

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Федоренко Романа Михайловича

«Вторичные фрагменты при микро-взрывном распаде двухжидкостных капель»

на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности **1.3.14** - Теплофизика и теоретическая теплотехника

Диссертация Федоренко Р.М. посвящена исследованию микро-взрывного распада многокомпонентных капель – это процесс, при котором исходные капли водно-топливных смесей дробятся на более мелкие вторичные фрагменты при вскипании воды в процессе ее нагрева по различным механизмам. Исследование физических условий и механизмов этого процесса **актуально** ввиду существенного роста темпа теплообмена с увеличением площади поверхности раздела газовой и жидкой фаз при дроблении исходных капель до размеров десятков микрон. Исследования, связанные с вторичным измельчением жидкостей с разным компонентным составом, до сих пор были сосредоточены на изучении условий, режимов и характеристик распада капель. Изучение последствий вторичного измельчения дочерних, и в том числе – двух-жидкостных капелек, дисперсности и структуры аэрозольного облака, остается важной задачей. Для использования этих эффектов в конкретных приложениях необходимо определить условия, при которых образуются вторичные фрагменты с требуемыми параметрами.

Эффекты вторичного распада двух-жидкостных капель применяются при переработке жидких углеводородов и в энергетике в технологиях сжигания жидких и композиционных топлив. В подобных приложениях для контроля темпа межфазного теплообмена и полноты сгорания жидких топлив требуется предсказание конечного дисперсного состава смеси и управление процессом микро-взрывного распыления. Добавлю, что применительно к двигателям присутствие перегретых паров воды в топливной смеси при определенных условиях оказывает промотирующее влияние, увеличивает теплосодержание рабочего тела и совершаемую им работу, а также улучшает экологические показатели процесса.

Сейчас данных по вторичному диспергированию при микро-взрывном распаде капель жидкостей недостаточно. Важные детали процесса, такие как дисперсность и компонентный состав вторичных фрагментов, сложно прогнозировать. Поэтому остается актуальным изучение характеристик микро-взрывного распада двух-жидкостных капель имеющимися и перспективными методами. Это возможно при дальнейшем развитии экспериментальной базы, программно-аппаратных комплексов с новыми системами регистрации и с привлечением математического моделирования процесса.

Цель диссертационной работы – определение характеристик вторичных фрагментов при микро-взрывном распаде двухжидкостных капель с несмешиваемыми компонентами по результатам экспериментальных и численных

исследований с применением высокоскоростной видеорегистрации, оптических методов, коммерческих и авторских программных кодов.

Решались следующие задачи:

1. Создание экспериментальных стендов и методик с высокоскоростной аппаратурой для регистрации микро-взрывного распада двух-жидкостных капель.
2. Определение размеров вторичных фрагментов и площади межфазной поверхности до и после распада при различных условиях подвода тепла к каплям.
3. Определение компонентного состава вторичных фрагментов при различном состоянии и способах нагрева исходных капель.
4. Изучение влияния коллективных эффектов при микро-взрывном распаде двух-жидкостных капель на характеристики конечного спрея.
5. Изучение влияния свойств жидкостей на характеристики спрея при микро-взрывном распаде.
6. Обобщение результатов исследований микро-взрывной фрагментации капель с применением безразмерных комплексов.
7. Разработка физических и математических моделей с использованием коммерческих и авторских программных кодов для предсказания свойств спрея при микро-взрывном распаде двух-жидкостных капель.

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения.

Во введении описано текущее состояние исследований, научная проблема и перспективы работ в данном направлении, определены цели и задачи исследования, научная новизна результатов и их практическая значимость.

Первая глава имеет обзорный характер и отражает известные результаты исследований вторичного диспергирования фрагментов микро-взрывного распада двух-жидкостных капель. Выделены основные газо-парокапельные и топливные технологии, для которых актуально изучение этих процессов, а также нерешенные задачи. Показано, что микро-взрывной распад является перспективным механизмом вторичного распада многокомпонентных капель при заданных расходах энергии, времени, и интегральных характеристик процесса. Отмечена тенденция исследований в этой области, направленная на изучение предельных условий микро-взрывного разрушения, механизмов и определяющих факторов.

Описана феноменологическая картина процесса, включающая основные стадии микро-взрывного распыла с характерными временами: 1) период задержки разрушения (первая стадия); 2) период разрушения вторичных фрагментов (вторая стадия). Известные модели описывают процессы в гетерогенной капле на первой стадии, но они не позволяют прогнозировать конечный состав спрея. В данной работе изучается вторая стадия процесса, причем, в центре внимания - скорости вторичных фрагментов, а также их дисперсный и компонентный состав.

В заключении к Первой главе отмечено, что на данный момент нет физических и математических моделей для достоверного описания последствий микро-взрывного распада капель жидкостей, а для понимания и прогнозирования характеристик зажигания и горения композиционных капель необходимы модели, позволяющие прогнозировать конечное состояние вторичных фрагментов: размеры, скорости, траектории движения и компонентный состав.

Вторая глава охватывает все аспекты опытов по микро-взрывному распылу двух-жидкостных капель: экспериментальные стенды и методики, планирование и постановку экспериментов, обработку результатов, анализ данных и построение физической модели процесса. Основной задачей экспериментов было определение характеристик вторичных фрагментов при частичном (паффинг) и полном (микро-взрыв) распаде капель в условиях совокупности определяющих факторов: темп нагрева, температура газа, тип и концентрация компонентов капель и др. Изучались двух-жидкостные капли с выраженной границей «вода/топливо» и эмульгированные топлива. Компонентами капель были вода, водные растворы поверхностно-активных веществ (ПАВ) с концентрацией до 1%, дизельное топливо, керосин, рапсовое, таловое и трансформаторные масла.

Исследованы следующие схемы нагрева: одиночные капли в потоке разогретых газов, капли на разогретой подложке, капли в высокотемпературной пламенной зоне, группа капель в потоке разогретых газов. Детально описана генерация двух-жидкостных капель и ввод капель в измерительный объем. Столь же детально описано приготовление эмульсий. Температура газа или поверхности регистрировалась малоинерционными термopами и модулем сбора данных National Instruments.

Распад капли регистрировался высокоскоростной видеосъемкой, а обработка изображений проводилась коммерческими программами (Actual Flow, DaVis), а также авторскими кодами в Matlab. Регистрировался режим распада исходной капли и ее размеры, количество, размеры и скорости вторичных фрагментов, площадь поверхности жидкости до распада и после. Регистрация компонентного состава вторичных фрагментов выполнена видеокамерой по методике «*Laser-Induced Fluorescence*» с непрерывным источником в схеме лазерного ножа для активации флуоресцентного красителя.

Идентификация компонент жидкости проводилась по разнице их светимости в лазерном луче. Например, удачно использована разница светимости Rhodamine B в воде (4-140 ед) и рапсового масла (160-400 ед) в топливной оболочке двух-жидкостной капли, светимость усреднялась по 50–1000 кадрам. Регистрировались светимости исходных капель и вторичных фрагментов. На качественном уровне установлен ряд закономерностей процесса: максимальное и минимальное количество вторичных фрагментов образуется при кондуктивном и радиационном нагреве соответственно; наименьшие размеры фрагментов рапсового масла зарегистрированы при его минимальной концентрации.

Вторая часть **Главы 2** содержит и другие частные выводы, что естественно для многопараметрической задачи, как эта. Количественные данные экспериментов, подробно отраженные в графиках, вкуче с частными выводами и наблюдениями легли в основу предлагаемой физической модели. Ее феноменологическая канва включает известную стадию паффинга с локальным образованием и выходом отдельных паровых пузырьков и - собственно стадию микровзрыва. Для количественного разделения этих режимов в работе предложен безразмерный критерий F_{cd} , позволяющий учесть затраты энергии и времени для прогрева двух-жидкостной капли до микро-взрывного распада, а также времени образования вторичных фрагментов и соотношения площадей поверхности

жидкости до и после распада. Временные характеристики процесса, режим разрушения и размеры продуктов распада капель надежно регистрируются в экспериментах, и на конечной диаграмме представлены значения F_{cd} из экспериментов. Показано, что для микро-взрыва $F_{cd} > 1000$, для паффинга $F_{cd} < 50$, в области $50 > F_{cd} > 1000$ - переход режимов от паффинга к микро-взрыву.

Несомненным достоинством работы является учет погрешностей всех видов измерений, обобщенных в отдельном параграфе 2.5. Важный вывод к Главе 2 – это рекомендации по использованию этих исследований при разработке технологий с вторичным измельчением капель жидкостей.

В Третьей главе представлена математическая модель разрушения вторичных фрагментов микро-взрывного распада двухкомпонентных капель, построенную на авторских и коммерческих программных кодах. Считается, что вода в капле достигла перегрева, а на границе «вода/топливо» образовалась паровая прослойка. Применялся подход Эйлера с неподвижной равномерной расчетной сеткой, а межфазная граница отслеживалась непрерывными эйлеровыми маркерами, что реализовано в методе VOF. А именно, жидкая и газовая фазы считаются единой средой, а пространственное распределение фаз определяется функцией маркера $F(x,y,z,t)$. Объемная доля жидкой фазы в расчетной ячейке принимается равной $F(x,y,z,t) = 0$, если ячейка пустая; $F(x,y,z,t) = 1$, если ячейка заполнена жидкой фазой; $0 < F(x,y,z,t) < 1$, если через ячейку проходит граница раздела фаз. Перемещение свободной границы вычислялось из уравнения переноса объемной доли жидкой фазы в ячейке с соответствующим уравнением неразрывности фаз в модели VOF.

Учитывались реальные физические условия, взятые из экспериментов (степень перегрева воды при скорости нагрева ~ 300 К/с, степень перегрева ~ 15 К). Проведено морфологическое сравнение результатов экспериментов и численного моделирования по типичным кадрам микро-взрывного распада двухжидкостной капли с рапсовым маслом. Показано, что стадии распада капель в эксперименте и в расчете на качественном уровне согласуются.

Изучалась зависимость размеров вторичных фрагментов от температуры газа и влияние смещения водяного ядра относительно центра капли. Установлено, что это фактор приводит к росту среднего размера вторичных фрагментов. Такая же тенденция обнаружена при несферичности исходных капель, что важно для реальных капель. Сформулированы рекомендации по использованию результатов для разработки технологических решений в области вторичного измельчения капель жидкостей. Для применения результатов в промышленных условиях разработан авторский программный код, который планируется развивать для учета коллективных эффектов взаимодействия капель в спрее.

В Заключении сформулированы основные выводы диссертации.

Следует особо отметить **новые результаты**, полученные автором.

1. В экспериментах получены распределения вторичных фрагментов по размерам как результат совокупности факторов, а также в зависимости от наиболее важных из них.

2. Построена карта режимов диспергирования водно-топливных капель, где выделены условия формирования мелкодисперсного спрея.

3. Зарегистрирован компонентный состав вторичных фрагментов, размеры капель воды и горючей жидкости.

4. Показано, что максимальное измельчение двух-жидкостных капель обеспечивается при минимальном поверхностном натяжении и вязкости несмешиваемых компонентов.

5. Микро-взрыв группы капель показал влияние вторичных фрагментов друг на друга и на исходные капли - «коллективные» эффекты. Предложена физическая модель коллективных эффектов при каскадном распаде капель.

6. Разработаны физические и математические модели микро-взрыва составной капли с учетом влияния степени перегрева границы жидкостей и роста давления вблизи нее.

7. Найдены рациональные условия распада неоднородных капель при варьировании концентрации компонентов, температуры и схемы нагрева. Сделан вывод о перспективах микро-взрывного распада с учетом зависимостей задержки зажигания топлив и скоростей испарения от температуры.

Достоверность полученных в диссертации результатов основана на применении апробированных экспериментальных и численных методов. Достоверность результатов численного моделирования подтверждается морфологическим сравнением эволюции капли с видеофиксацией в эксперименте. Достоверность экспериментальных результатов подтверждается метрологическим анализом, повторяемостью результатов в серии экспериментов и сравнением независимых методов исследования.

В качестве замечаний отмечу следующее:

1) В различных постановках экспериментов с дроблением капель применяются термоанемометры фирмы NI, но нет пояснений, каковы особенности этого метода в многофазных средах.

2) В тексте диссертации имеется некоторое противоречие в частных выводах. На стр. 67: «Наименьшие размеры вторичных фрагментов рапсового масла зарегистрированы при его минимальной концентрации», что логично. А на стр.68: «...эксперименты показали, что оптимальным, с точки зрения достижения минимальных размеров вторичных фрагментов, является состав с минимальной концентрацией негорючего компонента (доля воды не более 10 об.%)». Это противоречие встречается и в автореферате соответственно на стр.12 и стр.13.

3) В заключении к **Главе 3** сказано о перспективе развития авторского кода (UDF) численного моделирования распыла составных капель для учета коллективных эффектов. Вопрос: какие именно эффекты планируется учитывать кроме тех, что изложены в работе [135] 2023 года в «International Journal...».

Высказанные замечания и вопросы не влияют на общий положительный вывод о ценности диссертационной работы и справедливости сформулированных в ней научных положений.

Совокупность применяемых методов и достигнутых результатов позволяет квалифицировать работу как **соответствующую специальности 1.3.14 - Теплофизика и теоретическая теплотехника.**

Научные положения, сформулированные в диссертации, достаточно обоснованы и не вызывают сомнений. Результаты диссертации опубликованы в

ведущих рецензируемых научных изданиях и получили достаточную апробацию на Всероссийских и международных научных конференциях.

Автореферат точно и полно отражает содержание диссертации.

Считаю, что диссертация отвечает критериям Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Федоренко Роман Михайлович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности **1.3.14** - «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

Доктор физико-математических наук
(01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы)
Старший научный сотрудник лаборатории
«Оптические Методы Диагностики Газовых Поток»
Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Института теоретической и
прикладной механики им. С.А. Христиановича
Российской академии наук (ИТПМ СО РАН)

Поплавский Сергей Владимирович
05.02.2024

Подпись с.н.с., д.ф.-м.н. Поплавского Сергея Владимировича заверяю
Ученый секретарь ИТПМ СО РАН
к.ф.-м.н Ю.В. Кратова



Адрес: 630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, 4/1,
тел.: +7-913-762-07-86,
e-mail s.poplav@itam.nsc.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича
Российской академии наук (ИТПМ СО РАН).

Я, Поплавский Сергей Владимирович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Федоренко Романа Михайловича, и их дальнейшую обработку.