



Шлегель Никита Евгеньевич

**КОМБИНИРОВАННЫЕ СХЕМЫ ВТОРИЧНОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ КАПЕЛЬ
ЖИДКИХ И КОМПОЗИЦИОННЫХ ТОПЛИВ В КАМЕРАХ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК**

05.14.04 Промышленная теплоэнергетика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

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

Научный руководитель:

Стрижак Павел Александрович, доктор физико-математических наук, профессор.

Официальные оппоненты:

Кузма-Кичта Юрий Альфредович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Инженерной теплофизики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва.

Шарыпов Олег Владимирович, доктор физико-математических наук, доцент, заместитель директора по научной работе федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск.

Защита состоится «27» января 2022 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.18 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, ул. Усова, д. 7, уч. корпус 8, ауд. 217.

С диссертацией можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте: dis.tpu.ru

Автореферат разослан «26» ноября 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

Табакаев Роман Борисович
кандидат технических наук



Общая характеристика работы

Технологии первичного измельчения капель топлив основаны на использовании форсуночных и спринклерных устройств (рис. 1). Для распыления композиционных топлив используются, как правило, пневматические форсунки в силу их относительной конструктивной и эксплуатационной простоты и надежности. В зависимости от вида топлива и топочного устройства форсунки должны обеспечивать требуемые характеристики распыления топлива, создавать заданную форму капельного факела, иметь определенный диапазон возможного варьирования расхода топлива и размеров капель. Наличие в композиционных топливах мелкодисперсных твердых частиц приводит к значительному эрозионному износу элементов форсунки. Поэтому конструкции форсунок для распыления композиционных топлив не должны иметь узкие каналы и высокие скорости движения топлива вблизи их стенок. Работа таких форсуночных устройств основана, как правило, на эффекте Коанда. При распылении жидкость прилипает к стенкам диффузного сопла и растекается вдоль них тонкой струей. Однако этот процесс является неустойчивым. Высокоскоростная возвратная струя газа, внедряясь в жидкостную струю вдоль ее оси, нарушает целостность последней и способствует равномерному распределению жидкости тонкой струей по стенкам диффузора. При этом возвратная газовая струя после соударения с жидкостной изменяет свое направление на обратное, растекается вдоль стенок диффузора и ускоряет поток жидкости. Внутри конуса формируется тороидальный вихрь. В результате взаимодействия жидкостной струи и газового потока на выходе из диффузора образуется газочапельный поток. Определенная группа мелких фрагментов жидкости попадает в возвратную газовую струю. Увеличивается средняя плотность газового потока, и эффективность возвратной струи возрастает.

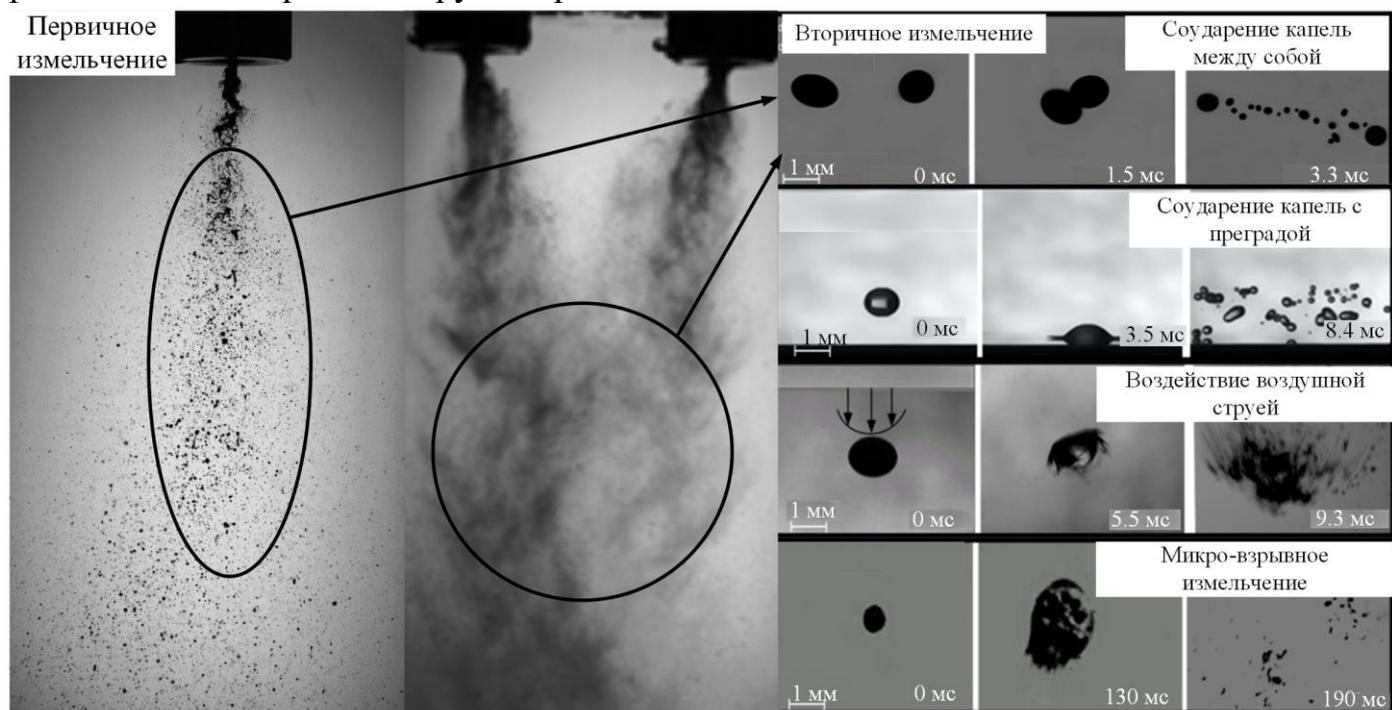


Рис. 1. Видеокадры первичного и вторичного измельчения капель жидких и композиционных топлив.

В настоящее время известна совокупность сложностей и ограничений при распылении жидкого и композиционного топлива: высокое давление в системе топливоподачи (7-35 бар), большие размеры капель (0.1-0.6 мм) существенно влияющие на

инерционность зажигания, высокие скорости движения струи (80-300 м/с), неполнота раскрытия факела (42-56 °). Для решения таких недостатков в настоящее время во всем мире исследуются процессы вторичного измельчения капель жидких и композиционных топлив (рис. 1). Вторичное измельчение капель жидкостей реализуется в различных приложениях, например, при распылении топлив в топках котлов, системах охлаждения, двигателях внутреннего сгорания, теплообменном оборудовании (рис. 1). Достоверное изучение характеристик вторичного измельчения капель имеет большое значение для разработки высокоэффективных технологий распыления. Для вторичного измельчения капель используются различные принципы и подходы. Наиболее часто применяются: соударение с преградой (сетки, решетки, уступы, стенки, подложки, кольца и др.); столкновения капель между собой; их разгон до высоких скоростей (в том числе закрутка в потоке) и превышения критических (предельных) чисел Вебера (или наоборот, вход в воздушную струю); микро-взрывной распад или частичное диспергирование неоднородных капель при нагревании. Наименее затратной, с точки зрения энергетических и временных ресурсов, является интенсификация распада капель при соударениях между собой в струе топлива или при пересечении нескольких струй. Перспективной задачей является изучение характеристик таких соударений при использовании топлив с разными компонентными составами (на примере типичных суспензий, эмульсий, растворов, однородных составов). При этом целесообразно определить, насколько мелкие капли получают при соударениях и какие связи имеются с группой определяющих факторов и параметров.

В настоящее время неизученными остаются закономерности взаимодействия капель жидких и композиционных топлив в газовой среде при комбинированном измельчении, что может способствовать их эффективному сжиганию. Можно выделить исследователей, которые внесли значительный вклад в развитие технологий первичного и вторичного измельчений капель жидких и композиционных топлив: Алексеенко С.В., Арефьев К.Ю., Архипов В.А., Блинов Е.А., Бушланов В.П., Быков Д.Е., Васенин И.М., Войтков И.С., Волков Р.С., Волинский М.С., Воронежский А.В., Гапонич Ф.Г., Гирин А.Г., Дейч М.Е., Дулин В.М., Елистратов С.Л., Ентов В.М., Ермаков В.В., Кравченко И.В., Кузнецов Г.В., Кузма-Кичта Ю.А., Лабейш В.Г., Лазарев С.И., Лапин Д.А., Мальцев Л.И., Маслов Б.Н., Накоряков В.Е., Нигматулин Р.И., Подвысоцкий А.М., Полежаев В.И., Рожков А.Н., Стрижак П.А., Трофимов В.М., Усанина А.С., Филиппов Г.А., Фисенко В.В., Фукс Н.А., Шарыпов О.В., Шрайбер А.А., Belletre J., Finotello G., Jan Breitenbach J., Gelfand B.E., Kooiman R.F., Krebs T., Krishnan K.G., Lior N., Loth E., Munnannur A., Orme M., Padding J.T., Tang C., Tarlet D., Weng X., Williams Y.O., Zhao H.

В настоящее время распылительные технологии развиваются в направлении повышения энергоэффективности измельчения капель жидкостей. При этом в системах и установках, использующих тепло, такие технологии реализуются с использованием существенно неоднородных капельных составов. Как следствие, наиболее актуальное направление исследований – интенсификация процессов вторичного измельчения (т.е. дополнительного после первичного распыления форсункой) как однородных, так и существенно неоднородных жидкостей. Наименее затратными технологиями вторичного измельчения капель жидкостей является: соударения между собой или со стенкой; измельчение путем воздействия воздушным потоком. Пока остается довольно много дискуссионных вопросов об условиях, при которых можно обеспечить максимальное (требуемое для интенсификации соответствующих теплообменных про-

цессов) количество вторичных фрагментов с фиксированными размерами. Поэтому целесообразно проанализировать современные достижения мирового научного сообщества в области изучения этих процессов и сформулировать перспективные ниши для последующих исследований.

Целью настоящей работы является определение условий и характеристик измельчения однородных и многокомпонентных капель жидких и композиционных топлив до мелкодисперсного аэрозоля по результатам экспериментальных исследований и формулирование рекомендаций по их использованию в теплогенерирующих технологиях.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Сравнительный анализ диапазонов изменения размеров, скоростей движения и углов атаки однородных и многокомпонентных капель жидких и композиционных топлив при распылении их в топочных устройствах.
2. Определение влияния номенклатуры и концентраций перспективных компонентов жидких и композиционных топлив на последствия первичного и вторичного измельчения капель.
3. Разработка экспериментальной методики, создание экспериментального стенда и проведение исследований условий и характеристик вторичного измельчения капель жидких и композиционных топлив.
4. Экспериментальное определение характеристик вторичной фрагментации капель жидких и композиционных топлив при варьировании ключевых факторов и параметров: схемы измельчения, температуры в камере сгорания, свойств жидкости, концентрации добавок, формы и размеров капель и др.
5. Сравнительный анализ схем первичного и вторичного измельчения капель топлив, разработка по его результатам комбинированных схем фрагментации капель.
6. Разработка рекомендаций по использованию результатов диссертационных исследований с целью повышения эффективности распыления топлив в камерах сгорания энергетических установок.

Научная новизна работы. Разработана экспериментальная методика проведения исследований по определению характеристик вторичного измельчения капель жидких и композиционных топлив, используемых при работе систем для генерации и трансформации энергоносителей с перспективными специализированными добавками (в виде отходов углеобогащения и нефтепереработки). Определены эффективные условия измельчения капель с учетом группы факторов и параметров: размеров, скоростей движения, углов атаки, компонентного состава и концентраций добавок, температуры жидкости, температуры и давления газовой среды. Сформирована не имеющая аналогов информационная база данных режимов и характеристик вторичного измельчения капель перспективных композиционных и жидких топлив.

Практическая значимость. Для широкой группы составов топлив на базе отходов углеобогащения и нефтепереработки определены интегральные характеристики вторичного измельчения капель и построены режимные карты взаимодействия. Обоснованы экологические, экономические и социальные эффекты от применения вторичного измельчения капель в системах для генерации и трансформации энергоносителей. Экономический и энергетический эффекты состоят в повышении энергоэффективности работы теплотехнического оборудования за счет уменьшения размеров после первичного измельчения капель, что приводит к увеличению площади поверхности теплообмена, фазовых превращений и химического реагирования. При сжигании

отходов в составе суспензий с добавлением воды снижаются антропогенные выбросы. Этим обосновывается экологическое преимущество сжигания композиционных топлив. Социальный эффект заключается в том, что станет возможным снизить объемы сжигаемого угля, уменьшатся выбросы в атмосферу. Результаты диссертационных исследований используются в НИ ТПУ в образовательных и научных процессах при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Теплоэнергетика и теплотехника», а также в реализации проектов РФФ 18-71-10002-П и 21-71-10008. Результаты использованы при разработке и модернизации систем для генерации и трансформации энергоносителей. К диссертации приложены акты об использовании результатов исследований.

Степень достоверности полученных результатов подтверждается оценками систематических и случайных погрешностей выполненных измерений, удовлетворительной повторяемостью опытов при идентичных начальных условиях, использованием высокоскоростных систем регистрации и программно-аппаратных комплексов, а также сравнением с теоретическими и экспериментальными данными других авторов, полученными для одно- и многокомпонентных жидкостей (на примере воды, эмульсий и суспензий).

Связь работы с научными программами и грантами. Диссертационные исследования комбинированных систем вторичного измельчения капель топливных композиций выполнены при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 18-71-10002 «Коагуляция, дробление и фрагментация капель жидкости в многофазных и многокомпонентных газопарокапельных средах») (2018–2023 гг.). Созданные диссертантом экспериментальные методики применяются при выполнении исследований в проекте Российского научного фонда № 21-71-10008, направленного на определение характеристик вторичных фрагментов топлив при использовании методик первичного и вторичного измельчения. Тематика исследований соответствует приоритетному направлению развития науки в Российской Федерации (указ Президента РФ № 899 от 7 июня 2011 г.): «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика», а также находится в сфере критических технологий Российской Федерации «Технологии энергоэффективного производства и преобразования энергии на органическом топливе» и «Технологии создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования энергии».

Научные положения, результаты и выводы, выносимые на защиту:

1. Разработана методика вторичного измельчения капель жидких и композиционных топлив в диапазонах изменения температуры и давления газовой среды, соответствующих теплопередающему и теплоиспользующему оборудованию, отличающаяся от известных комбинацией группы механизмов: распад капель при взаимодействии их между собой, с потоком воздуха и твердой поверхностью.
2. Установлен дисперсный состав вторичных фрагментов после комбинированных схем измельчения исходных капель типичных жидких и перспективных комбинированных топлив, используемых в промышленных теплоэнергетических установках.
3. Определено влияние характеристик жидкостей на режимы (изменения положения границ на картах режимов) соударений капель в системах координат с группой критериев (We , Oh , Re , Ca , B). Показано, что при увеличении вязкости с 0.001 до 0.0063 Па·с снижается количество вторичных фрагментов практически на 40%. Уменьшение поверхностного (с 0.07269 до 0.036 Н/м) и межфазного натяжения (с

0.04257 до 0.00341 Н/м) способствуют снижению количества вторичных фрагментов практически на 20% и 70%, соответственно.

4. Установлено существенное влияние температуры газа и давления на последствия вторичного измельчения капель топлив. Например, увеличение температуры газовой среды с 20 до 500 °С и давления с 0.9 до 5 атм приводит к возрастанию отношения площадей поверхности после и до взаимодействия капель практически на 20% и 25%, соответственно.
5. Обосновано, что площадь поверхности испарения жидкости существенно возрастает при применении схем вторичного измельчения: соударении капель между собой – в 3–6 раз, с потоком воздуха – в 5–7 раз, с твердой стенкой – в 15–25 раз, комбинированная методика – более чем в 100 раз. Предложены модификации схем расположения основных элементов распыливающих систем в топочных камерах энергетических установок, позволяющие реализовать комбинированные механизмы измельчения капель жидких и композиционных топлив.

Личный вклад автора состоит в постановке и планировании экспериментов, выборе методов, алгоритмов и средств регистрации, проведении опытов, обработке полученных результатов, оценке погрешностей, анализе и обобщении полученных результатов, разработке рекомендаций использования полученных результатов, формулировке защищаемых положений и выводов. Постановка решаемых задач, планирование экспериментов и подготовка публикаций проводились совместно с научным руководителем. Автор выражает благодарность коллективу Лаборатории тепломассопереноса ТПУ (<http://hmtslab.tpu.ru/>) за помощь в проведении экспериментов.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационных исследований докладывались и обсуждались на XV всероссийской школе-конференции молодых ученых с международным участием «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики» (Новосибирск, 2018), международном симпозиуме имени М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр» (Томск, 2018–2020), XII всероссийском съезде по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Уфа, 2019), III международной конференции «Современные проблемы теплофизики и энергетики» (Москва, 2020), Всероссийской научно-технической конференции «Энергия 2021» (Иваново, 2021), XXIII Школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках» (Екатеринбург, 2021), VIII Международной конференции «Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках» (Москва, 2021).

Публикации. Результаты диссертационных исследований опубликованы в более чем 20 печатных работах, в том числе более 10 статей в международных рецензируемых журналах, индексируемых базами данных «Scopus» и «Web of Science» и входящих в первый квартиль: «Powder Technology» (ИФ=4.1), «Chemical Engineering Science» (ИФ=3.8), «International Communications in Heat and Mass Transfer» (ИФ=3.9), «Applied Thermal Engineering» (ИФ=4.7), «Fuel» (ИФ=5.5), «Energy» (ИФ=6.1) и др.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Диссертация изложена на 245 страницах машинописного текста, содержит 63 рисунка и 4 таблицы. Библиография включает 162 наименования.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, отражены практическая значимость, научная новизна и достоверность полученных результатов, а также личный вклад автора.

В первой главе проанализировано современное состояние исследований схем вторичного измельчения капель жидкостей. Выполнен анализ известных способов и технологий измельчения капель жидкостей, выделены основные достоинства и недостатки каждой из схем. Определено современное состояние теоретических и экспериментальных исследований распыления жидкостных потоков и измельчения капель. Рассмотрены перспективные добавки для изменения свойств жидкостей. Определены основные достижения. Выделены нерешенные задачи, а также сдерживающие факторы развития технологий вторичного измельчения капель топлив.

Во второй главе приведено описание разработанных методик исследований процессов вторичного измельчения капель жидкости и обоснован выбор рациональных схем. Представлена схема созданного экспериментального стенда и разработанная автором методика измерений характеристик процесса фрагментации капель, а также рассмотрены добавки для изменения свойств жидкости (поверхностного и межфазного натяжения, динамической вязкости, плотности) и методы приготовления растворов. Выделены систематические погрешности и причины случайных погрешностей измерений.

Для определения характеристик вторичного измельчения капель жидкостей и композиционных топлив использовался стенд, схема которого приведена на рис. 2а. Схема измельчения капель жидкости представлена на рис. 2.2б. Для генерации капель использовались сменные сопла 7, которые позволяли варьировать размеры капель (R_{d1} и R_{d2}) от 0.1 до 1.1 мм. Для подачи жидкости использовались погружные насосы, которые позволяли варьировать скорость движения капель (U_{d1} и U_{d2}) от 0.5 до 10 м/с.

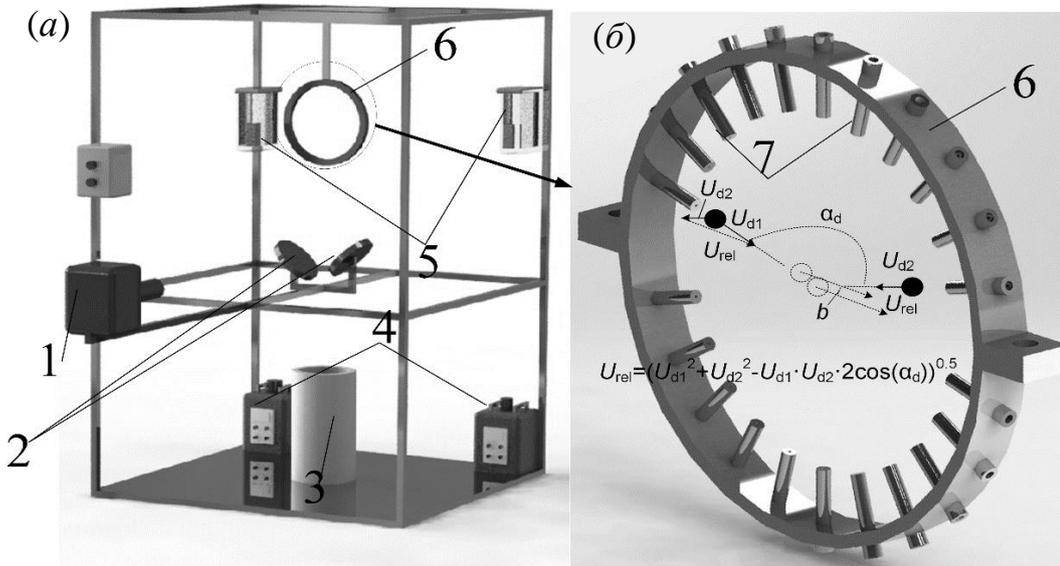


Рис. 2 Схема стенда (а) и регистрации соударения капель (б): 1 – высокосортная видеокамера; 2 – металлические подложки; 3 – муфельная печь; 4 – лабораторные автотрансформаторы; 5 – емкости; 6 – кольцевой держатель сопел; 7 – сопла.

Для исследования процесса измельчения капель при соударении с твердой поверхностью в стенд устанавливались подложки, выполненные из меди, алюминия, стали, а также металлической сетки с размером ячейки 1×1 мм. Изучалось влияние гидрофобности покрытия. Исследовалось влияние температуры поверхности на процесс диспергирования капли. Для этого медная пластина нагревалась до температур 50°C , 100°C , 180°C . Температура поверхности подложки измерялась пирометром Testo 835-T2 с погрешностью 0.1°C . Для создания высокотемпературной газовой среды при нагреве капель композиционных топлив использовалась трубчатая муфельная

печь (3) (максимальная возможная температура 1300 °С). По измеренным параметрам рассчитывалось отношение площади свободной поверхности после и до измельчения S_1/S_0 . Схема взаимодействия капель приведена на рис. 3.

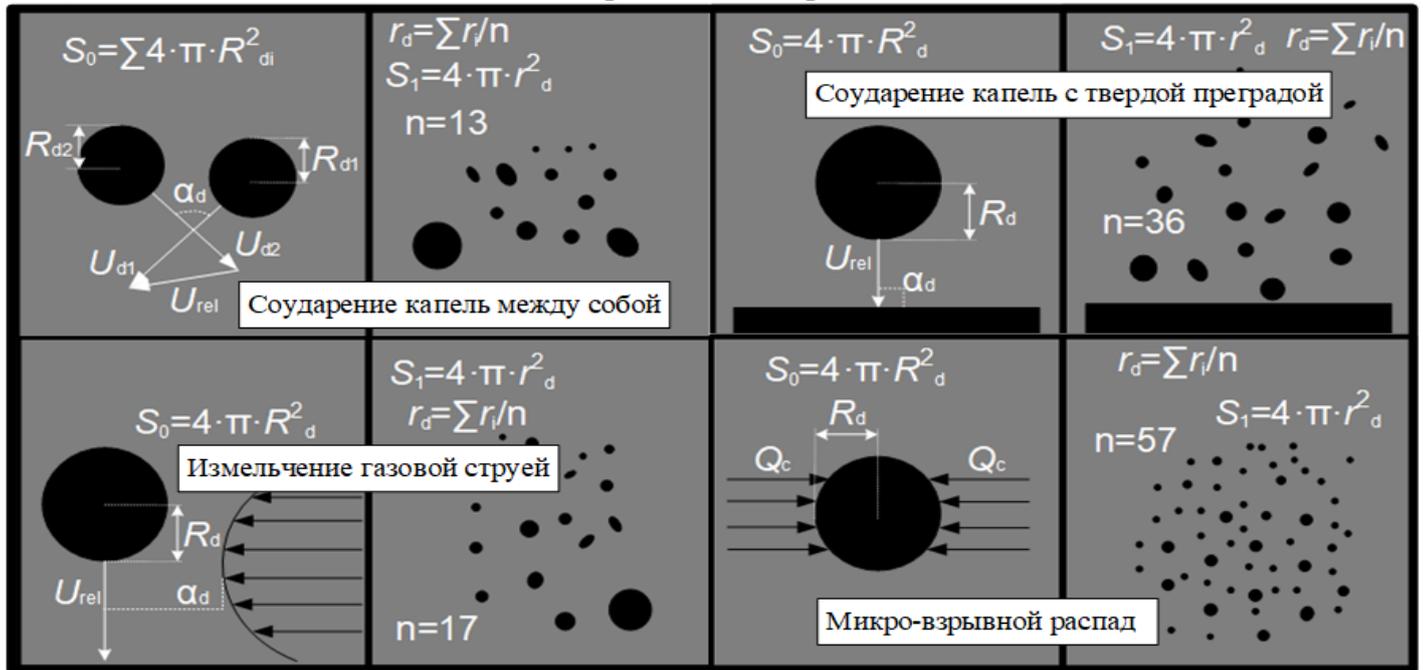


Рис. 3. Схема регистрации параметров измельчения капель.

Для проведения экспериментальных исследований в условиях близким к промышленному теплогенерирующему оборудованию, разрабатывались два стенда (рис. 4). Первый стенд состоял из системы индукционного нагрева, которая позволяла разогревать газовую среду до температуры около 900 °С. Второй стенд представлял из себя цилиндр из нержавеющей стали, в который закачивался или же откачивался воздух, что позволяло варьировать давление газовой среды от 1 до 5 атм и температуры от 20 до 400 °С за счет нагревательных тэнов.

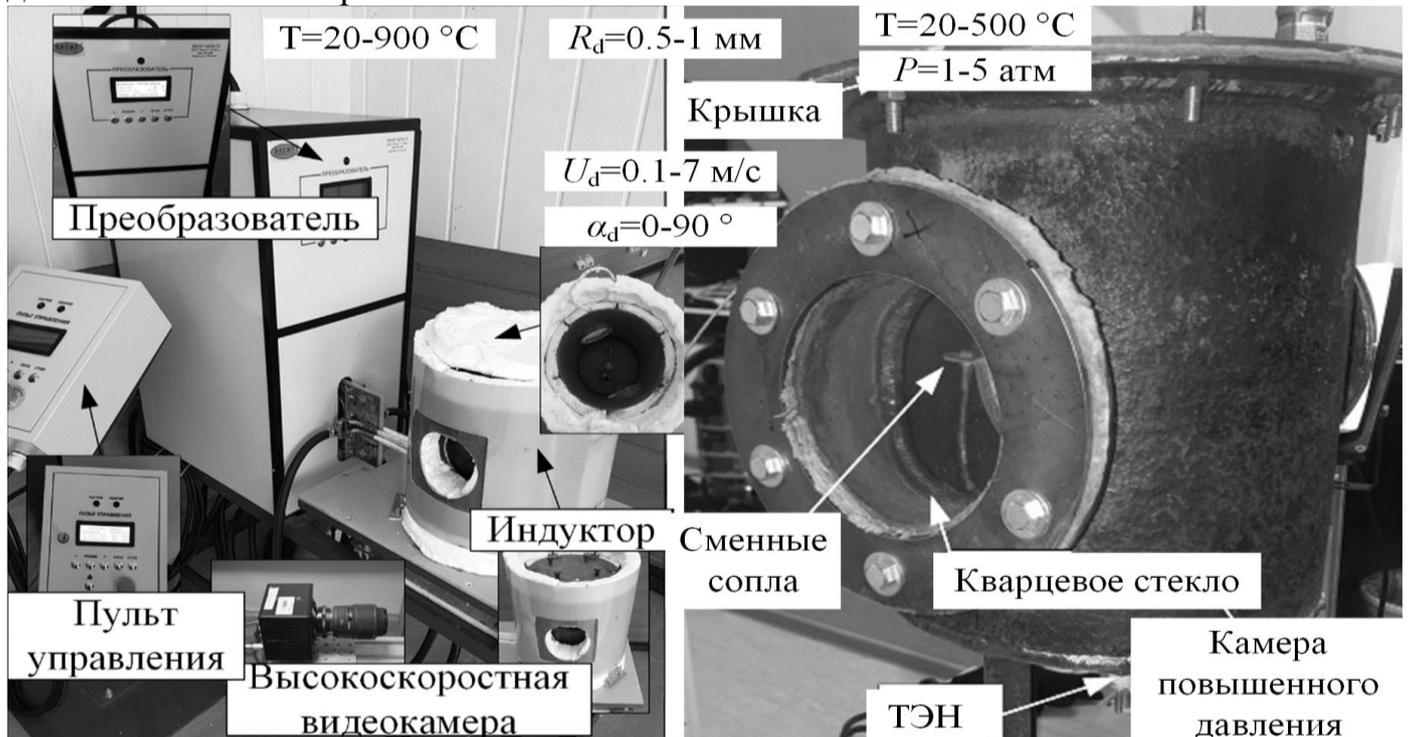


Рис. 4. Внешний вид экспериментальных установок для варьирования температуры и давления газовой среды.

Характеристики вторичного измельчения капель регистрировались высокоскоростной видеокамерой (разрешение изображения 1.3 мегапикселя при 1280x1024 пикселей, частотой съемки до 4000 кадров в секунду, объем памяти 32 ГБ). Систематические погрешности определения размеров R_d и скоростей U_g и U_d с применением панорамных оптических методов, а также соответствующего видеорегистрирующего стенда не превышали 1.6 и 2.1%. Максимальные случайные погрешности определения рассматриваемых параметров составили: R_d – 2.1%, U_g и U_d – 3.4%. Также при обработке видеogramм экспериментов определялись углы пересечения траекторий движения капель в момент их столкновения α_d с использованием специализированного программного обеспечения Tema Automotive и параметрической сетки на видеogramмах. Систематическая погрешность регистрации α_d не превышала 2.3%.

В качестве исследуемых жидкостей использовались составы (таблица 1), применяемые в ряде перспективных практических газопарокапельных приложений.

Таблица 1. Свойства использованных в экспериментах жидкостей.

№	Наименование состава	Начальная температура T , °C	Плотность ρ , кг/м ³	Поверхностное натяжение σ , Н/м	Динамическая вязкость μ , Па·с
1	Вода	20/80	998/965	0.07269 / 0.06259	0.001 / 0.00036
2	Раствор глицерина (25 об%)	20	1060	0.06937	0.002239
3	Раствор глицерина (50 об%)	20	1126	0.066	0.006301
4	99.5 об% вода, 0.5 об% Твин-80	20	998	0.0474	0.001
5	49.5 об% вода, 0.5 об% Твин-80, 50 об% глицерина	20	1126	0.0474	0.006301
6	74.5 об% вода, 0.5 об% Твин-80, 25 об% глицерина	20	1060	0.0474	0.002239
7	ОВУТ (10 мас% Бурый уголь, 10 мас% трансформаторное масло)	20	995.9	0.09462	0.0034
8	ВУТ (10 мас% Бурый уголь)	20	1046.5	0.10903	0.0017
9	Эмульсия трансформаторное масло (15 об%)	20/80	980.35 / 947.74	0.06473 / 0.054505	0.00416 / 0.000768
10	Эмульсия трансформаторное масло (30 об%)	20/80	962.69 / 930.47	0.056763 / 0.04642	0.00692 / 0.001176
11	Эмульсия трансформаторное масло (50 об%)	20/80	939.15 / 907.45	0.046145 / 0.03564	0.01065 / 0.00172
12	Эмульсия трансформаторное масло (70 об%)	20/80	915.61 / 884.43	0.0355527 / 0.02486	0.01428 / 0.002264
13	Эмульсия дизеля (90 об% дизель)	20	878.7	0.015	0.0013
14	Раствор Неонола АФ9-12 (0.5 об%)	20	998	0.04125	0.001
15	Мазут	80	850	0.03	0.0476

Для соударения капель суспензий в воду добавлялись частицы угля. Это связано с перспективным развитием водоугольных и органоводоугольных топлив (всю совокупность таких топлив принято называть композиционными) во многих государствах, например, Китае, Японии, России, Швеции и др. Одним из направлений решения про-

блем уменьшения выбросов является использование водосодержащих топлив. Выбор масел, дизельного топлива и мазута обусловлен их широким отдельным применением в энергетике, а также совместным в составе органоводоугольных топлив. Также исследованные масла и горючие жидкости являются загрязнителями сточных вод. Представляет интерес рассмотрение водных эмульсий с небольшой концентрацией указанных горючих жидкостей с целью интенсификации термической очистки воды. В промышленных котлоагрегатах в настоящее время используется мазутное топливо, в котором присутствует до 10% воды. При проведении некоторых экспериментов такие жидкости заменялись аналогами в связи с их горючестью и выделением токсичных газов. В частности, для достижения таких же свойств как у топлив, использовалась вода с добавлением глицерина (для увеличения вязкости) и Твин 80 (для снижения поверхностного натяжения).

В третьей главе приведены основные результаты выполненных диссертационных исследований. Установлено влияние параметров исходных капель, свойств жидкости, температуры и давления газовой среды на характеристики вторичного измельчения. Представлены карты режимов взаимодействия капель с критическими значениями параметров, характеристик перехода между ними и отношений площадей поверхности испарения после и до измельчения. Разработаны рекомендации по использованию результатов в энергетических приложениях. В частности, из полученных экспериментальных данных выделялись четыре режима столкновения капель: отскок, коагуляция, разлет и дробление (рис. 5). Отскок характеризовался упругим соударением и последующим разлетом капель. Поверхностная оболочка капель при отскоке не нарушалась, новые капли не образовались. При коагуляции капель поверхностная оболочка в месте столкновения разрушалась, и две исходные капли объединялись в одну. В случае слияния капель и их последующего разделения без образования новых капель регистрировался режим разлета. В случае образования нескольких вторичных фрагментов ($N_{fi} > 2$) после столкновения исходных регистрировался режим дробления.

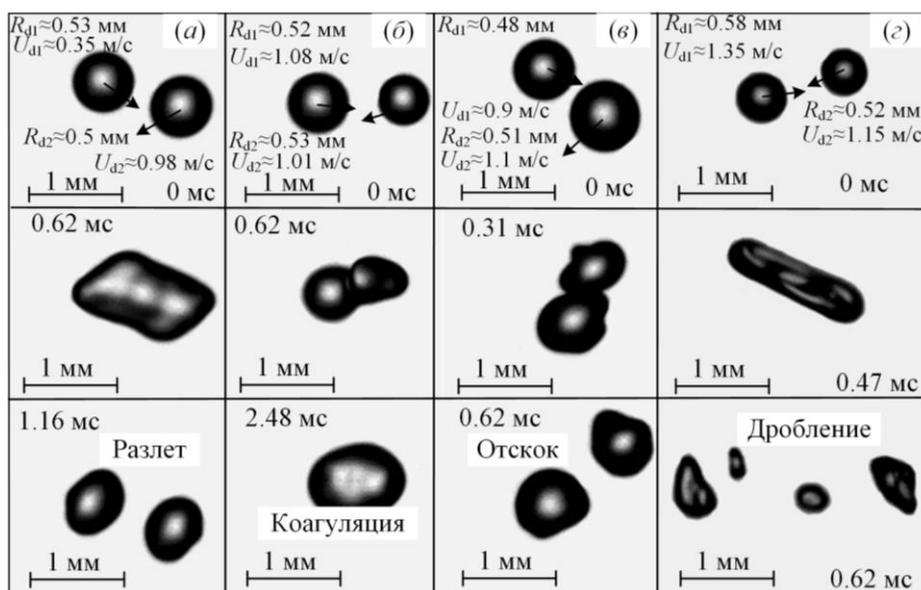


Рис. 5. Фотокадры из экспериментов с реализацией режимов соударений капель жидкостей между собой.

Установлены два механизма дробления капель: с образованием жидкого диска и формированием цепочки вторичных фрагментов. Для процесса вторичного измельчения капель жидких и композиционных топлив основной режим взаимодействия – дробление. Кадры с реализацией соответствующего режима для всех схем измельчения показаны на рис. 1б.

На рис. 6 показаны установленные распределения вторичных капель по размерам в аэрозольном облаке после измельчения при применении каждой из четырех схем измельчения. Образование наибольшего количества вторичных фрагментов с наименьшим радиусом (менее 0.05 мм) характерно для

микро-взрывного распада капель. Количество капель с большим радиусом является значительно меньшим и резко убывает с увеличением радиуса вторичных капель.

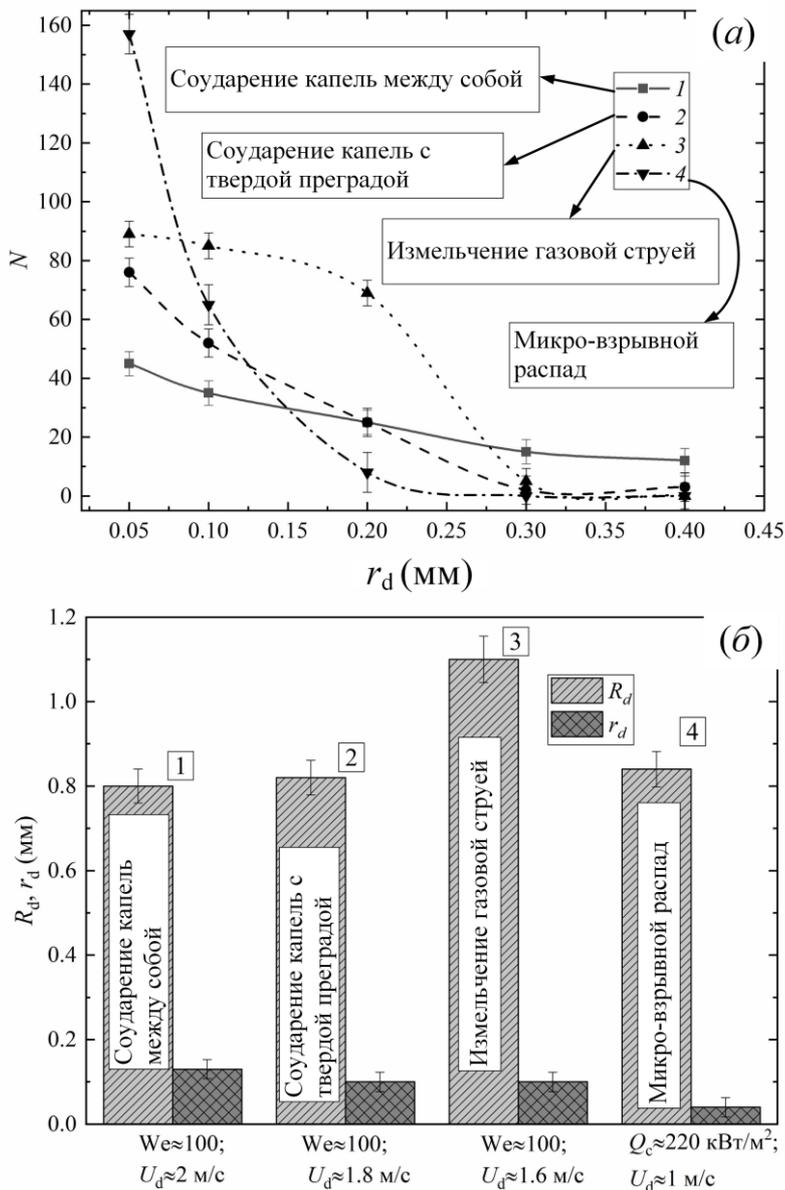


Рис. 6. Распределения капель по размерам в аэрозольном облаке (а) после измельчения и отношение размеров образующихся фрагментов жидкости к исходным каплям (б) при применении каждой из четырех схем измельчения, для эмульсии дизельного топлива (90 об%) для числа $We=100$.

преобладают над вращательными силами, минимизируя длительности и амплитуду изменения форм вторичных фрагментов в циклах деформации. Поэтому после соударения не происходит дальнейшей фрагментации, капли имеют сферическую форму, что не позволяет реализовывать разделение на более мелкие фрагменты. За счет этого увеличивается количество крупных фрагментов ($r_d > 0.2$ мм), а маленьких, наоборот, снижается. Такое явление приводит к снижению отношения площади свободной поверхности жидкости после и до фрагментации. Таким образом, проведенные эксперименты обосновали, что для интенсивной вторичной фрагментации капель целесообразно использовать жидкостные составы с малой вязкостью. Это заключение справедливо

Для оценки влияния вязкости, поверхностного натяжения и межфазного натяжения жидких топлив проведены экспериментальные исследования с использованием модельных жидкостей на основе растворов глицерина и с добавлением пара Твин-80. При увеличении вязкости жидкости зарегистрировано относительно небольшое смещение границ переходов к дроблению и разлету от режима коагуляции в сторону больших чисел Вебера (рис. 7а). Так, граница разлета для капель воды соответствует числу Вебера, равном 40, в то время как для раствора глицерина критическое число Вебера достигало 50. Для границы дробления капель раствора глицерина зарегистрировано небольшое смещение относительно аналогичной границы для капель воды ($\Delta \approx 6\%$) в сторону роста значений We . При увеличении вязкости жидкости регистрировалось образование более крупных по размеру вторичных фрагментов, что хорошо видно на рис. 7б. Высоковязкие вторичные фрагменты быстро принимали сферическую форму. Вязкостные силы

ливо во всем использованном диапазоне (до 200) варьирования интегрального параметра (числа Вебера).

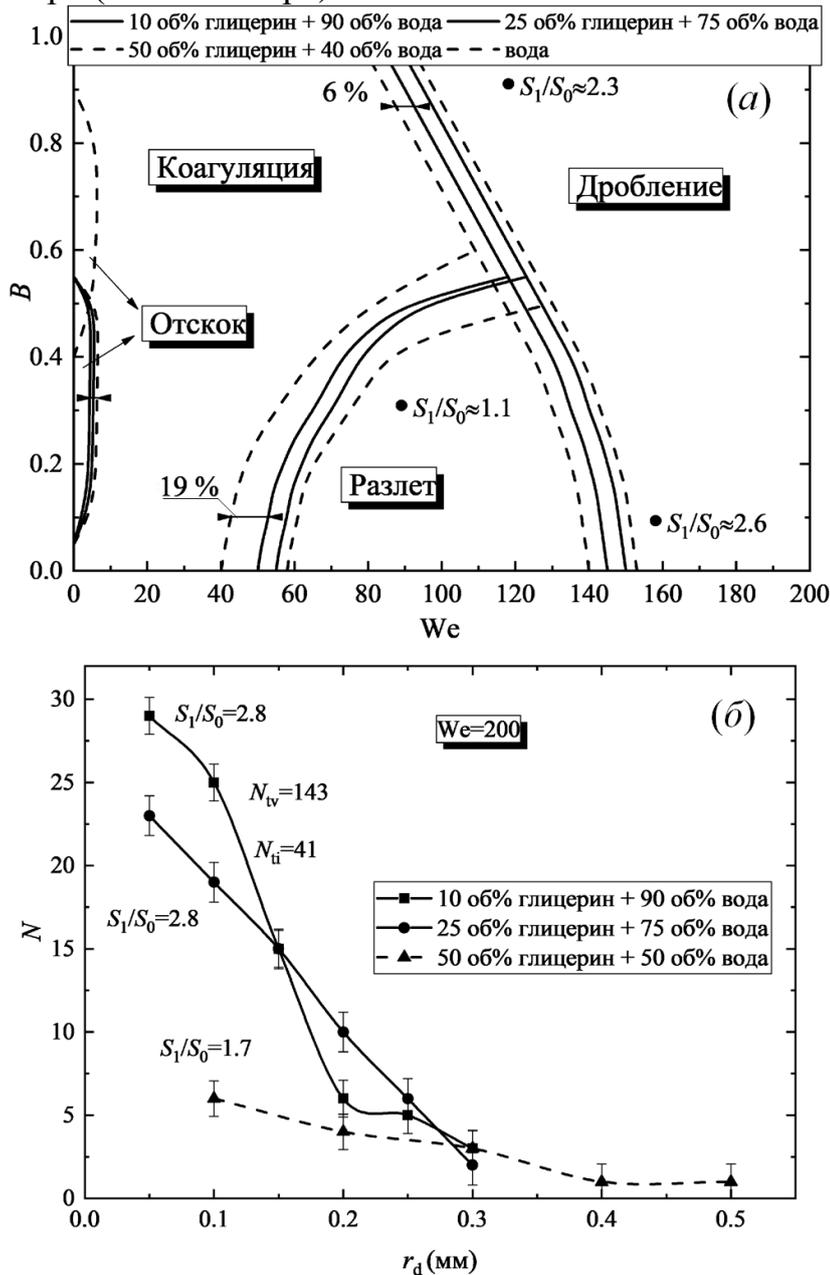


Рис. 7. Влияние вязкости жидкости на границы переходов между областями, соответствующими различным режимам соударений капель (а) и распределения образованных фрагментов жидкости по размерам (б).

сохраняется во всех опытах. Чем выше межфазное натяжение, тем стабильнее межмолекулярные связи, и нередко для разрушения мультикомпонентных капель требуются даже существенно большие силы инерции, например, вызванные более высокими скоростями движения в газовой среде. Для изучения распределения размеров микрокапелек воды, находящихся в дизельном топливе, проведена дополнительная регистрация с использованием микроскопа (рис. 9). Хорошо видно, что структура капли существенно меняется вследствие действия стабилизирующей добавки. Раскадровка видеogramм с микроскопа показала, что дисперсность капелек воды в составе дизельной эмульсии существенно меняется. Эти изменения, главным образом, связаны с тем, что микрокапельки воды с течением времени начинают коагулировать и, как следствие, укрупняться. Чем выше концентрация эмульгатора, тем медленнее происходят

В ходе изучения влияния поверхностного натяжения жидкости (рис. 8) на положение границ переходов между режимами соударений капель установлено, что с уменьшением поверхностного натяжения в два раза граница дробления смещается в сторону меньших значений числа Вебера на 67%. Аналогичный эффект зарегистрирован и для границы разлета, смещение которой составило 63%. Такое положение границ объясняется снижением предельного (критического) значения кинетической энергии, необходимой для преодоления сил поверхностного натяжения капель.

Уменьшение поверхностного натяжения жидкости способствует не только понижению требуемых для вторичного измельчения значений скоростей движения и размеров капель, но и формированию мелкодисперсного жидкостного аэрозоля. В тоже время из анализа зарегистрированных распределений капель по размерам можно сделать вывод о том, что полидисперсная структура аэрозоля

процессы агломерации капелек воды. На основе данных, полученных при видеорегистрации с использованием микроскопа, можно сформулировать предположение о том, что в процессе соударения также интенсифицируется агломерации капелек воды.

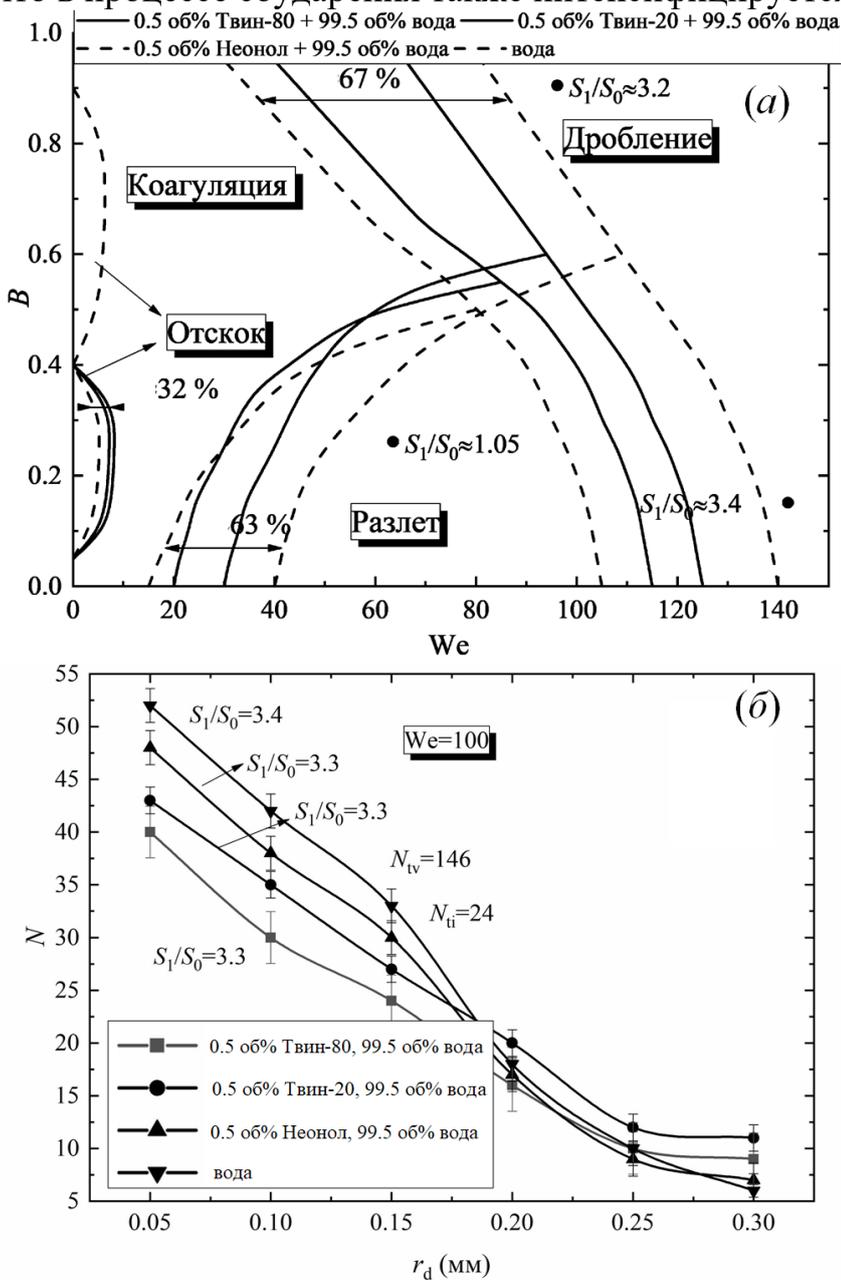


Рис. 8. Влияние поверхностного натяжения жидкости на границы переходов между режимами соударений капель (а) и распределения образованных фрагментов жидкости по размерам (б).

даже нескольких процентов по относительной объемной концентрации эмульгатора способствует существенной фрагментации. В диссертационной работе использовались модельные жидкости с варьированием одного параметра (например, вязкости) и фиксированными другими (поверхностное и межфазное натяжение). Таким образом, удалось определить влияние каждого свойства жидкости на режимы взаимодействия и интегральные характеристики вторичных фрагментов по отдельности. Кроме того, выделен режим, при котором в результате соударения капель всегда образуется больше двух фрагментов, что важно при реализации технологий вторичного измельчения.

Проведенные эксперименты показали, что увеличение вязкости приводит к смещению границ дробления и разлета в сторону больших чисел Вебера ($We \approx 153$ и $We \approx 58$, соответственно) и снижению количества вторичных фрагментов с радиусом менее 0.15 мм практически на 40%. Снижение поверхностного натяжения жидкости приводит к уменьшению критических (переходных между режимами) чисел Вебера для дробления и разлета на 67% и 63%, соответственно, и к росту отношения площадей свободной поверхности капель практически на 20%. Важно отметить, что снижение поверхностного натяжения жидкости вызывает синергетические эффекты, способствующие развитию цепных механизмов вторичного измельчения капель. Снижение межфазного натяжения эмульсии позволяет получить большее количество вторичных фрагментов, чем у исходной эмульсии без эмульгатора практически на 70%.

Т.е. введение в состав капли

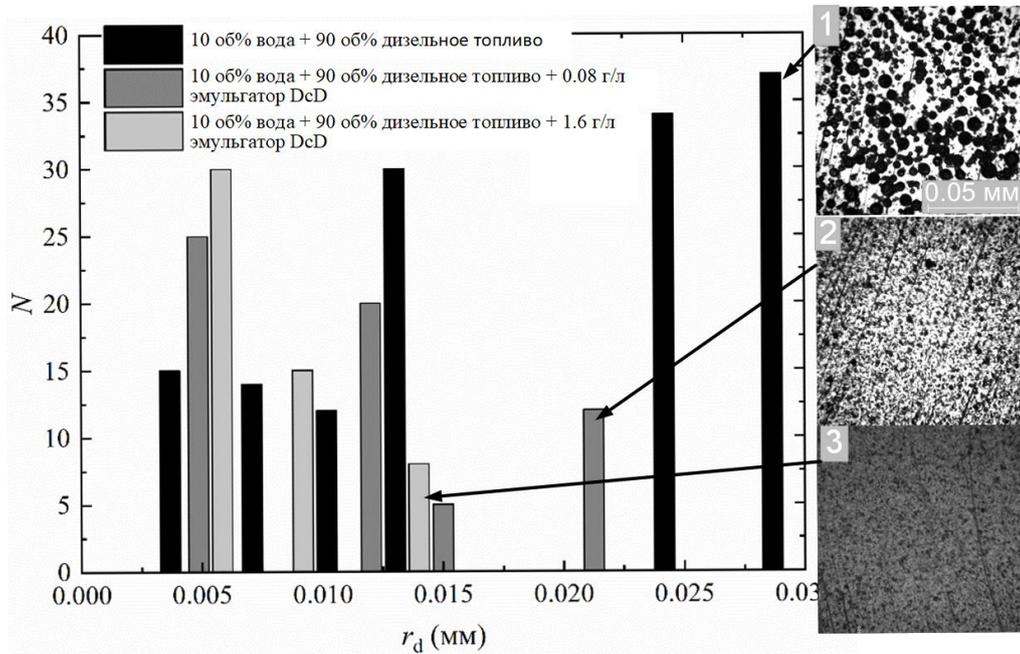


Рис. 9. Видеокадры микроскопного увеличения и распределения размеров капелек воды в капле дизельной эмульсии.

В теплогенерирующих установках, как правило, при распылении жидких и композиционных топлив характеристики газовой среды отличны от атмосферных. Поэтому целесообразно получить экспериментальные данные для широких диапазонов давлений и температур, соответствующих типичным газопарока-

пельным приложениям. В частности, параметры, встречающиеся в типичных промышленных теплоэнергетических устройствах и использующих тепло в системах и установках при пожаротушении ($U_d=0.5-5$ м/с, $R_d=0.1-3$ мм), сжигании топлив ($U_d=2-12$ м/с, $R_d=0.05-1.5$ мм) и теплообменных процессах ($U_d=1-8$ м/с, $R_d=0.05-1$ мм). Отношение площадей поверхности фрагментов жидкости после и до дробления при варьировании давления газовой среды от 0.9 до 5 атм и температуре 20, 100 и 200 °С приведены на рис. 10. Для всех значений температуры установлено увеличение значений S_1/S_0 с ростом числа Вебера. С увеличением давления дробление капель протекало менее эффективно. При давлении газовой среды ниже атмосферного установлен рост значений отношения S_1/S_0 . Площадь поверхности вторичных фрагментов после дробления при $P=3$ атм (рис. 10) уменьшилась на 11–14% относительно дробления при $P=1$ атм, при $P=5$ атм значение S_1/S_0 снизилось на 15–23% относительно значений для $P=1$ атм (рис. 10). При давлении $P=0.9$ атм площадь свободной поверхности вторичных фрагментов после дробления относительно начальной увеличилась на 7–13% относительно значений для $P=1$ атм. С увеличением температуры общая тенденция не изменилась – с повышением давления значения S_1/S_0 также снижались. Увеличение температуры газовой среды до 100 и 200 °С привело к росту свободной поверхности вторичных фрагментов для всех значений давления газовой среды. Относительно столкновений капель воды при $T=20$ °С и неизменном давлении $P=1$ атм значения S_1/S_0 при повышении температуры газовой среды до 100 и 200 °С увеличились, соответственно на 7–10% и 10–16%. При $P=3$ атм и нагреве газовой среды рост значений S_1/S_0 составил 5–8% и 9–13%, а при $P=5$ атм S_1/S_0 увеличились на 4–8% и 6–10%. Причиной снижения относительной эффективности дробления капель при одинаковых температурах (20, 100 и 200 °С) и повышении давления газовой среды стали возросшие внешние силы, давящие на поверхность фрагментов после дробления.

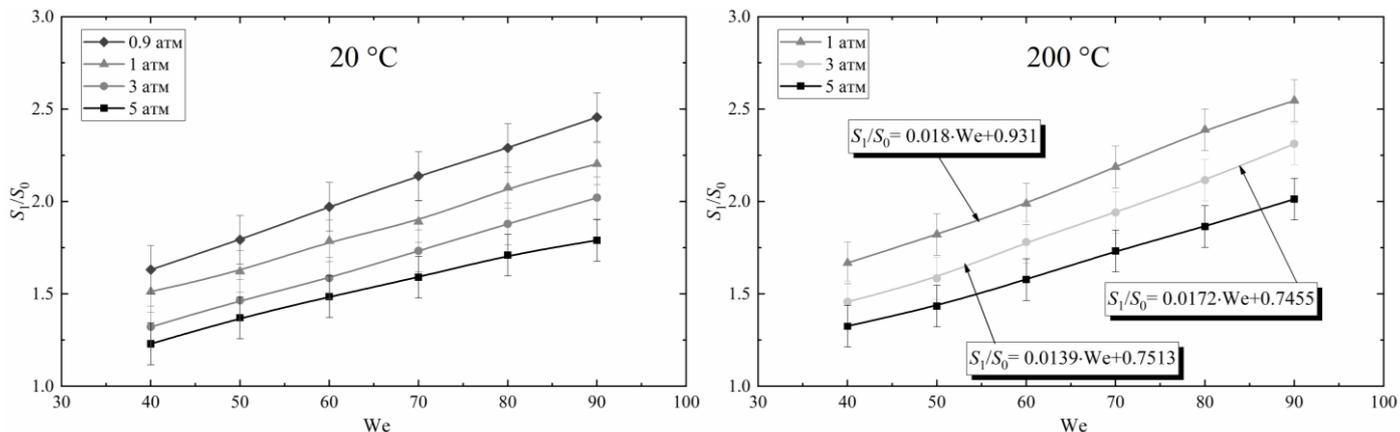


Рис. 10. Зависимости отношения площадей свободной поверхности после и до взаимодействия от числа Вебера для $R_d=0.45-0.55$ мм при давлении 1, 3 и 5 атм и варьировании температуры.

Часто в качестве растопочного и основного топлива в котельных агрегатах используется мазут. Так как мазут является высоковязкой жидкостью ($\mu \approx 0.0476$ Па·с при $T \approx 80^\circ\text{C}$), то интенсивное разрушение его капель потоком натекающего воздуха мало вероятно. За счет высокой вязкости капля мазута уносится воздушным потоком, не разрушаясь, а лишь терпит небольшую трансформацию перпендикулярно оси приложенной силы. Микро-взрывное же измельчение мазута в топочных устройствах маловероятно, так как время прогрева капли при малой концентрации воды (до 10%) будет слишком велико, и капля успеет пройти путь до стенки топки, не загоревшись. В связи с этим в диссертационной работе рассмотрены два варианта вторичного измельчения капель мазута, а именно соударение капель между собой (рис. 11 и с разогретой твердой поверхностью).

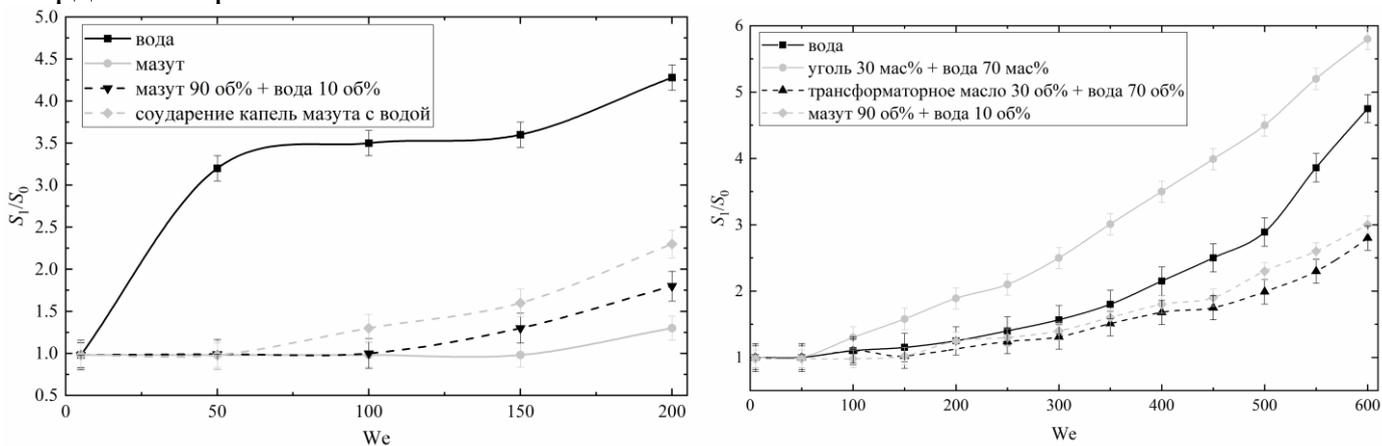


Рис. 11. Отношение площадей свободной поверхности после и до взаимодействия.

Анализ результатов проведенных опытов показал, что измельчение обводнённого мазута происходит при критическом числе Вебера более 150. Дробление же капель мазута, соударяющихся с каплями воды, происходит при критическом числе Вебера около 50. Такой эффект объясняется, тем что капля воды при соударении разрушается, и образованные фрагменты втягивают в себя капельки мазута. Увеличивается отношение площади свободной поверхности после и до взаимодействия капель (рис. 11а). Следует отметить, что в отличие от соударений капель между собой при регистрации условий измельчения капель мазута с твердой стенкой установлены два режима: растекание первой капли и фрагментация последующих капель. При столкновениях капель обводненного мазута между собой могут реализовываться несколько режимов:

коагуляция; отскок; дробление (измельчение). Установлено, что для достижения максимального эффекта измельчения капле мазута необходима температура стенки 300 °С. При измельчении мазута образовывается небольшое количество вторичных фрагментов в отличие от типичных суспензий и эмульсий, такой эффект объясняется высокой вязкостью мазута, которая даже при нагревании его остается высокой (рис. 11б). Результаты проведенных экспериментов показывают не только широкие перспективы измельчения (дробления) капле мазутных композиций. Сопоставление экспериментальных значений характеристик процессов дробления капле топлив с разным компонентным составом при соударении в газовой среде на картах режимов взаимодействия дает основания для вывода о том, что капли любого жидкого композиционного топлива дробятся при существенно меньших аэродинамических нагрузках по сравнению с каплями однородных жидкостей.

При изучении комбинаций всех схем измельчения установлено, что наиболее существенный вклад в комбинированных схемах вносит этап с дроблением капле при взаимодействии последних с нагретой твердой поверхностью после предварительного измельчения капле за счет столкновения между собой и дробления встречным потоком воздуха (газовой струей) (рис. 12). Не менее существенное увеличение площади поверхности жидкости происходит при применении микро-взрывного распада капле на последней ступени комбинированного измельчения. Установлено, что при дроблении капле вследствие столкновений между собой можно обеспечить уменьшение средних размеров в 7.27 раз. При дроблении капле за счет взаимодействия капле с твердой поверхностью и при ударе по капле воздушной струей размеры образующихся вторичных фрагментов являются идентичными, при этом

отношение размеров начальных капле ко вторичным при дроблении встречным воздушным потоком составляет около 10.1. В результате экспериментальных исследований получено, что максимальное значение отношения размеров капле до и после разрушения относится к схеме, в которой осуществляется микро-взрывной распад капле за счет перегрева и составляет 16.12.

По результатам комбинирования схем измельчения выполнены оценки условной тепловой мощности при горении исследованных топлив. Тепловая мощность до взаимодействия капле определялась с применением выражения: $P_0 = W_b \cdot S_0 \cdot Q_c$ (W_b – ско-

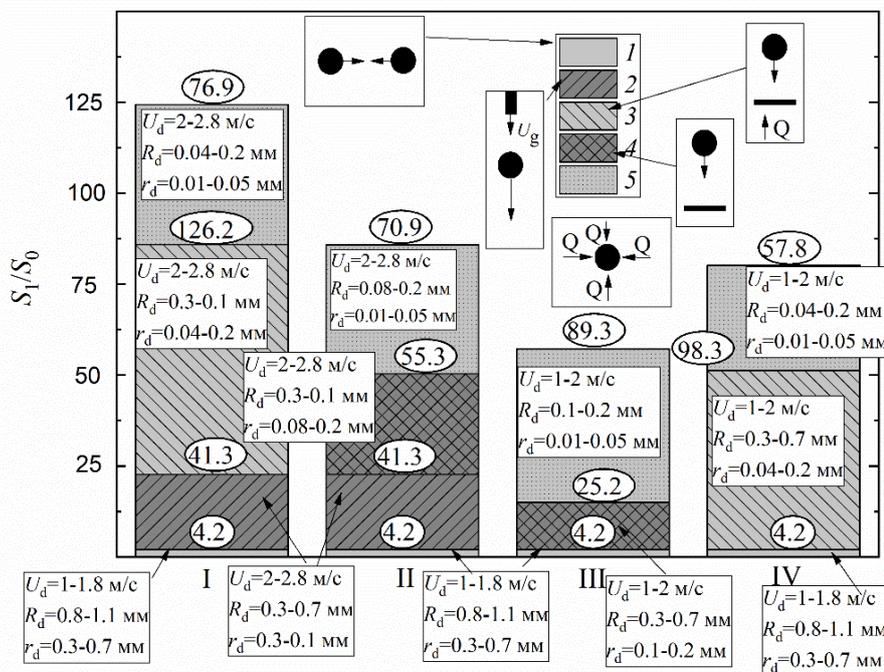


Рис. 12. Максимальные отношения площадей поверхности жидкости при комбинированном применении нескольких из четырех схем измельчения на примере одиночных капле: 1 – соударения между собой; 2 – взаимодействие с натекающим потоком воздуха; 3 – соударение с нагретой стенкой; 4 – соударение со стенкой без нагрева; 5 – микро-взрывное измельчение, для эмульсии дизельного топлива

рость выгорания, Q_c – теплота сгорания). Мощность тепловыделения при горении вторичных капель определялась с учетом их суммарной площади поверхности: $P_1 = W_b \cdot S_1 \cdot Q_c$. Для негорючих жидкостей рассчитывалось поглощение теплоты при парообразовании с учетом площади фазовых превращений: $P_0 = W_i \cdot S_0 \cdot Q_i$ (W_i – скорость испарения, Q_i – теплота парообразования). Относительный же прирост тепловой мощности можно определить как при вычислении разности P_1 и P_0 или отношения этих значений. При использовании второго подхода $P_1/P_0 = S_1/S_0$, т.е. отношение площадей свободной поверхности жидкости после и до разрушения капель определяет интегральный параметр. Основная особенность технологий вторичного измельчения капель жидкостей состоит в том, что существенно увеличивается площадь поверхности жидкости для интенсификации испарения воды (например, при выпаривании примесей, использовании газопарокапельных теплоносителей, тушении пожаров и др.) и выгорания топлив. Также для оценки эффективности процесса вторичного измельчения капель жидких и композиционных топлив рассчитывались кинетические энергии после и до взаимодействия ($E_{ch} = \sum N \cdot m_{ch} \cdot U_{ch}^2 / 2$ и $E_{dr} = m_{dl} \cdot U_{rel}^2 / 2$, N – количество вторичных фрагментов, m_{ch} , U_{ch} – масса и скорость вторичных фрагментов, m_{dl} , U_{rel} – масса и результирующая скорость взаимодействия исходных капель).

Установлено, что определяющую роль играют значения площади свободной поверхности после измельчения капли и до. Поэтому абсолютные значения скоростей выгорания или испарения, принимаемые в расчетах, оказывают второстепенное влияние. В связи с этим можно выполнять оценки преимуществ различных технологий, где применяются системы вторичного измельчения, с учетом отношения площадей поверхности жидкости. Таким образом, при комбинированном измельчении капель удастся не только существенно увеличить площадь поверхности испарения, но и увеличить тепловыделение в случае топливных технологий или поглощения энергии при парообразовании. Для расчета израсходованного количества энергии на измельчение капель при разных схемах принималась энергия, необходимая для поддержания работоспособности соответствующих установок (нагревательных камер, компрессорного оборудования и др.) в течение часа. Установлено количество минимальной требуемой энергии для интенсификации вторичного измельчения по каждой из четырех схем. Наибольшее количество требуется при организации условий микро-диспергирования. При этом требуемое количество энергии в несколько раз (а иногда и более чем в 10 раз) выше, чем при соударении капель со стенкой, с другими каплями или потоком воздуха. С учетом получаемых масштабов роста площади поверхности жидкости и требуемого количества мелких фрагментов жидкости каждая из четырех схем измельчения является конкурентоспособной, но особенно выделяются схемы с микровзрывным распадом капель и их соударением между собой, так как их эффективность остается высокой при разном количестве и концентрации одновременно подаваемых капель жидкости. Определено, что при числе Вебера более 150 (такое число характерно при распылении капель топлив в энергетических установках) роль мишени и снаряда оказывает незначительное влияние на характеристики вторичных фрагментов капель.

Также изучено влияние формы исходных капель (сфера, эллипсоид, условный жидкий диск), параметров мишени и снаряда на характеристики вторичных фрагментов. Установлено, что при соударении капель несферической формы значения отношения площадей сводной поверхности после и до измельчения существенно выше (на 10-30%), чем при схеме «сфера–сфера» во всем диапазоне изменения чисел Вебера и

углов атаки. Изучено влияние температуры газовой среды и степень турбулизации потока на характеристики вторичных фрагментов капель топлив. Определено, что рост степени турбулизации газового потока интенсифицирует взаимодействия капель, но последствия этих соударений не всегда состоят в дроблении капель, т.е. значительной фрагментации. Установлено, что повышение температуры газовой среды приводит к снижению поверхностного натяжения жидкости, что способствует образованию большего количества вторичных фрагментов (практически в 3-6 раз), но при числе Вебера более 150. При меньших же We преобладает режим коагуляции.

В результате диссертационных экспериментальных исследований установлено, что для эффективного измельчения как однородных, так и неоднородных капель жидкостей целесообразно применение комбинации четырех схем вторичного дробления. Для достижения максимальной эффективности рекомендуется использовать схемы разрушения капель в последовательности: дробление капель при их соударениях между собой; воздействие на них потоком воздуха (импульсным в виде газовой струи); соударение с нагретой твердой поверхностью; микро-взрывной распад капель при нагреве в соответствующих камерах и печах. При такой комбинации схем измельчения капель удастся увеличить площадь поверхности жидкости (т.е. обеспечить рост отношения S_1/S_0) более чем в 100 раз. Чем больше концентрация примесей и добавок к воде, тем шире диапазон возможного изменения значений отношения S_1/S_0 . По результатам выполненных экспериментальных исследований сформулирован перечень рекомендаций по практическому применению в теплоэнергетике схем вторичного измельчения капель жидкостей и композиционных топлив. Основные краткие рекомендации состоят в следующем:

1. Для достижения эффективного измельчения аэрозольных потоков необходимо устанавливать форсуночные устройства под углом 60–90° относительно друг друга.
2. Распыляемые жидкости целесообразно нагревать до температуры 80–100°C, за счет чего снижается поверхностное натяжение и растет площадь поверхности испарения практически на 30%.
3. При увеличении вязкости с 0.001 до 0.0063 Па·с снижается количество вторичных фрагментов практически на 40%. Таким образом, можно рекомендовать снижать вязкость жидкости до значений, близких к вязкости воды, т.е. около 0.001 Па·с.
4. Понижение поверхностного (с 0.07269 до 0.036 Н/м) и межфазного натяжения (с 0.04257 до 0.00341 Н/м) способствует снижению количества вторичных фрагментов практически на 20% и на 70%, соответственно. Для использования в тепловых установках жидких и композиционных топлив рекомендуется к ним добавлять ПАВ (0.5 об% Твин-80) и эмульгатор D_cD (1.6 г/л) с минимальной исследованной долей.
5. Наиболее перспективная комбинация схем вторичного измельчения капель для получения мелкодисперсного аэрозоля предполагает соударения капель между собой или со стенкой, с последующим нагревом образующихся жидкостных фрагментов до состояния вскипания и последующего микро-взрывного разрушения. При такой комбинации обеспечивается рост отношения S_1/S_0 более чем в 100 раз. В этом случае энергия, затрачиваемая на разогрев капель на втором этапе, минимальна, и не требуются большие скорости взаимодействия в рамках первого этапа.
6. Можно рекомендовать наиболее рациональную схему измельчения. На первом этапе происходит соударение капель между собой, а на втором – микро-взрывное дробление образовавшихся на первом этапе фрагментов. В этом случае может быть

затрачена минимальная энергия на разогрев капель на втором этапе, и не требуются большие скорости взаимодействия в рамках первого этапа.

7. Вторичное измельчение капель необводненного мазута практически не является возможным при любой схеме измельчения. Таким образом, для эффективного вторичного измельчения в промышленном теплоэнергетическом оборудовании, можно рекомендовать обводнять мазут на 5–10%, что позволяет добиться существенной фрагментации капель при соударении между собой и с твердой поверхностью.

8. Для достижения максимальной эффективности вторичного измельчения мазута за счет соударения между собой необходимо разогревать обводненный мазут до 80 °С.

9. Для достижения эффективного процесса дробления одно и многокомпонентных капель о твердую поверхность необходимо осуществлять нагрев твердой подложки до температур выше кипения одного из компонентов состава, что позволяет увеличить площадь испарения практически в 20 раз.

10. Оптимальный угол для интенсификации дробления капель за счет соударения с разогретой твердой поверхностью составляет от 80 до 90°С.

В соответствии с перечнем рекомендаций составлена схема (рис. 13) применения комбинированных схем вторичного измельчения жидких и композиционных топлив в котельном оборудовании. Первый этап измельчения представляет распыление топлива при помощи группы форсуночных устройств. Они располагаются с двух сторон в два ряда. На основании рекомендации 1 угол расположения форсуночных устройств должен составлять от 60 до 90° относительно распылителя с противоположной стороны. На втором этапе новообразованные фрагменты после соударения аэрозольных потоков между собой, подвергались воздействию разогретых воздушных масс, т.е. капли интенсивнее прогреваются и разрушаются, что приводит к снижению поверхностного натяжения топлива практически на 30% (такой вывод показан во 2 рекомендации). Далее вторичные фрагменты попадают на разогретую твердую стенку, которая располагается под углом 90° к аэрозольному потоку (что соответствует рекомендации 10). В соответствие с рекомендацией 9 температура стенки должна быть выше температуры кипения жидкости. После соударения с твердой стенкой, новообразованные капли попадают в зону прогрева и происходит микро-взрывное измельчение. Также для повышения эффективности фрагментации капель жидких и композиционных топлив можно располагать различной формы преграды (например: ячеистая преграда; кольцевидная; преграда с цилиндрическими выпуклостями и др.). Такая комбинация методик вторичного измельчения приводит к росту площади испарения жидкости более чем в 100 раз и уменьшению размеров капель на 70-90%. Например, при реализации комбинации схем измельчения капель топлив, можно добиться уменьшения радиуса капли с 0.8 мм до 0.02 мм и увеличить отношения площадей свободной поверхности после и до измельчения с 5.8 до 100. Такое существенное уменьшение размеров капель топлив способствует снижению предельных температур зажигания на 5-15%, времен задержки зажигания – на 40-60%, повышает полноту выгорания топлива – 25-35%, снижает антропогенные газовые выбросы – 15-30%. Также за счет интенсивного измельчения капель отдельных компонентов в камерах сгорания можно обеспечить их интенсивное перемешивание с другими измельченными компонентами. Это особенно актуально при формировании высоковязких композиционных топлив, например, из воды, масел, угля и биомассы.

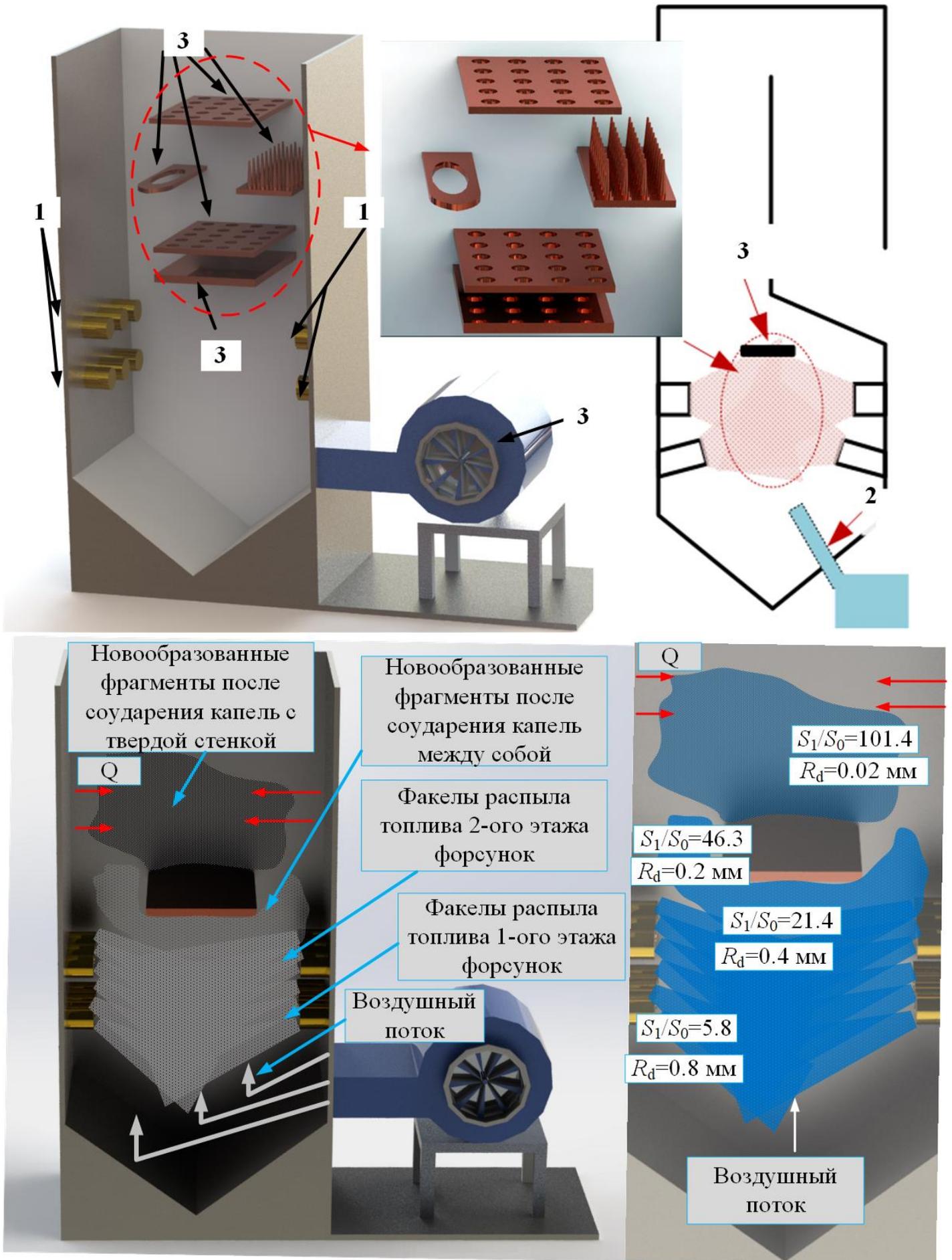


Рисунок 13. Схема расположения вспомогательных устройств для измельчения капель жидких и композиционных топлив: 1 – форсунок; 2 – нагнетатель воздуха; 3 – дополнительные элементы конструкции для измельчения капель топлив.

Основные результаты и выводы

1. Условия отскока, коагуляции, дробления и фрагментации сталкивающихся капель можно регистрировать достоверно при варьировании характеристик аэрозолей и газов в широких диапазонах, соответствующих энергетическим установкам. Выполнены экспериментальные оценки влияния углового и линейного параметров взаимодействия капель на частоту возникновения основных режимов взаимодействия с учетом доминирования влияния размеров и скоростей перемещения капель. Показано, что данные частоты могут быть применимы для прогнозирования условий интенсивного вторичного измельчения капель жидких и композиционных топлив в камерах сгорания энергетических установок.

2. Увеличение вязкости жидких и композиционных топлив (от 0.001 до 0.0063 Па·с) приводит к смещению границ дробления и разлета в сторону больших чисел Вебера ($We \approx 153$ и $We \approx 58$, соответственно) и снижению количества вторичных фрагментов с радиусом менее 0.15 мм практически на 40%.

3. Снижение поверхностного натяжения (от 0.07269 до 0.036 Н/м) топлив приводит уменьшению критических (переходных между режимами) чисел Вебера для дробления и разлета на 67% и 63%, соответственно, и к росту отношения площадей свободной поверхности капель практически на 20%. Снижение поверхностного натяжения жидкости создает условия для реализации синергетических эффектов, способствующим развитию цепных механизмов вторичного измельчения капель.

4. Снижение межфазного натяжения (от 0.04257 до 0.00341 Н/м) эмульгированных топлив позволяет получить большее количество вторичных фрагментов, чем у исходной эмульсии без эмульгатора практически на 70%. Т.е. введение в состав капли даже нескольких процентов по относительной объемной концентрации эмульгатора способствует существенной фрагментации.

5. По результатам выполненных экспериментов с использованием карт $\beta(We)$, $B(We)$, $We(Oh)$, $Re(Oh)$, $We(Ca)$ установлены диапазоны смещения переходных границ между четырьмя режимами взаимодействия однородных и неоднородных капель. Показан вклад угла атаки, соотношений размеров и скоростей движения, вязкости, плотности, поверхностного натяжения составов, их температуры нагрева, способствующей испарению и формированию вокруг капель паровой оболочки.

6. Для всех топливных композиций можно обеспечить реализацию каждого из четырех режимов взаимодействий. При этом данными режимами можно управлять за счет варьирования группы рассмотренных эффектов и факторов. Например, можно обеспечить интенсивное дробление капель топлив даже при относительно невысоких значениях We и Re за счет варьирования углов атаки, прицельный расстояний между каплями, компонентного состава жидкостей.

7. Наиболее перспективная комбинация схем вторичного измельчения капель для получения мелкодисперсного аэрозоля представляет собой соударения между собой капель или со стенкой, а затем нагрев образующихся жидкостных фрагментов до состояния вскипания и последующего микро-взрывного разрушения. При такой комбинации обеспечивается рост отношения S_1/S_0 более чем в 100 раз. В этом случае затрачена минимальная энергия на разогрев капель на втором этапе, и не требуются большие скорости взаимодействия в рамках первого этапа.

Основные публикации по теме диссертации

1. **Shlegel N. E.** Secondary atomization of firefighting liquid droplets by their collisions / Solomatin Y. S., Strizhak P. A., Shlegel N. E. // *Atomization and Sprays*, 2019, Vol. 29 - №. 5, p. 429-454.
2. **Shlegel N. E.** Comparing the integral characteristics of secondary droplet atomization under different situations / Strizhak P. A., Shlegel N. E., Tarlet D., Bellettre J. // *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2019, Vol. 108, Article number 104329, p. 1-11.
3. **Shlegel N. E.** Atomization of promising multicomponent fuel droplets by their collisions / Solomatin Y. S., Strizhak P. A., Shlegel N. E. // *Fuel*, 2019, Vol. 255, Article number 115751, p. 1-15.
4. **Shlegel N. E.** Recovery of waste-derived and low-grade components within fuel slurries / Vershinina K. Y., Strizhak P. A., Shlegel N. E. // *Energy*, 2019, Vol. 183, p. 1266-1277.
5. **Shlegel N. E.** Disruption of colliding liquid droplets with different surface geometries / Piskunov M. V., Strizhak P. A., Shlegel N. E. // *Powder Technology*, 2019, Vol. 355, p. 526-534
6. **Shlegel N. E.** Experimental research into the characteristics of child droplets formed due to collisions of liquid fragments in a gas / Solomatin Y. S., Strizhak P. A., Shlegel N. E. // *Powder Technology*, 2020, Vol. 363. p. 122-134.
7. **Shlegel N. E.** Energy analysis of secondary droplet atomization schemes / Antonov D. V., Strizhak P. A., Shlegel N. E., Tarlet D., Bellettre J. // *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2020, Vol. 116, Article number 104666, p. 1-10.
8. **Shlegel N.E.** Collisions of water droplets in the high-temperature air / Tkachenko P.P., Strizhak P.A., Shlegel N. E. // *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, 170, 121011.
9. **Shlegel N.E.** Experimental study of miscibility of liquids in binary droplet collisions / Tkachenko P.P., Volkov R.S., Strizhak P.A., Shlegel N. E. // *Chemical Engineering Research and Design*, 2021, 168, p. 1–12.
10. **Shlegel N. E.** Collisions Of Water Drops In A Gas-Vapor Environment At High Temperatures And Vapor Concentrations / Strizhak P. A., Shlegel N. E. // *Thermal Science*, 2021, 25 (5), pp. 3441-3451.

