

16/215 № 01.02.2024

Кому: Учёному секретарю диссертационного совета 24.1.129.01
при Федеральном государственном бюджетном
учреждении науки Институте теплофизики им. С. С.
Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии
наук

д.ф.-м.н., профессору РАН Терехову Владимиру
Викторовичу

Куда: 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева,
д. 1. (e-mail: dissovvet@itp.nsc.ru).

доктор физико-математических наук, профессор

01 февраля 2024 года



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А.Соловьева» на диссертационную работу Федоренко Романа Михайловича по теме «Вторичные фрагменты при микро-взрывном распаде двухжидкостных капель», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Актуальность темы

Требования по ограничению выбросов загрязняющих веществ при сжигании жидких углеводородных топлив и увеличение соответствующих штрафных санкций привели к необходимости разработки новых технологий организации горения в камерах сгорания. Интегральные характеристики таких устройств и эффективность горения в целом определяются процессами распыла топлива и смешения компонентов топливовоздушной смеси. Если при использовании газообразных видов топлива задача решается интенсификацией массообменных процессов в зоне частичного или полного предварительного смешения, то в случае применения жидкого топлива она состоит в необходимости полного испарения жидкой фазы в максимально короткой пространственной области, ограниченной сечением впрыска топлива и квазистационарным фронтом пламени, стабилизированным в первичной зоне камеры сгорания на границе приосевой зоны обратных токов. Для этого необходимо создать теплофизические условия, приводящие к многократному дроблению волнообразных

жгутов топливных струй, жидкой пелены и отдельных капель на более мелкие вторичные фрагменты. При этом определяющую роль играет отношение площади поверхности диспергированной жидкой фазы к её объёму, от которого зависит эффективная скорость испарения топлива и среднее время протекания предпламенных процессов. Комплекс требований, предъявляемых к форсункам, работающим в составе энергетических устройств, включает обеспечение таких характеристик как заданная степень равномерности распределения массы топлива по объёму факела распыла, затраты энергии на диспергирование единицы массы жидкой фазы с целью получения капель требуемого размера и уровня потерь полного давления в подводящих магистралях, коллекторах и топливных форсунках.

Перспективной технологией организации распыла является микро-взрывная фрагментация капель жидкостей в многофазных и многокомпонентных топливных потоках. Её практическая реализация требует детального изучения механизма взрывного распада вторичных капель. Представления об этих процессах можно получить с использованием бесконтактных оптических методов (PIV, PTV, IPI, SP, PLIF, LIP, Two-color LIF и др.) и высокоскоростных камер. Вместе с тем, большинство исследований в области микро-взрывного измельчения капель неоднородных жидкостей посвящено изучению предельных условий микро-взрывной фрагментации, механизмов и влияющих факторов. Основное влияние на характеристики микро-взрывного измельчения оказывают такие факторы как температура внешней газовой среды, концентрация растворенных в жидкости газов, размер дисперсной фазы капель воды в водо-топливных эмульсиях, а также соотношение концентраций компонентов, концентрация и размеры твёрдых частиц. Неизученными остаются характеристики образующихся при микро-взрывной фрагментации вторичных фрагментов, их размеры, количество, скорости движения, компонентный состав.

Автором выполнено определение характеристик вторичных фрагментов при микро-взрывном распаде двухжидкостных капель с несмешиваемыми компонентами по результатам экспериментальных и численных исследований с применением высокоскоростной видеорегистрации, бесконтактных оптических методов, коммерческих и авторских программных кодов.

Таким образом, диссертационная работа Федоренко Романа Михайловича, посвящённая изучению вторичных фрагментов при микро-взрывном распаде двухжидкостных капель, выполнена, безусловно, на актуальную тему.

Содержание диссертации, её цель, задачи, положения выносимые на защиту **соответствуют заявленной научной специальности** и её направлениям исследования по п.1 – «Фундаментальные, теоретические и экспериментальные исследования молекулярных и макросвойств веществ в твердом, жидком и газообразном состоянии для более глубокого понимания явлений, протекающих при тепловых процессах и агрегатных изменениях в физических системах», п.8 – «Численное и натурное моделирование теплофизических процессов в природе, технике и эксперименте, расчёт и проектирование нового теплотехнического оборудования».

Научная новизна и новые результаты

В диссертационной работе автором получены новые экспериментальные данные и теоретически описаны новые физические эффекты. Установлены характеристики вторичных фрагментов при микро-взрывном распаде двухжидкостных капель с несмешиваемыми компонентами при различных условиях подвода тепла и с доминированием различных форм теплообмена. С применением разработанных экспериментальных методик на базе высокоскоростной регистрирующей аппаратуры, панорамных оптических методов диагностики потоков - анемометрии по изображению частиц, плоскостной лазерно-

индуцированной флуоресценции и других. В результате установлены распределения размеров и скоростей вторичных фрагментов при микро-взрывном распаде двухжидкостных капель, а также их компонентный состав. Установлено влияние состава и свойств компонентов исходной капли на характеристики вторичных фрагментов при микро-взрывном распаде. Определено влияние вязкости и поверхностного натяжения жидких компонентов исходных капель на характеристики вторичных фрагментов. Выделены значительные коллективные и каскадные эффекты совместного влияния исходных капель в спреях на характеристики их микро-взрывного распада. Проведено сравнение характеристик вторичных фрагментов при реализации различных режимов микро-взрывного распада. Определены характерные значения соотношений площадей поверхности испарения жидкости после и до микро-взрывного распада двухжидкостных капель. Построены карты режимов фрагментации с применением безразмерных комплексов.

Достоверность полученных результатов

Достоверность основных положений и результатов работы обусловлена корректным использованием законов газодинамики и теории двухфазных течений, применением для проведения экспериментальных исследований поверенного измерительного оборудования и согласованием результатов с данными других авторов, опубликованными в литературе.

Теоретическая и практическая ценность работы

обусловлена тем, что полученные в диссертационной работе новые результаты дополняют и расширяют существующие знания о структуре газочапельных течений. Полученные результаты экспериментов и численного моделирования, сформулированные заключения и выводы, обобщённые карты режимов фрагментации в безразмерных координатах являются информационной базой для разработки перспективных высокотемпературных газопарокапельных технологий, а также совершенствования и развития существующих методов распыла топлива. Полученные данные могут быть использованы для повышения эффективности поршневых и газотурбинных двигателей, энергетического оборудования.

Общая характеристика структуры и содержания диссертации

Диссертационная работа изложена на 178 листах основного машинописного текста, содержит 56 рисунков, 5 таблиц и список использованных и опубликованных работ из 183 наименований. Материалы диссертации изложены более чем в 20 печатных работах, в т.ч. 4 статьях в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК. Основные результаты исследований в достаточной степени апробированы и доложены на научных конференциях и семинарах.

Диссертация выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск.

Работа изложена техническим языком. Список используемых источников отражает состояние вопроса, рассмотренного в диссертации. По объёму и содержанию автореферат и диссертация отвечают требованиям к оформлению кандидатских диссертаций.

Во введении автором обоснована актуальность темы диссертации, поставлена цель и задачи исследований, приведена научная новизна, теоретическая и практическая значимость, представлены основные положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации работы.

В первой главе соискатель выполнил анализ современного состояния достижений и проблем в исследуемой области. Представлен обзор научных работ, направленных на исследования процессов вторичного измельчения. Проанализированы известные результаты экспериментальных и теоретических исследований характеристик вторичных фрагментов при микро-взрывном распаде неоднородных капель. Рассмотрены особенности характеристик вторичных фрагментов при микро-взрывной фрагментации неоднородных капель. Отмечено, что микро-взрывная фрагментация является перспективным механизмом вторичного измельчения многокомпонентных капель, с точки зрения стабильности реализации, требуемых расходов энергии и времени и интегральных характеристик. В результате микро-взрывного распада можно получить мелкодисперсный аэрозоль с размерами вторичных фрагментов менее нескольких десятков микрометров. Автор показал, что наибольшее влияние на характеристики процессов микро-взрывного распада оказывают схема подвода энергии и темп нагрева, температура внешней среды, реологические свойства жидкости, схемы формирования родительских капель, коллективные эффекты, возникающие при движении капель в составе спрея. Сделан вывод о том, что существующие модели с высокой точностью описывают процессы, протекающие в гетерогенной капле при её нагреве до распада, однако не позволяют прогнозировать последствия микро-взрывной фрагментации. Роман Михайлович предлагает разработать прогностические модели, позволяющие прогнозировать такие важные характеристики вторичных фрагментов как размеры, скорости и траектории движения, компонентный состав. Наиболее перспективным, по его мнению, представляется создание унифицированной математической модели, позволяющей одновременно прогнозировать как времена задержки распада сложных топливных композиций, так и последствия распада. С этим выводом вполне можно согласиться.

Во второй главе приведено описание созданных экспериментальных стендов; разработанные методики проведения исследований и обработки полученных результатов; оценка погрешностей результатов выполненных измерений. Представлены результаты экспериментальных исследований влияния температуры внешней среды, схемы и темпа нагрева, концентрации горючих жидкостей с разными теплофизическими и реологическими свойствами, начальных размеров капель, а также коллективных эффектов на характеристики вторичных фрагментов при микро-взрывном распаде неоднородных капель. В результате выполненных экспериментов Роман Михайлович определил характеристики вторичных фрагментов капель: размеры, скорости движения, компонентный состав, отношение площадей поверхности жидкости после и до распада при реализации частичного и полного распада капель, а также изучил влияние совокупности факторов на отмеченные характеристики. При проведении экспериментов в качестве компонентов родительских капель использовались: вода, водные растворы с добавлением поверхностно-активных веществ (ПАВ), дизельное топливо, керосин, рапсовое, таловое и трансформаторные масла. Глава содержит обширный набор экспериментальных исследований, в результате которых автор установил, что наибольшее влияние на образование вторичных фрагментов оказывали тепловой поток и схема нагрева, а также начальный размер родительской капли. Средние размеры вторичных фрагментов варьировались в широком диапазоне 50–150 мкм, минимальные достигали 5 мкм, максимальные – 300 мкм. При сравнении суммарного объёма образующихся вторичных фрагментов и исходной родительской капли автором сформулирован вывод о том, что микро-взрывной распад способствует получению вторичных фрагментов с характерными размерами менее 5 мкм. Роман Михайлович показал, что максимальное количество вторичных фрагментов имеет место опытах с нагревом исходных капель на разогретой твёрдой поверхности, а минимальное при нагреве в трубчатой муфельной печи. Автором

установлен компонентный состав вторичных фрагментов, формирующихся при микро-взрывном распаде двухжидкостных капель. Показано, что наибольшее влияние на размеры вторичных фрагментов оказывает концентрация горючей жидкости и схема нагрева. Например, при нагреве в пламени размеры вторичных фрагментов рапсового масла отличались от аналогичных характеристик в муфельной печи на 35%. Установлены существенные отличия по компонентному составу вторичных фрагментов при разных механизмах подвода тепла. Показано, что наибольшую эффективность, с точки зрения вторичного измельчения, имеет схема с нагревом двухжидкостных капель в пламени. Автором установлены коллективные эффекты взрывной фрагментации, которые реализуются при нагреве совокупности двухжидкостных капель. Показано, что первые по направлению движения потока разогретого воздуха капли фрагментируют с формированием более мелкого аэрозоля. За счёт варьирования расстояния между последующими каплями, т.е. дисперсности капель в аэрозольном облаке автором показана возможность управления размерами вторичных фрагментов от каждой из капель. Установлено, что при расположении исходных капель на расстоянии более 8–10 радиусов относительно друг друга размеры вторичных фрагментов от каждой из капель практически не отличаются. При большей относительной плотности расположения исходных капель топлив между собой выявлены эффекты взаимодействия исходных и вторичных капель между собой. В результате обобщения полученных экспериментальных данных установлены наиболее рациональные условия измельчения двухжидкостных капель в условиях варьирования размеров, свойств родительских капель, концентрации компонентов, температуры и схемы нагрева.

В третьей главе диссертационной работы автором представлены разработанные математические модели с использованием собственных и коммерческих программных кодов. Сформулированы рекомендации по использованию результатов теоретических исследований в образовательном процессе, при проведении научных исследований и разработке технологических решений в области вторичного измельчения капель жидкостей. Романом Михайловичем разработана математическая модель микро-взрывного распада двухжидкостной капли, позволяющая прогнозировать средний размер вторичных фрагментов с использованием критерия максимального избыточного давления в паровой прослойке, соответствующего давлению насыщенного пара при температуре перегрева. Разработанные автором модели позволяют с достаточной степенью достоверности воспроизводить результаты экспериментов и в широком диапазоне параметров двухжидкостных капель и греющей среды. В главе автором сформулированы гипотезы, объясняющие отличия теоретических и экспериментальных значений характеристик микро-взрывного разрушения капель. С использованием полученных результатов исследований обоснованы перспективные направления развития моделей микро-взрывного распада капель жидкостей для их применения при разработке технологий вторичного измельчения жидкостей. Полученные результаты теоретических исследований могут быть использованы при оптимизации технологий впрыска перспективных жидких топлив в камеры сгорания двигателей и энергетических установок. Они позволяют на практике существенно увеличить площадь поверхности испарения топлив и, как следствие, тепловыделение в единицу времени и удельную тепловую мощность энергетических устройств.

Опубликованные автором статьи, в полной мере, отражают содержание диссертации.

Замечания и пожелания

1. При проведении экспериментов капли находились на держателе из нихромовой проволоки. Как при различных условиях теплообмена теплопроводность держателя будет влиять на нагрев капель? Проводился ли анализ влияния наличия держателя на режимы микро-взрывного распада?
2. В диссертации сказано, что для проведения экспериментальных исследований был спланирован многофакторный эксперимент, однако, в работе не приводится его описание, не представлен план эксперимента и матрица планирования.
3. Исследованные способы нагрева капель характеризуются разной интенсивностью теплообмена и временем нагрева капли, что влияет на распределения вторичных фрагментов по размерам. При этом, автор не анализирует влияние темпа нагрева на распад капель при неизменном способе нагрева, что может быть существенным для понимания физики процесса.
4. Неясно, как обеспечивалась равномерность толщины плёнки топлива по периметру капли.
5. Не приведено сопоставление полученных результатов с данными других авторов.
6. В работе использованы современные бесконтактные методы диагностики потоков «Laser-Induced Fluorescence» (LIF), «Particle Tracking Velocimetry» (PTV) и «Shadow Photography» (SP) для определения размеров и скоростей вторичных фрагментов, а также компонентного состава капель. При этом в тексте работы не приведена оценка неопределённости измерения этих величин.
7. Анализ фотографий позволяет сделать вывод, что микровзрыв происходит и в водяном ядре капли, в тоже время в разработанной математической модели микро-взрывного распада двухжидкостной капли это не учитывается.

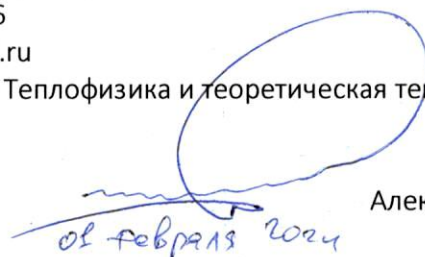
Заключение

Приведённые замечания не влияют на общую положительную оценку диссертации Федоренко Романа Михайловича, в которой решена актуальная научная задача исследования вторичных фрагментов при микро-взрывном распаде двухжидкостных капель, имеющая существенное значение для развития физической отрасли знания и физико-математических наук. Работа выполнена на высоком методическом и научном уровне, является законченной в рамках поставленных задач, полностью соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации, оба документа изложены логично и чётко. Диссертационная работа «Вторичные фрагменты при микро-взрывном распаде двухжидкостных капель» удовлетворяет требованиям и критериям, установленным п.п. 9 – 14 Положения о присуждении учёных степеней, утверждённого Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842 (в действующей редакции), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор Федоренко Роман Михайлович, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Отзыв обсуждён на заседании кафедры «Общая и техническая физика» ФБГОУ ВО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева» 28.12.2023 (протокол №4). На заседании присутствовало 10 человек. Результаты голосования: за – 10 против – 0, воздержались – 0.

Доктор технических наук,
и.о. директора института авиационных технологий и
инженерной физики, профессор кафедры общей и технической
физики ФБГОУ ВО «Рыбинский государственный
авиационный технический университет имени П.А. Соловьева»,
телефон: +7-920-100-84-26
e-mail: marialex2004@mail.ru
специальность: 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника



Александр Игоревич Гурьянов

Кандидат технических наук,
заведующий кафедрой общей и технической
физики ФБГОУ ВО «Рыбинский государственный
авиационный технический университет имени П.А. Соловьева»,
телефон: +7-920-102-18-68
e-mail: serveret@yandex.ru
специальность: 05.04.12 – Турбомашины и комбинированные турбоустановки



Сергей Владимирович Веретенников

Мы, Гурьянов Александр Игоревич и Веретенников Сергей Владимирович, даём согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Федоренко Романа Михайловича, и их дальнейшую обработку.

ФБГОУ ВО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева», 152934, Ярославская область, г. Рыбинск, ул. Пушкина, д. 53 (ФГБОУ ВО РГТУ имени П.А. Соловьева), Тел. +7 4855 23 97 22, факс: +7 4855 21 39 64, rector@rsatu.ru, www.rsatu.ru

