораторных микровесов «Vibra НТ 84RCE» (дискретность – 10<sup>-5</sup> г), определялась необходимая масса примеси, после чего последняя добавлялась в емкость (бак) с водопроводной (ГОСТ Р 51232-98) водой и тщательно перемешивалась в ней до получения однородного состава.

### **3.2. Влияние теплофизических свойств капель суспензий, эмульсий и растворов на скорость их испарения**

#### **3.2.1. Экспериментальный стенд и методы исследований**

Для проведения экспериментальных исследований разработан стенд (рисунок 27). При помощи специализированной форсунки генерировался поток капель (радиусом  $R_d \approx 1$  мм), который подавался в цилиндрический канал (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 («Shadow Photography») на разных участках по всей высоте цилиндрического канала с использованием передвижной системы регистрации на основе координатного механизма. Метод «Shadow Photography» предполагает фоновую подсветку измерительной области лазером (применялся зеленый Nd:YAG лазер «Quantel EverGreen 70») посредством оптического световода, подключенного к рассеивающему



диффузному экрану, и видеофиксацию изображений капель с использованием CCD видеокамеры (использовалась модель «ImperX IGV-B2020M»).

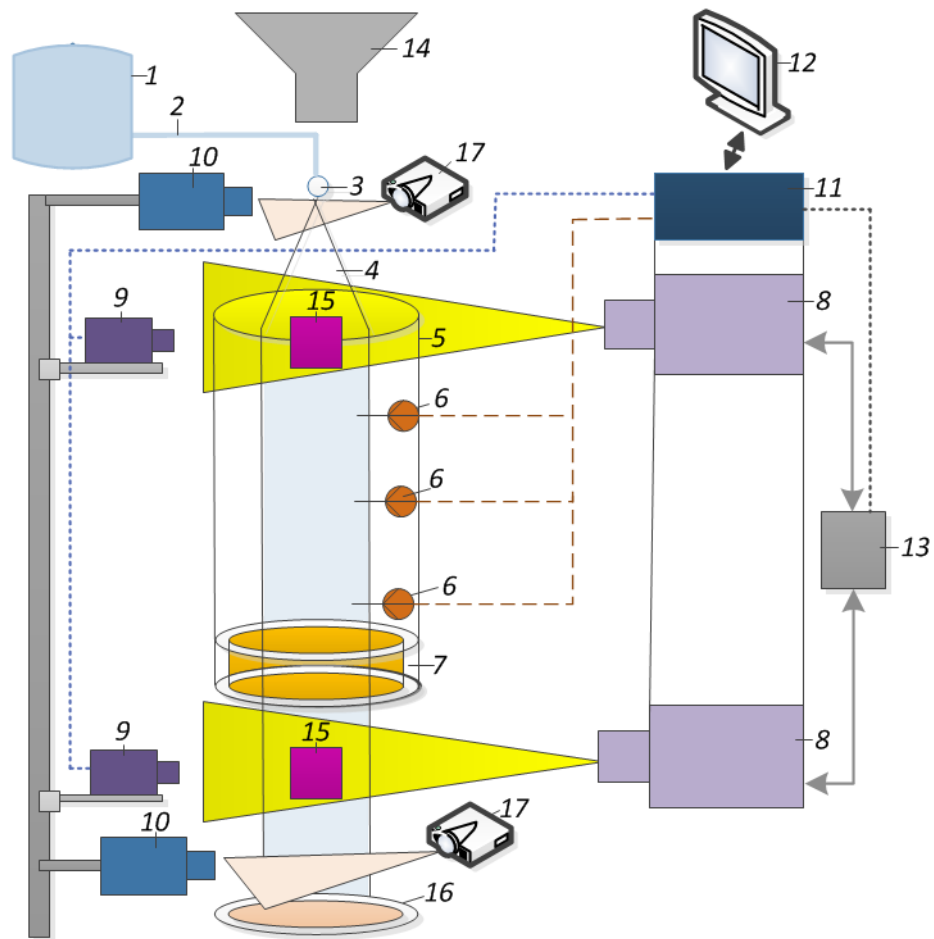


Рисунок 27 - схема экспериментального стенда: 1 – ёмкость с водой; 2 – канал подачи воды; 3 – распылительная форсунка; 4 – капельный поток; 5 – жаропрочный цилиндр; 6 – термопары; 7 – цилиндр (подложка) с горючей жидкостью; 8 – двойной импульсный Nd: YAG-лазер; 9 - кросскорреляционная камера; 10 – скоростная видеокамера; 11 – синхронизатор для персонального компьютера, кросскорреляционных камер и лазера; 12 – персональный компьютер; 13 – генератор лазерного излучения; 14 – вытяжная система; 15 – рассеивающий диффузный экран со световодом; 16 – каплеуловитель; 17 – световой прожектор

Экспериментальные данные обрабатывались в программном обеспечении «Actual Flow». При помощи специализированных программных фильтров

выделялись границы капель, нейтрализовались шумы и определялись радиусы капель. Погрешность определения  $R_d$  не превышала 1,5 %. Также экспериментально определялось время прохождения каплями канала с продуктами сгорания ( $\Delta t_d$ ) путем слежения за отдельными каплями с использованием высокоскоростной CMOS видеокамеры «Phantom MIRO M310» (разрешение изображения 1280×800 пикс; скорость съемки – до  $6,5 \cdot 10^5$  кадр/с). Регистрировались временные моменты вхождения капель в канал ( $t_1$ ) и выхода из него ( $t_2$ ). Погрешность определения  $\Delta t_d$  не превышала 0,03 с.

Для регистрации температуры воздуха и продуктов сгорания ( $T_g$ ) в экспериментах применялся измерительный комплекс, состоящий из высокоскоростной платы аналогового ввода «National Instruments» типа NI 9219 и четырех хромель-алюмелевых (диапазон измеряемых температур – 273–1473 К, систематическая погрешность  $\pm 3$  К) малоинерционных (время теплового запаздывания – менее 0,1 с) термопар, расположенных в четырех точках равномерно по высоте цилиндрического кварцевого канала. Максимальные случайные погрешности измерения  $T_g$  не превышали 15 К.

Значение скорости испарения в каждом эксперименте и для каждого исследованного состава вычислялось по формуле:

$$W_e = \rho_d (R_d - R_d^*) / \Delta t_d, \quad (9)$$

где  $\rho_d$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  $R_d$ ,  $R_d^*$  – начальное и конечное значение радиуса капли, м;  $\Delta t_d$  – время прохождения каплей канала с продуктами сгорания, с. Погрешность определения массовой скорости испарения капель не превышала 2,5 %.

### 3.2.2. Результаты и обсуждение

На рисунке 28 представлены установленные зависимости скоростей испарения капель ( $R_d \approx 1$  мм) от их реологических и теплофизических параметров (плотность, удельная теплоемкость, теплопроводность) при варьировании

начальной температуры жидкости  $T_d$  от 293 до 373 К в условиях их подачи во встречно направленный поток продуктов сгорания температурой  $T_g=573$  К.

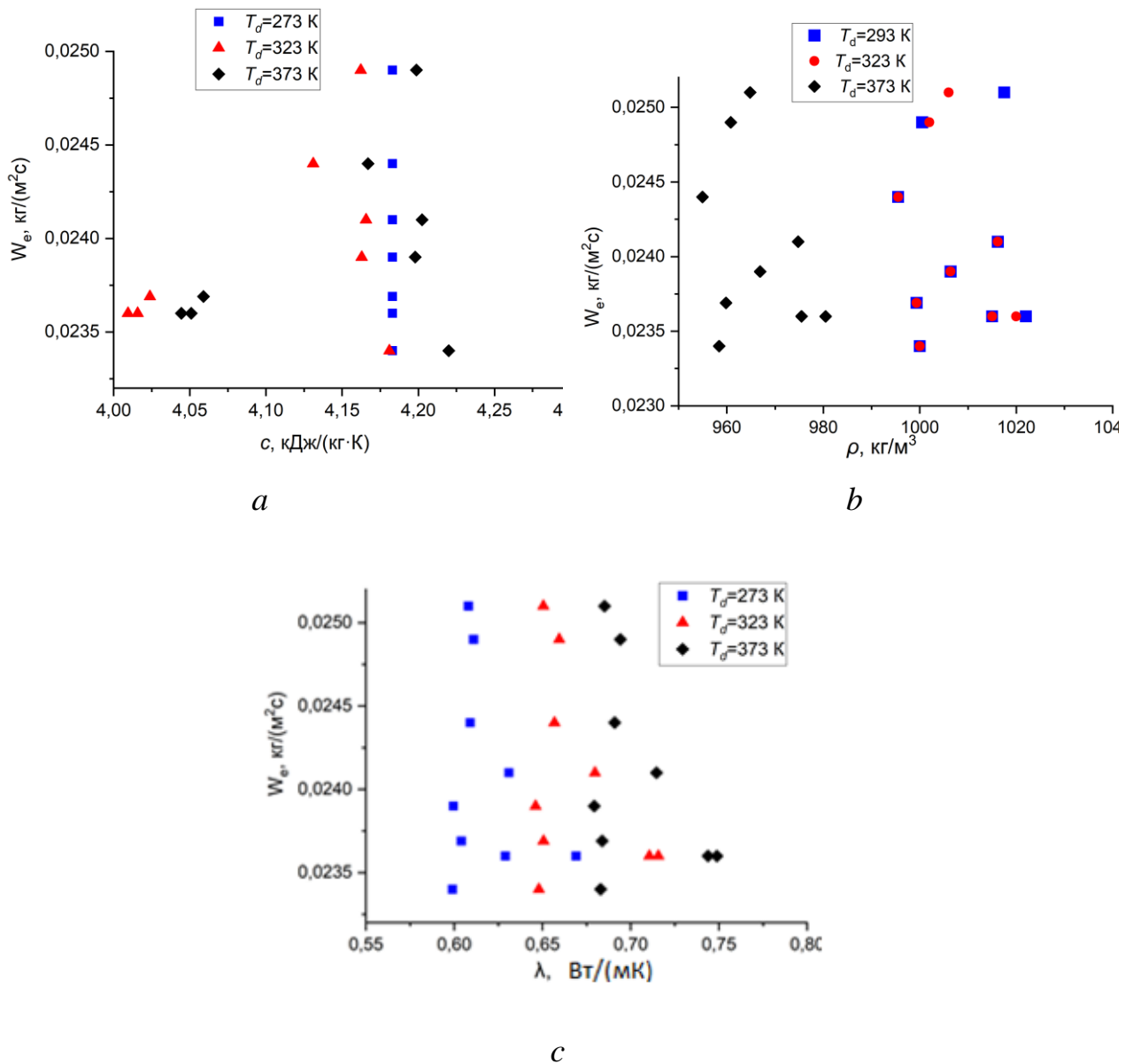


Рисунок 28 - Влияние реологических и теплофизических характеристик исследованных составов ( $R_d \approx 1$  мм,  $T_g \approx 573$  К) жидкостей на массовые скорости испарения капель при варьировании начальной температуры капель (293-373 К)

Основываясь на анализе данных, представленных на рисунке 28, сформулировано заключение о том, что на процесс испарения влияют три рассмотренные характеристики в совокупности. Изучение влияния на процесс испарения только одного из этих трех параметров является некорректным.

Поэтому целесообразно обобщить рассмотренные параметры в одной физической величине – температуропроводности, характеризующей скорость изменения температуры вещества в нестационарных тепловых процессах. Температуропроводность вычислялась по формуле:

$$a = \lambda / (\rho \cdot c), \quad (10)$$

где  $\rho$  – плотность,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\lambda$  – теплопроводность,  $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ;  $c$  – удельная теплоемкость,  $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ .

На рисунке 29 представлены полученные по результатам расчетов зависимости относительных массовых скоростей испарения капель жидкостей ( $R_d \approx 1$  мм,  $T_g \approx 573$  К) от их относительной температуропроводности для трех начальных температур жидкости.

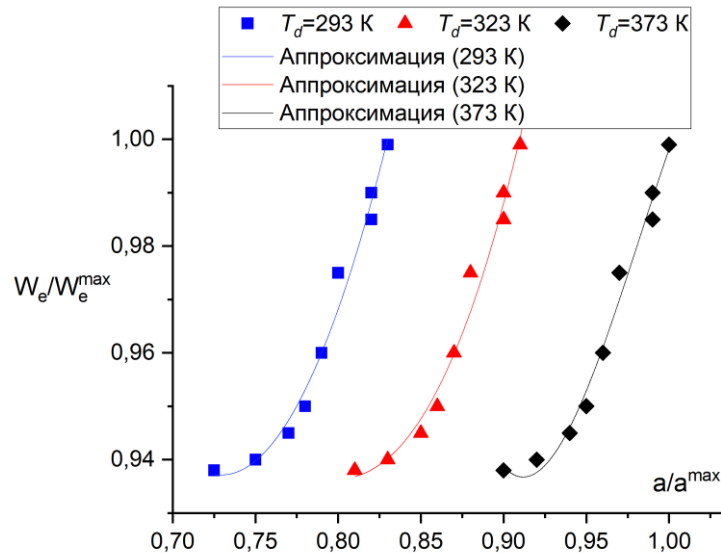


Рисунок 29 - Зависимости относительных массовых скоростей испарения капель исследованных составов ( $R_d \approx 1$  мм,  $T_g \approx 573$  К) от их относительной температуропроводности для трех начальных температур капель

Значения относительной массовой скорости испарения, а также относительной температуропроводности рассчитывались по формулам:

$$W_e' = W_e / W_e^{\max}; \quad (11)$$

$$a' = a / a_{\max}, \quad (12)$$

где  $W_e^{\max}$  и  $a_{\max}$  – максимальные полученные по результатам экспериментов значения параметров  $W_e$  и  $a$  ( $W_e^{\max} = 1,5 \text{ кг}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$ ,  $a_{\max} = 57 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ).

Из рисунка 29 видно, что для трех исследуемых начальных температур капель динамика изменения скорости испарения сопоставима. При аналогичных условиях (тепловой поток, температура продуктов сгорания, начальная температура и радиус капель) снижение температуропроводности состава путем добавления в жидкость примесей приводит к росту скорости испарения капель при их распылении. Показано (рисунок 29), что достичь одного и того же значения скорости испарения можно как путем увеличения начальной температуры капель, так и уменьшением температуропроводности. Полученный результат имеет важное прикладное значение. Так, зная концентрацию (массовую долю) и тип примесей в составе жидкости можно рассчитать температуру, до которой необходимо нагреть состав для получения максимальных значений скорости испарения. При фиксированной температуре воды можно прогнозировать концентрацию и тип примесей для получения необходимых характеристик испарения. То есть становится возможным управления характеристиками фазовых превращений жидкости, что, очевидно, является очень важным для широкого круга практических приложений.

По результатам экспериментов (рисунок 29) путем аппроксимации получена обобщенная математическая зависимость для прогнозирования значений массовой скорости испарения капель жидкости в зависимости от ее температуропроводности для трех начальных температур:

$$W_e' = b + c \cdot \exp(d \cdot a'). \quad (13)$$

Коэффициенты полученной аппроксимационной функции (13) приведены в таблице 6. Проведенные эксперименты позволили установить, что скорости испарения капель растворов с примесями при их распылении в высокотемпературной газовой среде главным образом зависят от их теплофизических параметров, а именно температуропроводности. Изменяя такие параметры, как концентрацию и тип примеси, а также температуру жидкости можно достаточно успешно управлять характеристиками испарения последней.

Таблица 6 - Коэффициенты функции  $W_e' = b + c \cdot \exp(d \cdot a')$ 

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

Необходимо отметить, что на скорость фазовых превращений оказывает влияние также характеристики примеси: концентрация и размер частиц (в случае твердых примесей). При наличии в каплях твердых примесей наблюдалось активное поглощение и аккумулялирование энергии продуктов сгорания, и, как следствие, интенсификация нагрева и испарения капель. Это обусловлено меньшим количеством энергии, требуемой для прогрева поверхностного слоя капли суспензии до активного испарения. Также при движении капель с примесями наблюдалась более интенсивная деформация капель по сравнению с каплями воды без примесей. Это приводило к более активному перемешиванию слоев жидкости и росту средней температуры капель. Поскольку размеры твердых примесей в ходе приготовления не могут быть строго одной величины, и наблюдается варьирование размеров последних в определённом диапазоне, то это ведет к еще более интенсивному теплообмену между слоями жидкости.

### 3.3. Влияние схемы нагрева капель растворов, суспензий и эмульсий на скорость их испарения

#### 3.3.1. Экспериментальные стен и методики исследований

При проведении исследований использовались 4 схемы нагрева капель (рисунок 30): в потоке продуктов сгорания при доминировании конвективного теплообмена, в трубчатой муфельной печи при доминировании радиационного теплообмена, на твердой поверхности при доминировании кондуктивного теплообмена, в пламени при доминировании смешанного (конвективного и радиационного) теплообмена.

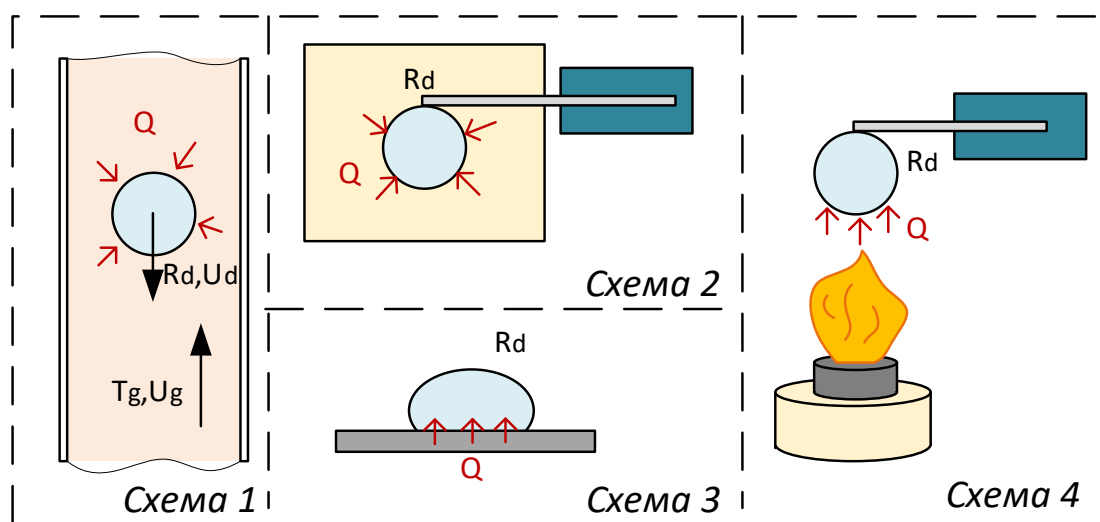


Рисунок 30 - Схемы нагрева капель с доминированием кондуктивного, конвективного, радиационного, также в условиях смешанного теплообмена

В качестве типичных твердых добавок использованы углеродистые (графит) частицы в массовой концентрации 5 %, нерастворимых – отработанное трансформаторное масло в объемной концентрации 2,5 %, растворимых – этиловый спирт (в объемной концентрации 5 %). В таблице 7 приведены теплофизические свойства воды и типичных добавок к ней при различной температуре. Варьирование начальной температуры воды и добавок в диапазоне от 293 до 373 К приводит к существенному изменению теплофизических

свойств. Капля воды в экспериментах генерировалась с использованием электронного дозатора (шаг варьирования объема с шагом 0,1 нл). Начальный размер (радиус) капель варьировался в диапазоне  $R_d=0,7-0,8$  мм.

Таблица 7 - Теплофизические свойства воды и добавок

	Начальная температура, К	Теплофизические свойства			
		Теплопроводность, $\lambda$ , Вт/(м·К)	Удельная теплоемкость, $C$ , кДж/(кг·К)	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Температуропроводность, $a$ , 10 <sup>-6</sup> м <sup>2</sup> /с
Вода Water	293	0,599	4,183	998,2	0,143
	323	0,648	4,181	998	0,155
	373	0,683	4,22	958,4	0,168
Углеродистые (графит) частицы [149]	293	70	0,714	1700	57,67
	323	69	0,857	1750	46
	373	68	0,98	1688	41,1
Этиловый спирт [150]	293	0,18	2,36	790	0,096
	323	0,142	2,65	763	0,07
	373	0,1	3,26	711	0,043
Трансформаторное масло [151]	293	0,11	1,668	863,6	0,076
	323	0,1082	1,845	845	0,069
	373	0,1039	2,145	816	0,059

Схема 1 предусматривала инициирование горения керосина марки ТС-1. Сгенерированные дозатором капли сбрасывались в канал из кварцевого стекла с высокотемпературными продуктами сгорания. Результаты такого исследования крайне важны во многих теплотехнологиях. Например, на ТЭС возможно существенное снижение тепловых потерь с уходящими газами при нагреве распыленной рабочей жидкости. Применимы результаты данного исследования также для развития технологий пожаротушения, в основе которых лежат процессы смешения капельных и высокотемпературных газовых потоков. Для



регистрации размеров капель в процессе движения по кварцевому каналу использовалась высокоскоростная система на базе видеокамеры с частотой съемки до  $6 \cdot 10^5$  кадров в секунду, максимальным разрешением съемки  $1280 \times 1280$  пикселей). Методика регистрации описана в предыдущей главе. Систематические погрешности определения  $R_d$  составили 0,015 мм. Для регистрации температуры продуктов сгорания ( $T_g$ ) в экспериментах применялся измерительный комплекс, состоящий из платы NI 9219 и четырех хромель-алюмелевых (диапазон измеряемых температур – 273–1473 К, систематическая погрешность  $\pm 3$  К) малоинерционных (время теплового запаздывания – менее 0,1 с) термопар. Термопары размещались в четырех точках равномерно по высоте кварцевого канала. Максимальные случайные погрешности измерения  $T_g$  не превышали 15 К.

Для реализации схемы 2 применялась трубчатая муфельная печь (максимальная температура 1473 К, объем камеры 0,004 м<sup>3</sup>). Контроль и установление необходимой температуры нагрева  $T_a$  выполнялись с помощью интегрированных регулятора и термопары типа S (платинородий-платиновая; максимальная рабочая температура 1427 К, показатель тепловой инерции – не более 5 с, предел допускаемых отклонений  $\pm 1$  К). Капля воды с добавками вводилась роботизированным координатным механизмом в камеру до ее центра для обеспечения требуемых температурных условий. Исследования теплообмена капель при такой схеме нагрева важны для развития ряда приложений, в частности, создания новых и усовершенствования существующих теплообменников смешивающего типа, основанных на принципе распыления жидкости в нагретой среде.

Результаты исследования нагрева капель на твердой поверхности (схема 3) применимы при развитии технологии охлаждения теплонагруженных поверхностей оборудования путем подачи спрея. В основе такой технологии охлаждения лежит принцип теплового эффекта фазового перехода (типа «вода-пар»). В экспериментах в качестве твердой поверхности использовалась медная подложка (толщина 4 мм и диаметром 50 мм), нагрев которой осуществлялся при

помощи автоматизированной нагревательной плиты ПЛ-01 (диапазон рабочих температур греющей поверхности 40–400 °С, точность установки температуры  $\pm 1$  °С, материал нагревательной поверхности – дюралюминий с нанокерамическим покрытием). Для определения температуры подложки использовалась платина-платинородиевая термопара (диаметр спая 0.05 мм, инерционность 0.1 s, погрешность  $\pm 1$  °С), закрепленная на поверхности подложки посредством термопасты.

Эксперименты в пламенной зоне при доминировании конвективного и радиационного теплообмена (схема 4) крайне важны в развитии топливных технологий на основе водных суспензий и эмульсий. Прогрев и испарение капель суспензий существенно влияют на эффективность их зажигания и горения и как следствие, на количество выбросов, в частности СО и NO<sub>x</sub>. Также результаты исследования применимы в технологии термической очистки воды выжиганием: распыленные капли воды попадают в факельную зону и испаряются, а содержащиеся в них добавки отделяются. В экспериментах капли нагревались в пламени спиртовой горелки (рисунок 1), температура которой варьировалась изменением высоты нахождения держателя капли от металлического диска спиртовой горелки. Температура на высоте 6 см составляла 673 К, 12 см – 373 К. Измерение значений температуры обеспечивалось посредством термопары типа К (диапазон измеряемых температур от –373 до 1427 К).

Для каждого компонентного состава капле при разной температуре внешней греющей среды (473-773 К) выполнялись не менее 10 экспериментов. Определялся радиус капли в каждый момент времени. Конечной целью каждого эксперимента являлось вычисление массовых скоростей испарения капле ( $W_e$ ) по формуле (9):

$$W_e = \rho_d \frac{R_d - R_d^*}{\Delta t_d},$$

$\rho_d$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $R_d, R_d^*$  – начальное и текущее значение радиуса капли, м;  $\Delta t_d$  – длительность испарения, с.

### 3.3.2. Результаты и обсуждение

На рисунке 31 приведены результаты экспериментально полученных средних (за весь период испарения, который называют временем жизни) скоростей испарения ( $W_e$ ) капель с добавками для четырёх схем их нагрева.

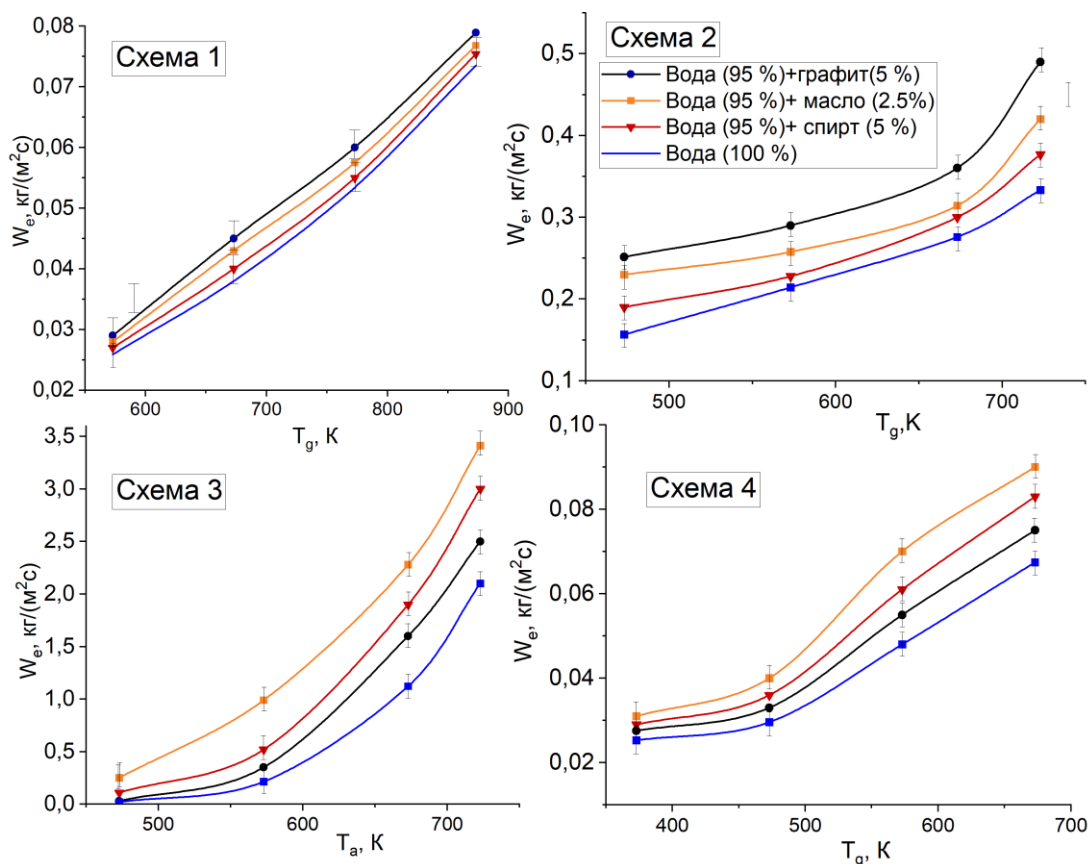


Рисунок 31 - Зависимости скоростей испарения жидкостей ( $R_d=0,8$  мм) от температуры газовой среды и поверхности для четырех схем их нагрева

Установлено, что при нагреве капле в потоке продуктов сгорания (схема 1) сгорания наибольшая скорость испарения характерна для капель воды с твердой добавкой. Аналогичная тенденция выделена и при нагреве капле 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 (рисунок 32). Агломерированные твердые частицы графита активно аккумулируют энергию продуктов сгорания и

радиационного излучения муфельной печи, интенсифицируя прогрев и испарение жидкости. Смешивание воды с нерастворимой добавкой (трансформаторное масло) приводит к большему росту скорости испарения каплей, чем при смешивании с растворимой – спиртом.

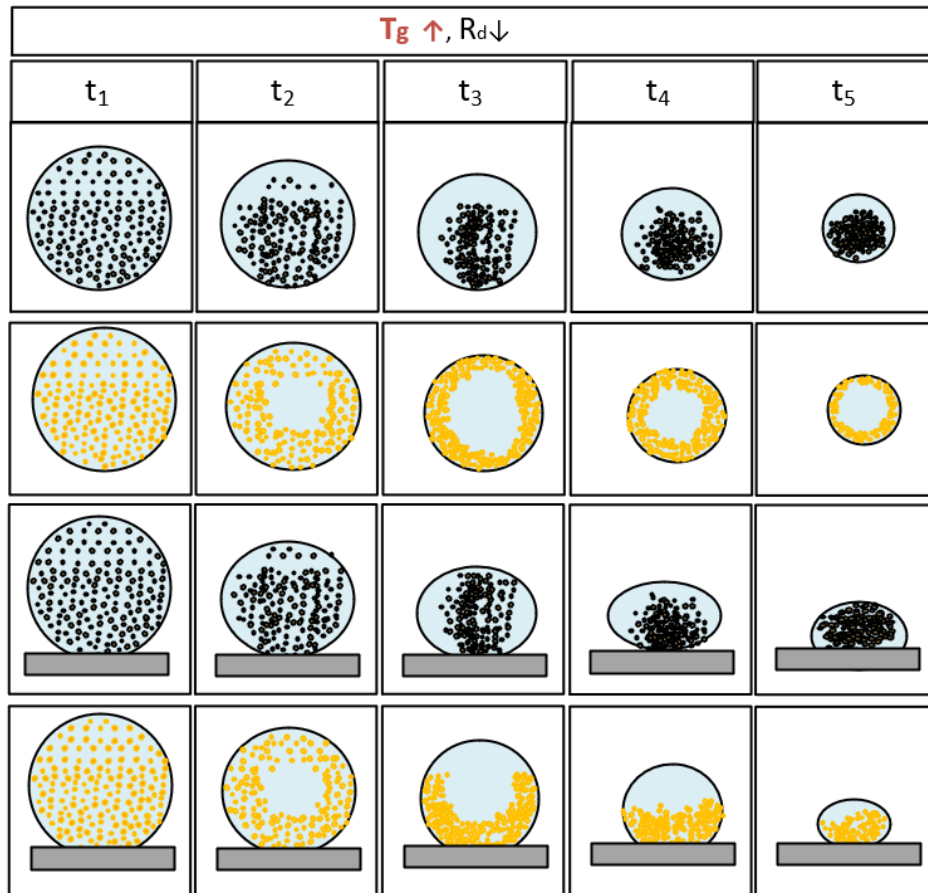


Рисунок 32 - Особенности поведения твердой нерастворимой добавки в каплях при интенсивном нагреве

Для схем 3 и 4 характерен локальный подвод тепла снизу (рисунок 30). Эксперименты показали, что максимальная скорость испарения характерна воде с трансформаторным маслом (2,5 %), которое за счет более высокой вязкости локализуется в нижней части капли (рисунок 32) и имеет максимальную площадь контакта с нагреваемой средой, в частности, с пламенем или нагретой поверхностью. Это приводит к более быстрому нагреву слоя масла и, как следствие, необходимости подвода меньшего количества энергии для прогрева и испарения поверхностного слоя воды.

Представленные выше экспериментальные результаты получены для определённого начального размера ( $R_d=0,8$  мм) каплей и концентрации (2,5-5 %) добавок к ней. Варьирование размера капли или концентрации добавки приведет к существенным изменениям скоростей испарения. Анализ экспериментально полученных данных показал, что интенсификация прогрева и испарения капель происходит, главным образом, в результате изменения теплофизических свойств растворов, суспензий, эмульсий: теплоемкость, плотность, теплопроводность, температуропроводность. Целесообразно, как и в предыдущей главе, обобщить влияние теплофизических свойств с применением температуропроводности.

По результатам экспериментов установлена динамика изменения температуропроводности капли с графитовыми частицами (в массовой концентрации 5%) во времени при разных схемах нагрева (рисунок 33) с учетом уменьшения доли воды.

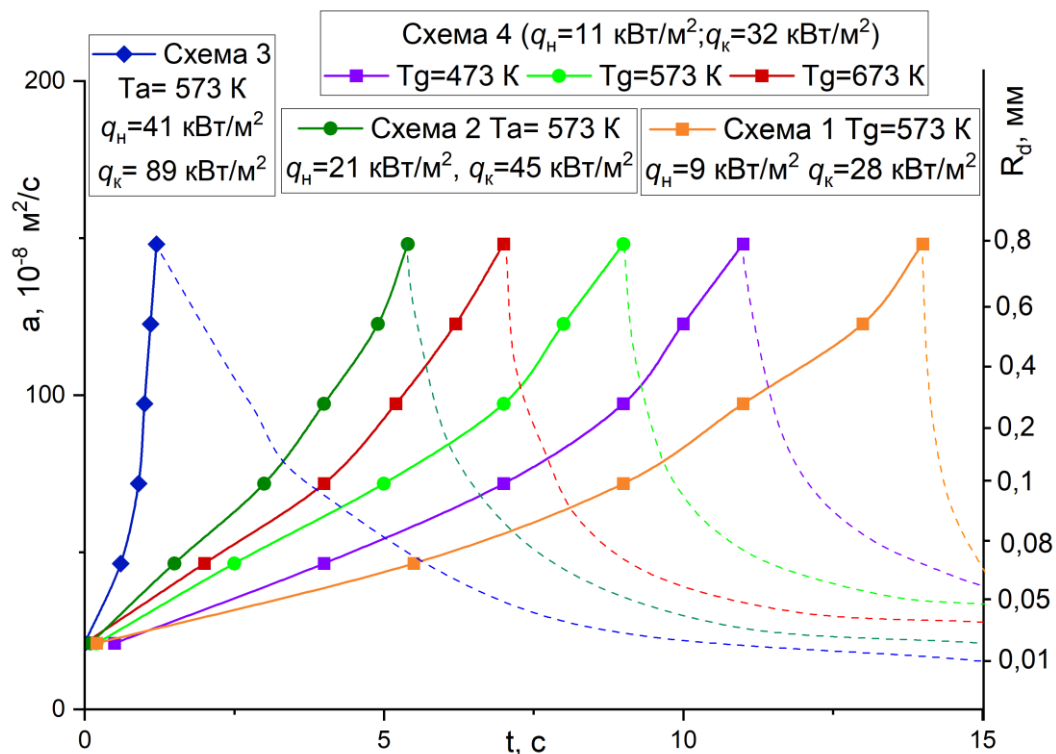


Рисунок 33 - Динамика изменения температуропроводности капли с добавкой графитовых частиц (5 %) в процессе ее прогрева и испарения при разных схемах нагрева

Установлено, что быстрое испарение воды из капли суспензии увеличивает относительную долю графита в ее составе. Это приводит к увеличению теплопроводности капли в несколько раз. Данный рост имеет нелинейный характер вследствие нелинейных связей скоростей фазовых превращений и перемешивания слоев суспензий с подводимыми тепловыми потоками. Расчет плотностей тепловых потоков выполнен с применением выражений:

$$q_{\text{рад}} = \sigma_c \cdot [\varepsilon_d \cdot (T_a^4 - T_s^4) + \varepsilon_a \cdot T_a^4], \quad (14)$$

$$q_{\text{конв}} = h(T_a - T_s), \quad (15)$$

$$q_{\text{конд}} = \lambda_d (T_{\text{sub}} - T_s) / R_d, \quad (16)$$

где  $q_{\text{рад}}$  – радиационный тепловой поток, Вт/м<sup>2</sup>;  $\sigma_c$  – постоянная Стефана-Больцмана, кг·с<sup>-3</sup>·К<sup>-4</sup>;  $\varepsilon_d$  – степень черноты для капли;  $T_a$  – температура воздуха, К;  $T_s$  – температура в приповерхностном слое капли, К;  $\varepsilon_a$  – степень черноты для воздуха;  $q_{\text{конв}}$  – конвективный тепловой поток, Вт/м<sup>2</sup>;  $h$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $q_{\text{конд}}$  – кондуктивный тепловой поток, Вт/м<sup>2</sup>;  $\lambda_d$  – теплопроводность капли, Вт/(м·К);  $T_{\text{sub}}$  – температура разогретой подложки, К;  $R_d$  – радиус капли, мм.

Для каждой схемы нагрева (рисунок 30) суммарный тепловой поток рассчитывался как сумма  $q_{\text{рад}}$ ,  $q_{\text{конв}}$ , и  $q_{\text{конд}}$  с учетом основных входных параметров системы капля/греющая среда для начального ( $q_n$ ) и конечного ( $q_k$ ) момента времени. Использование четырех различных схема нагрева позволило получить значения тепловых потоков в широком диапазоне (до 100 кВт/м<sup>2</sup>). При расчете плотности теплового потока по формуле (14) помимо плотности потока собственного излучения капли ( $\sigma_c \cdot \varepsilon_a \cdot T_a^4$ ) учитывается результирующий лучистый тепловой поток на поверхности капли, ограничивающей газовую среду с температурой  $T_a$ , по формуле Нуссельта ( $\sigma_c \cdot \varepsilon_d \cdot (T_a^4 - T_s^4)$ ).

Вычисления плотностей тепловых потоков проводились при конкретных значениях, иллюстрирующих оптические и теплофизические свойства компонентов системы. В реальной практике данные свойства могут отличаться от использованных в расчете в пределах 10-15 %. Кроме того, значения

плотностей тепловых потоков рассчитаны для начального момента времени, в процессе нагрева эти значения будут меняться в зависимости от изменения температуры капель. Как следствие, количественные значения плотностей тепловых потоков могут отличаться в пределах 20-25 %.

Установлено (рисунок 33), что капля воды на твердой нагретой поверхности достигнет определенного стабильного значения температуропроводности быстрее, чем в опытах при других трех 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 рисунке 34 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 и их начальной температуре 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 ( $W_e^{\max} = 1,5$  кг/(м<sup>2</sup>с),  $a_{\max} = 148 \cdot 10^{-8}$  м<sup>2</sup>/с). Максимальные значения данных параметров покрывают условия, реализующиеся в большинстве промышленных приложений.

Приведенные на рисунке 34 области изменения значений  $W_e$  показывают достаточно узкий диапазон потенциального варьирования скорости испарения. Этот результат очень важен, так как он обосновывает возможность допущения о постоянной скорости испарения жидкости в процессе времени существования капель разных размеров и при различных схемах подвода тепловой энергии. Это допущение более обосновано при снижении значений температуропроводности,

т.е. чем меньше концентрация добавок в воде, тем меньше диапазон изменения  $We_c$ . Также важно отметить, что максимальные скорости испарения капель достигаются при смешанном теплообмене и в потоке продуктов сгорания с доминированием конвективного теплообмена. В данных условиях добавки более существенно влияют на прогрев капель вследствие поглощения подводимого теплового потока и деформации поверхности капель относительно сферических форм.

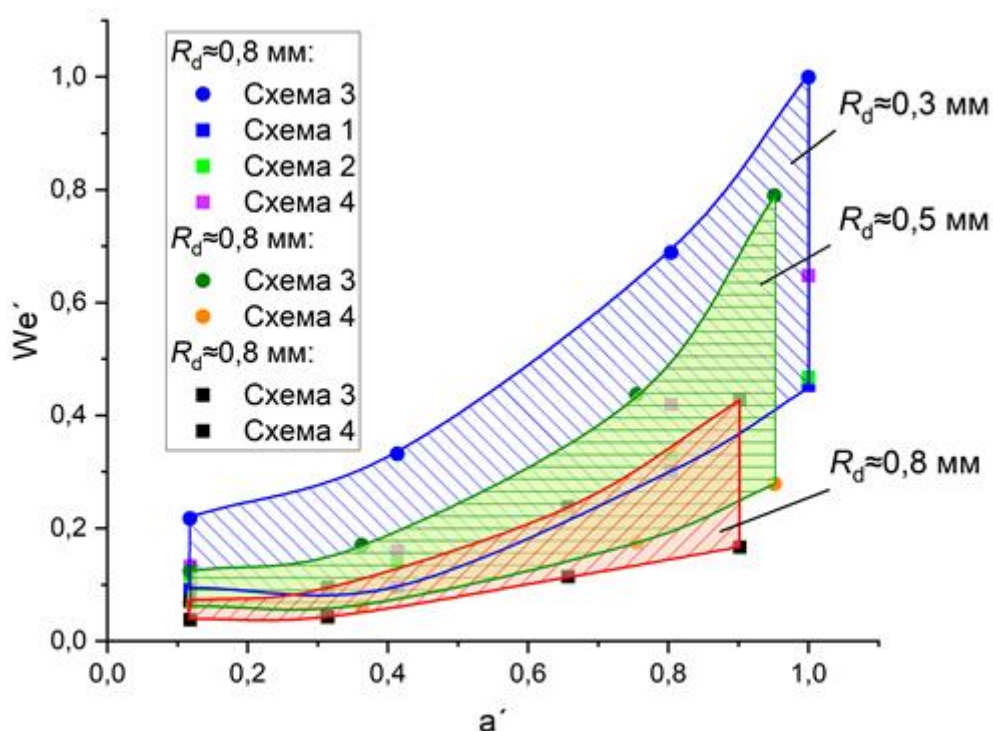


Рисунок 34 - Значения относительных массовых скоростей испарения капель исследованных составов ( $T_g \approx 673$  К) с учетом изменения их относительной теплопроводности для четырех схем нагрева при варьировании начальных размеров капель ( $R_d \approx 0,8$  мм,  $R_d \approx 0,5$  мм,  $R_d \approx 0,3$  мм) при их начальной температуре 293 К

Используя рисунок 34, можно прогнозировать диапазоны изменения  $We_c$  для совокупности приложений, указанных в вводной части статьи. На рисунок 5 показаны области, рассчитанные по экспериментальным данным для разных начальных размеров капель. Для этого выбраны радиусы капель  $R_d \approx 0,8$  мм,



$R_d \approx 0,5$  мм,  $R_d \approx 0,3$  мм. Так как время прогрева и существования капель достаточно ограничено для малых  $R_d$ , то можно в первом приближении использовать указанный подход. Его применение показало, насколько данные области могут трансформироваться при варьировании  $R_d$ , а также в процессе существования капель в высокотемпературной газовой среде.

На рисунке 34 показано, что для четырех исследуемых схем нагрева капель динамика изменения скорости испарения сопоставима. Увеличение теплопроводности капель путем добавления к ней добавок приводит к нелинейному росту скорости испарения. Установлено (рисунок 34), что схема нагрева существенно влияет на скорость испарения при аналогичных значениях начальной температуры и радиуса капель, а также температуры греющей среды. Показано (рисунок 34), что достичь одного и того же значения скорости испарения можно как изменением схемы нагрева, так и величины теплопроводности, в частности, варьированием компонентным составом 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.

Полученные экспериментальные результаты важны для развития технологий, в частности, термической и огневой очистки жидкостей, полидисперсного пожаротушения, сжигания и горения суспензионных топлив, очистки теплонагруженных поверхностей, создания теплоносителей на базе продуктов сгорания.

### 3.4. Влияние концентрации капель воды в аэрозольном облаке на скорости их испарения

#### 3.4.1. Экспериментальный стенд и методики исследования

Схема экспериментального стенда аналогична описанной в п. 3.2.1 (рисунок 27) настоящей диссертации. Стенд оснащен передвижной системой регистрации для измерения концентрации и размеров капель на разных участках движения аэрозоля в вертикальном канале с высокотемпературными газами. Для генерации аэрозольного потока применялась система, состоящая из ёмкости 1 с водой (под давлением  $P=200-300$  кПа), канала подачи жидкости 2 и форсунки 3. Использовались распылительные форсунки, генерирующие различные по дисперсности потоки (радиус капель  $R_d=0,1-0,25$  мм). Аэрозольный поток 4 исследуемой дисперсности попадал в цилиндрический канал 5 (высота – 1 м, внутренний диаметр – 0,2 м) с продуктами сгорания. В основании канала 5, состоящего из жаростойкого (до 2000 К) светопрозрачного материала, устанавливалась подложка 7 (высота – 0,1 м, внутренний и внешний диаметры – 0,15 м и 0,19 м), заполненная по периметру керосином марки ТС-1. Перед проведением каждого опыта топливо в подложке 7 поджигалось, цилиндр заполнялся восходящим потоком продуктов сгорания. Скорость движения потока газов регулировалась за счет изменения внешнего давления с использованием вытяжной системы 14 и составляла в экспериментах около  $U_g \approx 1,5$  м/с. Контроль температуры продуктов сгорания ( $T_g=573-873$  К) осуществлялся по методике термопарных измерений по аналогии с хромель-алюмелевыми термопарами 6 (диапазон измеряемых температур 223-1473 К, систематическая погрешность 2,5 К), установленными на трех высотах (0,25; 0,5 и 0,75 м) относительно основания цилиндрического канала.

Для регистрации размеров капель аэрозоля применялся оптический метод «Shadow Photography» (SP). Для реализации метода SP использовался кросскорреляционный программно-аппаратный комплекс на базе двойного

твердотельного Nd:YAG лазера 8 «Quantel EverGreen 70» (длина волны 532 нм, частота повторения 15 Гц, максимальная энергия в импульсе 72 мДж) и CCD видеокамеры 9 «ImperX IGV-B2020M» (разрешение кадра 2048×2048 пикс., частота съемки до 25 кадр/с, разрядность 8 бит) с установленным макрообъективом «Nikon Micro-Nikkor 200мм f/4D ED-IF A». Nd:YAG лазер 8 посредством оптического световода подключался к рассеивающему диффузному экрану 15. Создавалась фоновая подсветка измерительной области. Выполнялась процедура видеофиксации изображений капель с использованием CCD видеокамеры 9. Полученные данные обрабатывались в программном обеспечении «Actual Flow». На первом этапе выполнялось выделение границ капель программным фильтром «Laplace Edge Detection». Далее выполнялась нейтрализация шумов на изображениях с использованием «Median Filter». На последнем шаге задавался порог бинаризации изображений и с использованием процедуры «Bubbles Identification» определялись радиусы капель ( $R_d$ ), попавших в регистрационную область. Погрешности определения  $R_d$  не превышали 1.5 %. Изображения капель регистрировались как до, так и после прохождения канала с продуктами сгорания. Для каждой капли вычислялось абсолютное уменьшение ее среднего радиуса после прохождения канала с высокотемпературными продуктами сгорания –  $\Delta R$ .

Параллельно с вышеописанными экспериментами выполнялись исследования по определению времени прохождения каплями канала с продуктами сгорания. Применялась система (рисунок1), состоящая из высокоскоростной CMOS видеокамеры 10 «Phantom MIRO M310» (разрешение изображения 1280×800 пикс; скорость съемки – до  $6,5 \cdot 10^5$  пикс.) и светодиодного прожектора 17 «Multiled PT-V9 GS Vitec» (количество светодиодов – 24; световой поток – 7700 Лм; мощность – 84 Вт, угол рассеивания – 30°). Видеокамерой 10 регистрировались капли в области над кварцевым каналом 5 и на выходе из него. По результатам анализа видеозаписей определялся момент вхождения капель в канал с продуктами сгорания ( $t_1$ ), а также их появления на

выходе канала ( $t_2$ ). Вычислялось время прохождения каплями канала  $\Delta t_d = t_2 - t_1$ . Погрешность определения  $\Delta t_d$  не превышала 0.03 с.

При идентичных начальных условиях выполнялись не менее 10 экспериментов. Затем проводилась обработка и сравнение данных, а также определение интегральных характеристик испарения. По результатам каждого эксперимента вычислялось значение массовой скорости испарения по формуле ( ), приведенной в п. настоящей диссертации.

### 3.4.2. Результаты и обсуждение

На рисунках 35 и 36 представлены установленные зависимости скоростей испарения воды от концентрации и начального размера капель.

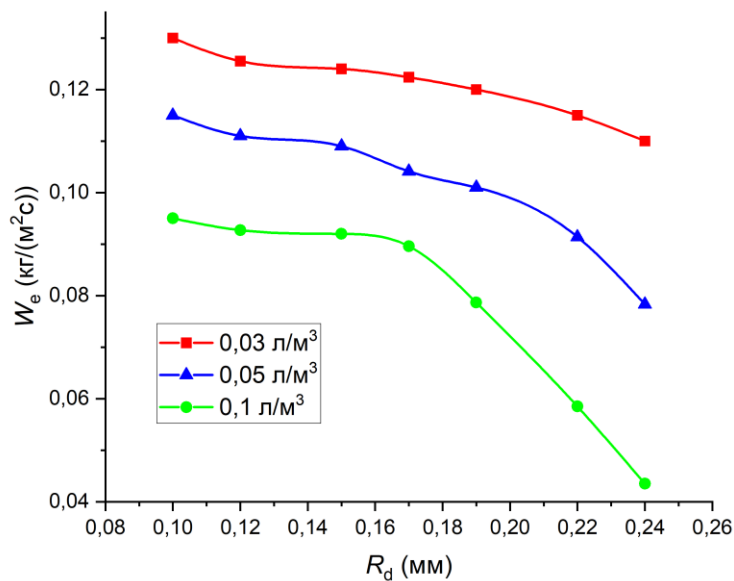


Рисунок 35 – Зависимость значений скоростей испарения капель воды в высокотемпературной газовой среде от их начальных размеров для трех разных концентрации

На рисунке 35 видно, что для всех трех исследуемых концентраций капель (0,03; 0,05 и 0,1 л/м<sup>3</sup>) динамика изменения скорости испарения сопоставима. Для капель в потоке с концентрацией около 0,03 л/м<sup>3</sup> значения массовой скорости

испарения  $W_e$  снижались на 15% с ростом размера капель в диапазоне 0,1–0,24 мм. При концентрации около 0,05 л/м<sup>3</sup> снижение  $W_e$  составило 32%, при 0,1 л/м<sup>3</sup> – 56%. Таким образом, показано, что с ростом начальной концентрации капель в потоке происходит более интенсивное уменьшение  $W_e$ . Но на рисунке 35 также видно, что чем выше концентрация капель аэрозоля, тем ниже значения скорости испарения при равных начальных радиусах капель. 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 капель. Руководствуясь результатами экспериментов (рисунок 35), получена зависимость для прогнозирования скорости испарения капель в составе аэрозольного облака с концентрацией 0,03–0,1 л/м<sup>3</sup> при известном начальном размере капель:

$$W_e = a + b \cdot R_d + c \cdot R_d^2, \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}). \quad (17)$$

По результатам исследований получена совокупность зависимостей скорости испарения от концентрации капель в аэрозольном потоке, представленная на рисунке 36. Эксперименты показали, что для капель размерами 0,1–0,17 мм увеличение их концентрации в потоке от 0,03 до 0,1 л/м<sup>3</sup> приводит к уменьшению значений скорости испарения в диапазоне 24–28%. Для капель  $R_d > 0,15$  мм уменьшение скорости испарения более значительно и составило 33–62%. Скорее всего, такой результат обусловлен усиливающимся влиянием свойств воды. В частности, определяющую роль играют высокая теплоемкость жидкости и теплота парообразования. Чем больше размеры капли, тем выше значение энергии, которую необходимо подвести к ее поверхности для интенсификации прогрева и фазовых превращений. Чем выше температура газовой среды, тем интенсивнее реализуется прогрев и испарение капли. В потоке дымовых газов с изменяющейся температурой важную роль играет фактор протяженности канала и градиенты температуры. От этого существенно зависит подводимый к поверхности капли тепловой поток. Также важен такой

фактор, как полидисперсность потока капель. Крупные капли при испарении создают буферную паровую зону для мелких капель, что снижает скорости прогрева и испарения последних. Это приводит к изменению скоростей движения капель и интенсификации их взаимодействия в режимах коагуляции, дробления, отскока и разлета.

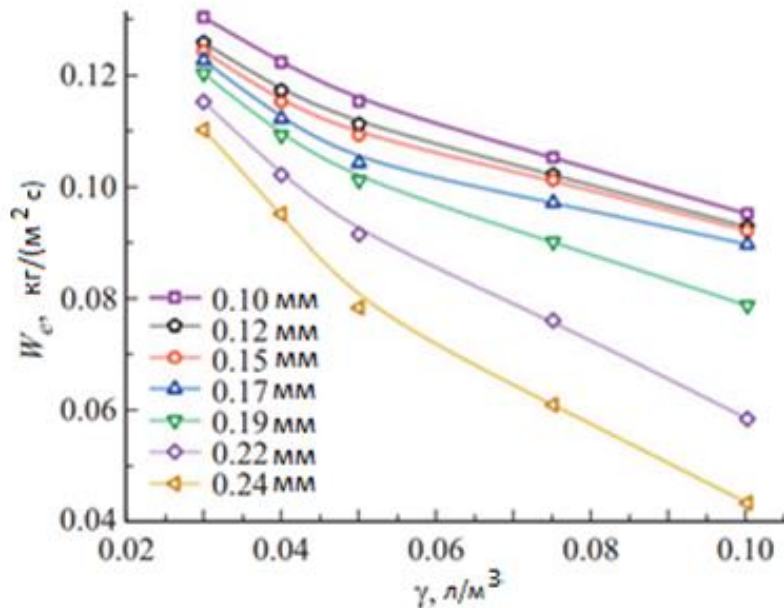


Рисунок 36 – Зависимости скоростей испарения капель от их концентрации для различных начальных размеров капель

В ходе обработки результатов экспериментов (рисунок 35) получена совокупность аппроксимационных выражений (в виде экспоненциальной функции):

$$W_e = \exp(a + b \cdot \gamma + c \cdot \gamma^2), \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}). \quad (18)$$

Коэффициенты для аппроксимационных функций (17) и (18) приведены в таблицах 7 и 8, соответственно (при варьировании параметров капельного потока в диапазоне  $R_d=0,1-0,24$  мм,  $\gamma=0,03-0,1$  л/м³).

Таблица 7 - Коэффициенты функции  $W_e = f(R_d)$  (при  $R_d=0,1-0,24$  мм)

Концентрация капель, л/м <sup>3</sup>	Коэффициенты параболической функции		
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
0,03	0,13002	0,03482	-0,048044
0,05	0,09611	0,34487	-1,71357
0,1	0,03638	0,95543	-3,86257

Таблица 8 - Коэффициенты функции  $W_e = f(\gamma)$  (при  $\gamma=0,03-0,1$  л/м<sup>3</sup>)

Начальный радиус капель, мм	Коэффициенты экспоненциальной функции		
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
0,1	-1,84714	-7,2452	22,23561
0,12	-1,88323	-7,37762	24,84468
0,15	-1,88796	-7,80628	28,96855
0,17	-1,82845	-10,91542	51,62496
0,19	-1,84682	-10,47471	36,10507
0,22	-1,84025	-11,5712	17,54703
0,24	-1,68838	-18,705	44,71094

На практике определение скоростей испарения мелких капель, особенно в аэрозольном потоке, является сложной задачей, требующей специализированного высокоточного оборудования. Поэтому по результатам исследований (рисунки 35, 36) предложен подход к определению скорости испарения капель аэрозоля ( $R_d=0,1-0,25$  мм), предполагающий ее прогнозирование с учетом известных значений скорости испарения одиночной капли. Аппроксимация результатов настоящей работы 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/(м<sup>2</sup>·с). На основании данного заключения получена формула для оценки скорости испарения капель аэрозоля (19) на основе коэффициента  $k$ :

$$W_e = k \cdot (R_d^*/R_d)^2 \cdot W_e^*, \quad (19)$$

$$k = (-0,00496 + 1,66589 \cdot \exp(-24,05801 \cdot \gamma)) \cdot (R_d^*/R_d)^{(-1,65795 + 7,58382 \cdot \gamma)}, \quad (20)$$

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/(м<sup>2</sup>·с).

На рисунке 37 приведена номограмма, иллюстрирующая значения коэффициента  $k$  при соотношении  $R_d^*/R_d = 4–18$  и концентрации капель аэрозоля  $\gamma = 0–0,1$  л/м<sup>3</sup>. Как итог, экспериментально определив скорость испарения ( $W_e^*$ ) крупной одиночной капли ( $R_d^* > 1$  мм), с использованием формул (17) и (18), задаваясь значениями среднего радиуса капель ( $R_d$ ) и их концентрацией ( $\gamma$ ), можно вычислить скорость испарения капель аэрозоля в потоке. Численные оценки показали, что погрешность определения  $W_e$  с использованием такого подхода составила 7–10%. В дальнейшем целесообразным представляется расширение предложенного подхода к определению  $W_e$  на больший диапазон температуры и оценка его правомерности при определении скоростей испарения капель различных многокомпонентных жидкостей.

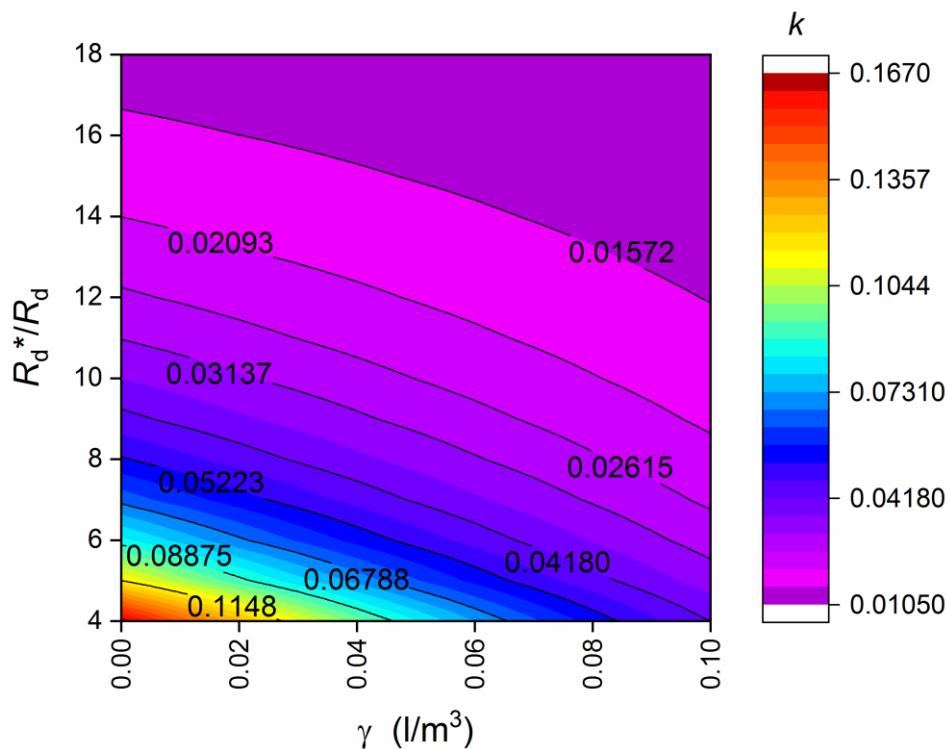


Рисунок 37 - Номограмма, иллюстрирующая значения коэффициента  $k$  при разном соотношении  $R_d^*/R_d$  и концентрации капель в аэрозоле ( $\gamma$ )



Таким образом, проведенные эксперименты показали, что скорости прогрева и испарения капель воды, как элементов аэрозоля, в высокотемпературной газовой среде главным образом зависят от их концентрации и начальных размеров. Полученные по результатам обработки опытов математические выражения  $W_e=f(R_d)$  и  $W_e=f(\gamma)$  и  $W_e=f(W_e^*)$  позволяют выполнять прогнозирование интенсивности испарения аэрозольных облаков по результатам опытов с одиночными каплями.

### 3.5. Выводы по третьей главе

1. Созданы экспериментальные стенды для исследования испарения капель суспензий, эмульсий и растворов высокотемпературном нагреве с применением высокоскоростной регистрирующей аппаратуры и оптических методов диагностики, отличающиеся схемами нагрева капель.

2. Эксперименты на разработанных стендах позволили установить зависимости скоростей испарения капель суспензий, эмульсий и растворов от совокупности основных параметров системы (температуры греющей среды (450–800 К), схемы нагрева (в потоке продуктов сгорания, на разогретой подложке, в муфельной печи, в пламени горелки), теплофизических параметров (плотность, теплоемкость, теплопроводность, температуропроводность); концентрации и типа добавок).

3. Проведена оценка достоверности результатов экспериментальных исследований. Погрешности измерений отражены в виде доверительных интервалов на всех экспериментальных зависимостях. Доверительная вероятность при определении доверительных интервалов составляла 0.95.

4. Установлено влияние типа и концентрации добавки, схемы нагрева и температуры греющей среды на характеристики испарения капель. Определены диапазоны изменения скоростей испарения капель воды с типичными (растворимыми и нерастворимыми) добавками при различных

схемах нагрева с доминированием конвективного, радиационного, кондуктивного и смешанного теплообмена.

5. Обосновано, что капля жидкости с твердой добавкой на твердой нагретой поверхности достигнет определенного стабильного значения температуропроводности быстрее, чем в опытах при других исследованных схемах нагрева. Это обусловлено непосредственным контактом нагретой поверхности с твердыми частицами 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.

6. Установлено, что максимальные скорости испарения капель достигаются при смешанном теплообмене и в потоке продуктов сгорания с доминированием конвективного теплообмена. В данных условиях добавки более существенно влияют на прогрев капель вследствие поглощения подводимого теплового потока и деформации поверхности капель относительно сферичных форм.

7. Определены диапазоны изменения скорости испарения капель суспензий, эмульсий и растворов с учетом отдельного и совместного влияния примесей на совокупность характеристик жидкости: плотность, теплоемкость, теплопроводность, температуропроводность. Получено аппроксимационное выражение, иллюстрирующее в безразмерном виде зависимость скорости испарения капли от температуропроводности:  $W_e' = b + c \cdot \exp(d \cdot a')$ , где  $W_e' = W_e / W_e^{\max}$ ;  $a' = a / a_{\max}$ , где  $W_e^{\max}$  и  $a_{\max}$  – максимальные полученные по результатам экспериментов значения параметров  $W_e$  и  $a$ , соответственно.

8. Установлены диапазоны изменения массовой скорости испарения воды в зависимости от концентрации капель в аэрозольном облаке и их начальных размеров. Получены аппроксимационные выражения для установленных зависимостей.

9. Предложен подход к определению скорости испарения капль аэрозоля с учетом известных значений скорости испарения одиночной капли на основании математического выражения:

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

$$k = (-0,00496 + 1,66589 \cdot \exp(-24,05801 \cdot \gamma)) \cdot (R_d^*/R_d)^{(-1,65795 + 7,58382 \cdot \gamma)},$$

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/(м<sup>2</sup>·с).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертационных исследований и сформулированные по ним выводы состоят в следующем:

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/м<sup>2</sup> в муфельной печи, 9-28 кВт/м<sup>2</sup> в потоке продуктов сгорания, 41-89 кВт/м<sup>2</sup> на разогретой подложке, 41-89 кВт/м<sup>2</sup> 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 отдельного 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 отдельным 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 облака капель жидких топлив, а также технологий термической и огневой очистки жидкостей от загрязняющих их нерегламентированных примесей.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Никитин, Н.М. Использование парогазовой смеси при сжигании топлива / Н.М. Никитин // Промышленная энергетика. – 2010. – № 12. – С. 37–42.
2. Kokalj, J. Modelling and simulating of premixed layer in stratified fuel coolant configuration / J. Kokalj, M. Uršič, M. Leskovar, R. Meignen // *Annals of Nuclear Energy*. – 2023. – Vol. 185. – P. 109740.
3. Zhang, X. Numerical analysis on subcooled boiling in PWR coolant channel based on a modified multi-scale interface model/ X. Zhang, R. Li, M. Peng, T. Cong, C. He, G. Xia, X. Wei // *Applied Thermal Engineering*. – 2023. – Vol. 229. – P. 120598.
4. Priy, A. A hydrophobic porous substrate-based vapor venting technique for mitigating flow boiling instabilities in microchannel heat sink / A. Priy, S. Raj, M. Pathak, M. Kaleem Khan // *Applied Thermal Engineering*. – 2022. Vol. 216. P. 119138.
5. Першин, В.Ф. Переработка сыпучих материалов в машинах барабанного типа / В.Ф. Першин, В.Г. Однолько, С.В. Першина. – М.: Машиностроение, 2009. – 220 с.
6. Исаев, Е.А. Теория управления окомкованием сыпучих материалов / Е.А. Исаев, И.Е. Чернецкая, Л.Н. Крахт. – М.: Старый Оскол: Тонкие наукоемкие технологии, 2014. – 384 с.
7. Lin, Y. Evaporation of heated droplets at different wetting modes: A decoupled study of diffusive and convective effects/ Y. Lin, F. Chu, X. Wu // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2023. – Vol. 207. – P. 123993.
8. Liu, J. Evaporation of vertical and pendant ethanol droplets and internal Marangoni convections/ J. Liu, J. Yu, X. Chen, Z. Pan // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2023. – Vol. 214. – P. 124338.

9. Bochkareva, E. M. Methodological Characteristics of an Experimental Investigation of the Process of Evaporation of Suspended Liquid Droplets / E. M. Bochkareva, M. K. Ley, V. V. Terekhov, V. I. Terekhov // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. – 2019. – Vol. 92. – P. 1171–1179.
10. Вальдберг, А.Ю. Механические форсунки для подвода жидкости в газоочистные аппараты / Вальдберг А.Ю. // *Химическое и нефтегазовое машиностроение*. – 2010. – №. 5. – С. 42–44.
11. Kuznetsov, G.V. How to improve efficiency of using water when extinguishing fires through the explosive breakup of drops in a flame: Laboratory and field tests / G.V. Kuznetsov, M.V. Piskunov, P.A. Strizhak // *International Journal of Thermal Sciences*. – 2017. – Vol. 121. – P. 398-409.
12. Liang, T. A comparative study of ultrafine water mist extinguishing hydrocarbon pool fires with or without potassium salts / T. Liang, X. Bai, D. Zhang, W. Zhong // *Thermal Science and Engineering Progress*. – 2023. – Vol. 39. – P. 101655.
13. Liu, Y. Mechanism insight of shielded methane non-premixed jet flame extinction with water mist: OH-PLIF visualization and quantitative analysis of critical fire extinguishing / Y. Liu, X. Wang, Q. Tang, G. Li, C. Pan, T. Liu, X. Ni, Y. Wu // *Fire Safety Journal*. – 2022. Vol. – 132. – P. 103642.
14. Li, S. Gas-phase transient effects on droplet evaporation and ignition / Y. Liu, X. Wang, Q. Tang, G. Li, C. Pan, T. Liu, X. Ni, Y. Wu // *Combustion and Flame*. – 2023. – Vol. 254. – P. 112840.
15. Yin, J. Experimental investigation on evaporation characteristics of RP-3 aviation kerosene droplet above the critical temperature under various pressure conditions / J. Yin, S.-Y. Chen, D.-Q. Zhu, S.-Q. Xue, S.-Y. Li, Z.-F. Zhou, B. Liu // *Aerospace Science and Technology*. – 2023. – Vol. 140. – P. 108463.

16. Marlina, E. A study of blending carbon nanoparticles made of coconut shell (fullerene C60) in vegetable oils on the droplet evaporation characteristics / E. Marlina, A.F. Alhikami, B. Waluyo, S. Rahima Sahwahita, I.N.G. Wardana // *Fuel*. – 2023. – Vol. 346. – P. 128319.
17. Wang, B. Analysis on roles of thermal radiation to evaporation and combustion of fuel droplets / Wang B., Xuan Y., Han X. // *International Journal of Thermal Sciences*. – 2023. – Vol. 191. – P. 108306.
18. Wang, Z. Experimental study on the ignition and burning characteristics of liquid fuels on hot surfaces / Z. Wang, J. Chen, Y. Yu, D. Kong // *Process Safety and Environmental Protection*. – 2023. – Vol. 176. – P. 725–733.
19. Wu, S.C. Study of super-hydrophilic nanoscale bilayer assembly surface modification and its application to enhance evaporation / S.C. Wu, Z.H. Lin, C.K. Lo // *Thermal Science and Engineering Progress*. – 2022. – Vol. 27. – P. 101133.
20. Wang, J. Investigation of wettability on performance of pulsating heat pipe / J. Wang, J. Xie, X. Liu // *International Journal of Heat and Mass Transfer*– 2020. – Vol. 150. – P. 119354.
21. Urban J.J. Emerging Scientific and Engineering Opportunities within the Water–Energy Nexus / J.J. Urban // *Joule*. – 2017. – Vol. 1. – I. 4. – P. 665–688.
22. Volkov, R.S. Diagnostics of the Presence of Solid Particles in Aqueous Aerosol Droplets by Their Interference Pattern / R.S. Volkov, S.V. Chvanov, D.D. Andriyanov // *Technical Physics Letters*. – 2019. – Vol. 45. – P. 605–608.
23. Antonov, D. V. Explosive disintegration of two–component drops under intense conductive, convective, and radiant heating / D. V. Antonov, M.V. Piskunov, P.A. Strizhak // *Applied Thermal Engineering*. – 2019. – Vol. 152. – P. 409–419.
24. Савельев, А.С. Метод обработки теневых фотографий факела распыла жидкости/ А.С. Савельев // *Вестник Объединенного института высоких температур*. – 2019. – Т. 2. – № 1. – С. 69–74.



25. Созонова, Н.А. Горизонтальные факельные установки ООО «Тюмен–НИИгипрогаз» – решение проблемы нейтрализации промстоков / Н.А. Созонова, А.В. Белобородов // Экспозиция нефть газ. – 2012. – Т. 2. – С. 1–12.
26. Домрачев, Р.А. О причинах загрязнения конденсата при очистке сточных вод гальванического производства методом вакуумного выпаривания / Р.А. Домрачев, Л.П. Фирсова С.В.Ш. // Гальванотехника и обработка поверхности. –2006. – Т. 14.– № 4. – С. 23–26.
27. Тулепбаев, В.Б. Применение вакуумных выпаривателей для очистки сточных вод гальванического производства / В.Б. Тулепбаев // Гальванотехника и обработка поверхности. – 2008. – Т. 16. – № 1. – С. 40–45.
28. Никитин, М.Н. Влияние направленного впрыска воды в теплогенераторе на давление получаемой парогазовой смеси / М.Н. Никитин // Промышленная энергетика. – 2010. – Т. 6. – С. 42–46.
29. Алешин, В.И. Модельное исследование охлаждения изолированной металлической сферы в водных средах (закалка) / В.И. Алешин, Н.А. Долотов, В.С. Анисимов // Журнал технической физики. – 2001. – Т. 71. – № 12. – С. 71–78.
30. Игнатчик, С.Ю. Обеспечение надежности и энергосбережения при расчете сооружений для транспортирования сточных вод / С.Ю. Игнатчик // Водоснабжение и санитарная техника. – 2010. – № 8.– С. 56.
31. Паненко, Н.Н. Энергосбережение при очистке сточных вод населённых мест/ Н.Н. Паненко, А.Ю. Скрябин, К.К. Популиди, А.В. Денисова// Инженерный вестник дона. – 2014. – Т. 29. – № 2. – С. 6.
32. Yin, Z. Responses of combustor surface temperature to flame shape transitions in a turbulent bi-stable swirl flame / Yin Z., Nau P., Meier W // Experimental Thermal and Fluid Science – 2017. – Vol. 82. – P. 50-57.

33. Nau, P. Infrared absorption spectrometer for the determination of temperature and species profiles in an entrained flow gasifier / P. Nau, P. Kutne, G. Eckel, W. Meier, C. Hotz, S. Fleck // *Applied Optics*. – 2017. – Vol. 56. – I.11. – P. 2982.
34. Стрижак, П.А. Численный анализ процесса испарения капли, движущейся в струе воды через высокоскоростные продукты сгорания / П.А. Стрижак // *Пожаровзрывобезопасность*. – 2012. – Т. 9. – С. 17–22.
35. Гуцев, Н.Д. Исследование зависимости времени смачивания лесных горючих материалов от величины поверхностного натяжения растворов смачивателей и пенообразователей / Н.Д. Гуцев, Н.В. Михайлов, Н.А. Грабежева // *Труды Санкт–Петербургского научно–исследовательского института лесного хозяйства*. – 2015. – Т. 3. – С. 31–43.
36. Волков, Р.С. Влияние твердых включений в каплях жидкости на интенсивность парообразования в зоне пламени / Р.С. Волков, М.В. Забелин, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // *Пожаровзрывобезопасность*. – 2014. – Т. 41. – №.18. – С. 53–59.
37. Копылов, Н.П. Повышение эффективности тушения лесных пожаров с использованием добавок к воде / Н.П. Копылов, И.Р. Хасанов А.Е., Кузнецов, Д.В. Федоткин, Е.А. Москвиллин, П.А. Стрижак // *Пожарная безопасность*. – 2015. – Т. 4. – С. 46–50.
38. Корольченко, Д.А. Тушение пламени гидрофобных материалов водными растворами смачивателей / Д.А. Корольченко, А.Ф.Шаварников // *Пожаровзрывобезопасность*. – 2015. – Т. 24. – В. 3. – С. 61–68.
39. Вараксин, А.Ю. Гидрогазодинамика и теплофизика двухфазных потоков: проблемы и достижения / А.Ю. Вараксин // *Теплофизика высоких температур*. – 2013. – Т. 51. – №. 3. – С. 421–455.

40. Volkov, R.S. Experimental investigation of mixtures and foreign inclusions in water droplets influence on integral characteristics of their evaporation during motion through high-temperature gas area / Volkov R.S., Kuznetsov G. V., Strizhak P.A. // *International Journal of Thermal Sciences*. – 2015. – Vol. 88. – P. 193–200.
41. Volkov, R.S. The influence of initial sizes and velocities of water droplets on transfer characteristics at high-temperature gas flow / R.S. Volkov, G. V. Kuznetsov, P.A. Stizhak // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2014. – Vol. 79. – P. 838–845.
42. Barber, J. A review on boiling heat transfer enhancement with nanofluids / J. Barber, D. Brutin, L. Tadriss // *Nanoscale Research Letters*. – 2011. – Vol. 6. – P. 280.
43. Gupta, M. An experimental study of the effects of water mist characteristics on pool fire suppression / M. Gupta, A. Pasi, A. Ray, S.R. Kale // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2013. – Vol. 44. – P. 768–778.
44. Narvaez, J.A. Evaluation of nanofluids as potential novel coolant for aircraft applications: The case of de-ionized water-based alumina nanofluids / J.A. Narvaez, A.R. Veydt // *Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2014. – Vol. 136. – № 5. – P. 051702.
45. Fang, Q.X., Thermal conductivity enhancement of ethylene glycol-based suspensions in the presence of silver nanoparticles of various shapes / Q. X. Fang, K.F.C. Ding, L.W. Fan, Z.T. Yu, X. Xu, G.H. Cheng, Y.C. Hu // *Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2014. – Vol. 136. – № 3. – P. 034501.
46. Wu, W. Jet impingement heat transfer using air-laden nanoparticles with encapsulated phase change materials / W. Wu, H. Bostanci, L.C. Chow, J.P.K. S.J. Ding, M. Su // *Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2013. – Vol. 135. – № 5. – P. 052202.

47. Kerimbekova, S.A. Identification of slurry fuel components in a spray flow/ S.A. Kerimbekova, G.V. Kuznetsov, R.S. Volkov, P.A. Strizhak // *Fuel*. – 2022. – Vol. 323. – P. 124353.
48. Yahya, M. Dependence structure between the international crude oil market and the European markets of biodiesel and rapeseed oil/ M. Yahya, A. Dutta, E. Bouri, C. Wadström, G.S. Uddin // *Renewable Energy*. – 2022. – Vol. 197. – P. 594–605.
49. Krstić, J.B. Biodiesel production from rapeseed oil over calcined waste filter cake from sugar beet processing / J.B. Krstić, Z.B. Nježić, M.D. Kostić, B.D. Marić, O.D. Šimurina, O.S. Stamenković, V.B. Veljković // *Process Safety and Environmental Protection*. – 2022. – Vol. 168. – P. 463–473.
50. Kuznetsov, G.V. Composite Liquid Biofuels for Power Plants and Engines: Re-view / G.V. Kuznetsov, V.V. Dorokhov, K.Y. Vershinina, S.A. Kerimbekova, D.S. Romanov, K. Kartashova // *Energies*. – 2023. – Vol. 1. – № 16. – P. 5939.
51. Zhukov, V.E. Dynamics of interphase surface of self-sustaining evaporation front in liquid with additives of nanosized particles / V.E. Zhukov, A.N. Pavlenko, M.I. Moiseev, D. V. Kuznetsov // *Heat and Mass Transfer and Physical Gasdynamics*. – 2017. – Vol. 55. – P. 79–86.
52. Sazhin, S.S. Order reduction in models of spray ignition and combustion / S.S. Sazhin, E. Shchepakina, V. Sobolev // *Combustion and Flame*. – 2018. – Vol. 187. – P. 122–128.
53. Tarlet, D. The balance between surface and kinetic energies within an optimal micro-explosion / D. Tarlet, C. Allouis, J. Bellettre // *International Journal of Thermal Sciences*. – 2016. – Vol. 107. – P. 179–183.
54. Warncke, K. Experimental and numerical investigation of the primary breakup of an airblasted liquid sheet/ K. Warncke, S. Gepperth, B. Sauer, A. Sadiki, J.

Janicka, R. Koch, H.J. Bauer // *International Journal of Multiphase Flow*. – 2017. Vol. 91. – P. 208–224.

55. Strizhak, P.A. Evaporation, boiling and explosive breakup of oil–water emulsion drops under intense radiant heating / P.A. Strizhak, M. V. Piskunov, R.S. Volkov, J.C. Legros // *Chemical Engineering Research and Design*. – 2017. – Vol. 127. – P. 72–80.

56. Vysokomornaya, O.V. Breakup of heterogeneous water drop immersed in high–temperature air / O. V Vysokomornaya, M. V Piskunov, P.A. Strizhak // *Applied Thermal Engineering*. – 2017. – Vol. 127. – P. 1340–1345.

57. Piskunov, M.V. Using Planar Laser Induced Fluorescence to explain the mechanism of heterogeneous water droplet boiling and explosive breakup / M. V. Piskunov, P.A. Strizhak // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2018. – Vol. 91. – P. 106–116.

58. Tanimoto, D. Numerical simulation of secondary atomization of an emulsion fuel droplet due to puffing: Dynamics of wall interaction of a sessile droplet and comparison with a free droplet / D. Tanimoto, J. Shinjo // *Fuel*. – 2019. – Vol. 252. – P. 475–487.

59. Bąk, A. Interfacial and surface tensions of toluene/water and air/water systems with nonionic surfactants Tween 20 and Tween 80 / A. Bąk, W. Podgórska // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2016. – Vol. 504. – P. 414–425.

60. Bąk, A. Investigation of drop breakage and coalescence in the liquid–liquid system with nonionic surfactants Tween 20 and Tween 80 / A. Bąk, W. Podgórska // *Chemical Engineering Science*. – 2012. – Vol. 74. – P. 181–191.

61. Finotello, G. The dynamics of milk droplet–droplet collisions / G. Finotello, R.F. Kooiman, J.T. Padding, K.A. Buist, A. Jongsma, F. Innings, J.A.M. Kuipers // *Experiments in Fluids*. – 2017. – Vol. 59. – № 1. – P. 17.

62. Strizhak, P.A. Influence of droplet distribution in a “water slug” on the temperature and concentration of combustion products in its wake / P.A. Strizhak, G.V. Kuznetsov, M.V. Piskunov // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. – 2016. – Vol. 92. – P. 360–369.
63. Strizhak, P.A. Effect of the volume concentration of a set of water droplets moving through high-temperature gases on the temperature in the wake / P.A. Strizhak, G.V. Kuznetsov // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. – 2015. – Vol. 5. – № 4. – P. 558–568.
64. Sazhin, S.S. Modelling of fuel droplet heating and evaporation: Recent results and unsolved problems / S.S. Sazhin // *Fuel*. – 2017. – Vol. 196. – P. 69–101.
65. Sazhin, S.S. *Droplets and Sprays* / S.S. Sazhin. Springer. London, 2014. – 345 p.
66. Porowska, A. Predicting the surface composition of a spray-dried particle by modelling component reorganization in a drying droplet / A. Porowska, M. Dosta, L. Fries, A. Gianfrancesco, S. Heinrich, S. Palzer // *Chemical Engineering Research and Design*. – 2016. – Vol. 110. – P. 131–140.
67. Sazhin, S.S. A new model for a drying droplet / S.S. Sazhin, O. Rybdylova, A.S. Pannala, S. Somavarapu, S.K. Zaripov // *International Journal of Heat and Mass Transfer*– 2018. – Vol. 122. – P. 451–458.
68. Yaws, C.L. *Thermophysical Properties of Chemicals and Hydrocarbons* / C.L. Yaws// Second Edition, 2014. – 800 p.
69. Strizhak, P.A. Heating and evaporation of suspended water droplets: Experimental studies and modelling / P.A. Strizhak, R.S. Volkov, G. Castanet, F. Lemoine, O. Rybdylova, S.S. Sazhin // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2018. – Vol. 127. – P. 92–106.

70. Fisenko, S.P. Heat and mass transfer and condensation interference in a laminar flow diffusion chamber / S.P. Fisenko, A.A. Brin // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2006. – Vol. 49. – № 5–6. – P. 1004–1014.
71. Snegirev, A.Y. Transient temperature gradient in a single–component vaporizing droplet / A.Y. Snegirev // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2013. Vol. 65. – P. 80–94.
72. Vysokomornaya, O.V. Evaporation of Water Droplets in a High–Temperature Gaseous Medium / O.V. Vysokomornaya, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. – 2016. – Vol. 89. – P. 141–151.
73. Goodger, E.M. *Gas Turbines II: Some Fundamentals of Combustion*. D. B. Spalding / E.M. Goodger. - Butterworths Scientific Publications Ltd, 1955. – 249 p.
74. Fuchs, N.A. *Evaporation and Droplet Growth in Gaseous Media* / N.A. Fuchs, J.N. Pratt, R.H. Sabersky. – Elsevier Ltd., 1960.
75. Ranz, W.E. Evaporation from drops – Part II / W.E. Ranz, W.R. Marshall Jr // *Chemical Engineering Progress*. – 1952. – Vol. 48. – P. 173–180.
76. Tarlet, D. Comparison between unique and coalesced water drops in micro–explosions scanned by differential calorimetry / D. Tarlet, C. Josset, J. Bellettre // *International Journal of Heat and Mass Transfer*– 2016. – Vol. 95. – P. 689–692.
77. Watanabe, H. The characteristics of puffing of the carbonated emulsified fuel / H. Watanabe, T. Harada, Y. Matsushita, H. Aoki, T. Miura // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2009. – Vol. 52. – P. 3676–3684.
78. Keane, R.D. Theory of cross–correlation analysis of PIV images / R.D. Keane, R.J. Adrian // *Applied Scientific Research*. – 1992. – Vol. 49. – P. 191–215.
79. Abram, C. High–speed planar thermometry and velocimetry using thermo–graphic phosphor particles / C. Abram, B. Fond, A.L. Heyes // *Applied Physics B*. – 2013. – Vol. 111. – P. 155–160.

80. Volkov, R.S. Experimental investigation of consecutive water droplets falling down through high-temperature gas zone / R.S. Volkov, G.V. Kuznetsov, J.C. Legros, P.A. Strizhak // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2016. – Vol. 95. – P. 184–197.

81. Волков, Р.С. Влияние твердых включений в каплях жидкости на характеристики их испарения при движении через высокотемпературную газовую среду / Р.С. Волков, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // *Журнал технической физики*. – 2014. – Т. 84. – №12. – С. 33–37.

82. Solangi, K.H. A comprehensive review of thermo-physical properties and convective heat transfer to nanofluids / K.H. Solangi, S.N. Kazi, M.R. Luhur, A. Badarudin, A. Amiri, R. Sadri, M.N.M. Zubir, S. Gharekhani, K.H. Teng // *Energy*. – 2015. – Vol. 89. – P. 1065–1086.

83. Фокин, Б.С. Критический тепловой поток при кипении водной дисперсии наночастиц / Б.С. Фокин, М.Я. Беленький, В.И. Альмяшев, В.Б. Хабенский, О.В. Альмяшева, В.В. Гусаров // *Письма в журнал технической физики*. – 2009. – Т. 10. – № 35. – С. 1–5.

84. Анохина, Е.В. Исследование процессов испарения и кипения жидкостей / Е.В. Анохина // *Журнал технической физики*. – 2010. – Т. 80. – № 8. – С. 32–37.

85. Анохина, Е.В. Экспериментальное исследование критической тепловой нагрузки при кипении бинарных смесей жидкостей / Е.В. Анохина // *Журнал технической физики*. – 2009. – Т. 79. – № 4. – С. 153–155.

86. Jeong, Y.H. Wettability of heated surfaces under pool boiling using surfactant solutions and nano-fluids / Y.H. Jeong, W.J. Chang, S.H. Chang // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2008. – Vol. 51. – P. 3025–3031.



87. Kulkarni, A.P. Impact dynamics and morphology of urea–water–solution droplets impinging on a hot plate under urea–SCR relevant conditions: Influence of surface tension / A.P. Kulkarni, T. Megaritis, L.C. Ganippa // *Fuel*. – 2021. – Vol. 298.
88. Berenson, P.J. Film Boiling Heat Transfer from a Horizontal Surface / P.J. Berenson *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 1961. – Vol. 83. – P. 351–356.
89. Huang, C.K. The effects of dissolved salt on the Leidenfrost transition / C.K. Huang, V.P. Carey // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2007. – Vol. 50. – P. 269–282.
90. Kim, S.J. Surface wettability change during pool boiling of nanofluids and its effect on critical heat flux / S.J. Kim, I.C. Bang, J. Buongiorno, L.W. Hu // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2007. – Vol. 50. – P. 4105–4116.
91. Gerken, W.J. Nanofluid pendant droplet evaporation: Experiments and modeling // W.J. Gerken, A. V. Thomas, N. Koratkar, M.A. Oehlschlaeger // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2014. – Vol. 74. – P. 263–268.
92. Kim, H. Enhancement of critical heat flux in nucleate boiling of nanofluids: a state-of-art review / H. Kim // *Nanoscale Research Letters*. – 2011. – Vol. 6. – P. 415.
93. Abu–Nada, E. Application of nanofluids for heat transfer enhancement of separated flows encountered in a backward facing step / E. Abu–Nada // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. – 2008. – Vol. 29. – P. 242–249.
94. Kathiravan, R. Preparation and pool boiling characteristics of copper nanofluids over a flat plate heater / R. Kathiravan, R. Kumar, A. Gupta, R. Chandra // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2010. – Vol. 53. – № 9–10. – P. 1673–1681.
95. Евдокимов, А.Н. Наножидкости для охлаждения высокофорсированных теплоэнергетических установок / А.Н. Евдокимов, А.М.

Жуков А.В.Ж., Н.Г. Савинский // История и перспективы развития транспорта на севере России. – 2014. – Т. 1. – С. 105–109.

96. Волков, Р.С. Численная оценка оптимальных размеров капель воды в условиях ее распыления средствами пожаротушения в помещениях / П.А. Стрижк, Р.С. Волков, Г.В. Кузнецов // Пожаровзрывобезопасность. – 2012. – Т. 5. – С. 74–78.

97. Глушков, Д.О. Численное исследование тепломассопереноса при движении «тандема» капель воды в высокотемпературной газовой среде / Д.О. Глушков, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // Тепловые процессы в технике. – 2012. – Т. 22. – № 7. – С. 11–21.

98. Vysokomornaya, O.V. Heat and mass transfer in the process of movement of water drops in a high-temperature gas medium / O.V. Vysokomornaya, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2013. – Vol. 86.– P. 62–68.

99. Волков, Р.С. Численное исследование условий взаимодействия диспергированного флегматизатора горения с высокотемпературными продуктами сгорания / Р.С. Волков, О.В. Высокоморная, П.А. Стрижак // Безопасность труда в промышленности. – 2012. – Т. 86. – С. 62–68.

100. Жданова, А.О. Влияние распределения капель воды в «водяном снаряде» на температуру в его следе / А.О. Жданова, Г.В. Кузнецов П.А. Стрижак // Пожаровзрывобезопасность. – 2013. – В. 2. – С. 9–17.

101. Высокоморная, О.В. Численное исследование влияния условий распыления воды на температуру в следе «водяного снаряда» / О.В. Высокоморная, А.О. Марков, М.Н. Назаров, П.А. Стрижак, С.Р. Янов // Известия томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322. – № 4. – С. 24–31.

102. Волков, Р.С. Экспериментальное исследование влияния скоростей движения и размеров капель жидкостей на характеристики их деформации в

воздухе / Р.С. Волков, О.В. Высокоморная, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // Журнал технической физики. – 2015. – В. 85. – № 10. – С. 29–33.

103. Brin', A. A. Growth and motion of heterogeneous water droplets in laminar flow diffusion chambers / A. A. Brin', S. P. Fisenko // Colloid Journal. – 2007. – Vol. 69. – P. 679–684.

104. Кузнецов, Г.В. Испарение капель воды при движении через высокотемпературные газы / Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // Инженерно-физический журнал. – 2018. – Т. 91.– № 1. – С. 104–111.

105. Высокоморная, О.В. Испарение капель суспензий на основе воды с грунтовыми примесями в области высокотемпературных продуктов сгорания / О.В. Высокоморная, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак, А.А. Щербинина // Теоретические основы химической технологии. – 2017. – В. 4. – С. 455–462.

106. Волков, Р.С. Экспериментальное исследование влияния начальной температуры воды и содержания в ней примесей солей на интенсивность испарения в зоне пламени при подаче в виде крупных монолитных капель и тонкораспыленной струи / Р.С. Волков, Г.В. Кузнецов П.А. Стрижак // Пожарная безопасность. – 2014. – В. 2. – С. 93–98.

107. Volkov, R.S. Water Droplet With Carbon Particles Moving Through High Temperature Gases / R.S. Volkov, G.V. Kuznetsov, M.V. Piskunov P.A., Strizhak // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2016. – Vol. 138. – № 1. – P. 014502.

108. Казаков, М.В. Применение поверхностно-активных добавок для тушения пожаров /М.В. Казаков. - М.: Стройиздат, 1977. – 80 с.

109. Хорошавин, Л.Б. Торфяные пожары и способы их тушения / Л.Б. Хорошавин, О.А. Медведев, В.А. Беляков, О.В. Беззапонная // Пожаровзрывобезопасность. – 2012. – Т. 21. – № 11. – С. 85–89.

110. Стрижак, П.А. Влияние распределения капель в «водяном снаряде» на температуру и концентрацию продуктов сгорания в его следе / П.А. Стрижак // Инженерно–физический журнал. – 2013. – Т. 86. – № 4. – С. 839–848.

111. Стрижак, П.А. Численный анализ диффузионно–конвективных процессов тепломассопереноса при движении капель воды через высокотемпературные продукты сгорания / П.А. Стрижак // Пожаровзрывобезопасность. – 2013. –Т. 22. – № 7. – С. 11–21.

112. Волков, Р.С. Экспериментальное исследование изменения массы капель воды при их движении через высокотемпературные продукты сгорания / Р.С. Волков, О.В. Высокоморная, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // Инженерно–физический журнал. – 2013. – Т. 86. – № 6. – С. 1327–1332.

113. Wighus, R. Water mist fire suppression technology – status and gaps in knowledge / R. Wighus // Proceedings of the International Water Mist Conference. – 2001. – P. 1–26.

114. Karpov, A.I. Numerical modeling of the effect of fine water mist on the small scale flame spreading over solid combustibles / A.I. Karpov, V.B. Novozhilov, A.A. Galat, V.K. Bulgakov // Fire Safety Science. – 2005. Vol. 27. P. 763–764.

115. Волков, Р.С. О некоторых физических закономерностях испарения распыленной воды при движении через высокотемпературные продукты сгорания / Р.С. Волков, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – В. 323. – № 2. – С. 201–207.

116. Suzuki, Y. Visualization of aggregation process of dispersed water droplets and the effect of aggregation on secondary atomization of emulsified fuel droplets / Y. Suzuki, T. Harada, H. Watanabe, M. Shoji, Y. Matsushita, H. Aoki, T. Miura // Proceedings of the Combustion Institute. – 2011. – Vol. 33. –№ 2. – P. 2063–2070.

117. Kuznetsov, G. V. Unsteady temperature fields of evaporating water droplets exposed to conductive, convective and radiative heating / G. V. Kuznetsov, M. V. Piskunov, R.S. Volkov, P.A. Strizhak // *Applied Thermal Engineering*. – 2018. – Vol. 131 – P. 340–355.

118. Vershinina, K.Y. The ignition parameters of the coal–water slurry droplets at the different methods of injection into the hot oxidant flow / K.Y. Vershinina, R.I. Egorov, P.A. Strizhak // *Applied Thermal Engineering*. – 2016. – Vol. 107– P. 10–20.

119. Misyura, S.Y. Evaporation of a sessile water drop and a drop of aqueous salt solution / S.Y. Misyura // *Scientific Reports*. – 2017. – Vol.7. – 14759.

120. Misyura, S.Y. Evaporation and heat and mass transfer of a sessile drop of aqueous salt solution on heated wall / S.Y. Misyura // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2018.– Vol. 116. – P. 667–674.

121. Misyura, S.Y. Non–isothermal evaporation in a sessile droplet of water–salt solution / S.Y. Misyura // *International Journal of Thermal Sciences*. – 2018. – Vol. 124. – P. 67–84.

122. Volkov, R.S. Movement and evaporation of water droplets under conditions typical for heat–exchange chambers of contact water heaters / R.S. Volkov, G. V. Kuznetsov, P.A. Strizhak // *Thermal Engineering*. – 2016. — Vol. 63. – P. 666–673.

123. Ильин, А.К. О дисперсном составе топливных эмульсий / А.К. Ильин, Р.А. Ильин, Т.Р. Горбанов // *Проблемы энергетики*. – 2012. – В. 11. – С. 33–40.

124. Dai, S. Coal as a promising source of critical elements: Progress and future prospects / S. Dai, R.B. Finkelman // *International Journal of Coal Geology*. – 2018. – Vol. 186. – P. 155–164.

125. Munawer, M.E. Human health and environmental impacts of coal combustion and post-combustion wastes / M.E. Munawer // *Journal of Sustainable Mining*. – 2018. – Vol. 17. – P. 87–96.

126. Xue, Y. Temporal trends and spatial variation characteristics of primary air pollutants emissions from coal-fired industrial boilers in Beijing, China / Y. Xue, H. Tian, J. Yan, Z. Zhou, J. Wang, L. Nie, T. Pan, J. Zhou, S. Hua, Y. Wang, X. Wu // *Environmental Pollution*. – 2016. – Vol. 213. – P. 717–726.

127. Dudley, B. BP statistical review of world energy 2019 / B. Dudley // London: UK. –. 2019. – 61 p.

128. Loureiro, L.M.E.F. Dispersion and flow properties of charcoal oil slurries (ChOS) as potential renewable industrial liquid fuels / L.M.E.F. Loureiro, P.B.F. Gil, F. V. Vieira de Campos, L.J.R. Nunes, J.M.F. Ferreira // *Journal of the Energy Institute*. – 2018. – Vol. 91. – P. 978–983.

129. Farfan, J. Structural changes of global power generation capacity towards sustainability and the risk of stranded investments supported by a sustainability indicator / J. Farfan, C. Breyer // *Journal of Cleaner Production*. – 2017. – Vol. 141. – P. 370–384.

130. Dmitrienko, M.A. Coal-water slurries containing petrochemicals to solve problems of air pollution by coal thermal power stations and boiler plants: An introductory review / M.A. Dmitrienko, P.A. Strizhak // *Science of The Total Environment*. – 2018. – Vol. 613–614. – P. 1117–1129.

131. Yi, S. The influence of water content in rice husk bio-oil on the rheological properties of coal bio-oil slurries / S. Yi, L. Hao, S. Li, W. Song // *Energy*. – 2019. – Vol. 189. – P. 116307.

132. Chen, R. Preparation and rheology of biochar, lignite char and coal slurry fuels / R. Chen, M. Wilson, Y.K. Leong, P. Bryant, H. Yang, D.K. Zhang // *Fuel*. – 2011. – Vol. 90. – P. 1689–1695.

133. Pulido, J.E. Rheology of colombian coal–water slurry fuels: Effect of particle–size distribution / J.E. Pulido, C.P. Rojas, G. Acero, M. Durán, M. Orozco // *Coal Science and Technology*. – 1995. – Vol. 24. – P. 1585–1588.

134. Vershinina, K.Y. Sawdust as ignition intensifier of coal water slurries containing petrochemicals / K.Y. Vershinina, G. V. Kuznetsov, P.A. Strizhak // *Energy*. – 2017. – Vol. 140. – P. 69–77.

135. Nikitin, A.D. Anthropogenic emissions from the combustion of composite coal–based fuels / A.D. Nikitin, G.S. Nyashina, A.F. Ryzhkov, P.A. Strizhak // *Science of The Total Environment*. – 2021. – Vol. 772. – P. 144909.

136. Hoang, A.T. Combustion behavior, performance and emission characteristics of diesel engine fuelled with biodiesel containing cerium oxide nanoparticles: A review / A.T. Hoang // *Fuel Processing Technology*. – 2021. – Vol. 218. – P. 106840.

137. Antonov, D. V. Puffing/micro–explosion in rapeseed oil/water droplets: The effects of coal micro–particles in water / D. V. Antonov, P.A. Strizhak, R.M. Fedorenko, Z. Nissar, S.S. Sazhin // *Fuel*. – 2021. – Vol. 289. – P. 119814.

138. Sazhin, S.S. A new approach to modelling micro–explosions in composite droplets / S.S. Sazhin, T. Bar–Kohany, Z. Nissar, D. Antonov, P.A. Strizhak, O.D. Rybdylova // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2020. – Vol. 161. – P. 120238.

139. Yi, P. Transcritical evaporation and micro–explosion of ethanol–diesel droplets under diesel engine–like conditions / P. Yi, T. Li, Y. Fu, S. Xie // *Fuel*. – 2021. – Vol. 284. – P. 118892.

140. Kuznetsov, G. V. Differences in ignition and combustion characteristics of waste–derived oil–water emulsions and coal–water slurries containing petrochemicals / G. V. Kuznetsov, K.Y. Vershinina, T.R. Valiullin, P.A. Strizhak // *Fuel Processing Technology*. – 2018. – Vol. 179. – P. 407–421.

141. Daood S.S. Fuel additive technology – NO<sub>x</sub> reduction, combustion efficiency and fly ash improvement for coal fired power stations / S.S. Daood, G. Ord, T. Wilkinson, W. Nimmo // *Fuel*. – 2014. – Vol. 134. – P. 293–306.

142. Nyashina, G.S. Effects of plant additives on the concentration of sulfur and nitrogen oxides in the combustion products of coal–water slurries containing petrochemicals / G.S. Nyashina, G. V. Kuznetsov, P.A. Strizhak // *Environmental Pollution*. – 2020. – Vol. 258. – P. 113682.

143. Akhmetshin, M.R. Comparative analysis of factors affecting differences in the concentrations of gaseous anthropogenic emissions from coal and slurry fuel combustion / M.R. Akhmetshin, G.S. Nyashina, P.A. Strizhak // *Fuel*. – 2020. – Vol. 270. – P. 117581.

144. Johansson, A.C. Particle formation during suspension combustion of different biomass powders and their fast pyrolysis bio–oils and biochars / A.C. Johansson, R. Molinder, T. Vikström, H. Wiinikka // *Fuel Processing Technology*. – 2021. – Vol. 218. – P. 106868.

145. Zhao, Y. Experimental investigation on spray characteristics of aircraft kerosene with an external–mixing atomizer / Y. Zhao, X. He, M. Li, K. Yao // *Fuel Processing Technology*. – 2020. – Vol. 209. – P. 106531.

146. Anufriev, I.S. Diesel fuel combustion by spraying in a superheated steam jet / I.S. Anufriev, E.P. Kopyev // *Fuel Processing Technology*. – 2019. – Vol. 192. – P. 154–169.

147. Kuznetsov, G.V. Atomization behavior of composite liquid fuels based on typical coal processing wastes / G. V. Kuznetsov, P.A. Strizhak, T.R. Valiullin, R.S. Volkov // *Fuel Processing Technology*. – 2022. – Vol. 225. – P. 107037.

148. Rabinovich, S.G. Measurement errors and uncertainties: Theory and practice / S.G. Rabinovich // *Measurement Errors and Uncertainties: Theory and Practice*. – 2005. – 308 p.



149. Чиркин, В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники / В.С. Чиркин. – Москва: Атомиздат, 1967. – 474 с.

150. Варгафтик, Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н.Б. Варгафтик. – М.: Наука, 1972. – 721 с.

151. Казанцев, Е.И. Промышленные печи. Справочное руководство для расчетов и проектирования / Е.И. Казанцев. – Metallurgia, 1975. – 370 с.