



УТВЕРЖДАЮ
Директор ИТ СО РАН
академик РАН Д.М. Маркович

Маркович
» октябрь 2023г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе
Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН)

Диссертация на соискание степени кандидата физико-математических наук «Вторичные фрагменты при микро-взрывном распаде двухжидкостных капель» выполнена в Научно-образовательном центре И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

В период подготовки диссертации с 2021 по н.в. Федоренко Роман Михайлович обучается в аспирантуре федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по направлению подготовки 03.06.01 «Физика и астрономия».

Справка о сдаче кандидатских экзаменов по истории и философии науки (физико-математические науки), иностранному языку (английский) и специальности 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника выдана в 2023 г. федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Научный руководитель – Стрижак Павел Александрович, доктор физико-математических наук, профессор, основное место работы: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Инженерная школа энергетики, НОЦ И.Н. Бутакова.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Цель работы

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.

Актуальность темы

Вторичное измельчение (в режиме частичной и полной фрагментации) капель в многофазных и многокомпонентных топливных потоках является одним из перспективных подходов к развитию технологий, способствующих стабилизации распыления топлива в камере сгорания, минимизации расхода топлива, повышению динамических характеристик горения, снижению антропогенных выбросов, уменьшению износа оборудования. Микро-взрывной распад позволяет обеспечить дробление капель многокомпонентных топлив с начальным диаметром 1...3 мм до уровня нескольких десятков микрон. Благодаря чему можно кратно увеличить площадь поверхности испарения и химического реагирования.

В последние годы исследования, связанные с распылением жидкостей с разным компонентным составом, сосредоточены на изучении предельных условий, режимов и характеристик распада неоднородных капель. Изучение последствий вторичного измельчения неоднородных капель жидкостей, таких как размеров вторичных фрагментов и заполненного ими аэрозольного облака, скоростей движения, энергий и компонентного состава является ещё одной важной задачей при изучении закономерностей вторичного измельчения. Для применения данных эффектов в различных технологиях необходимо определить условия, при которых образуются вторичные фрагменты с необходимыми размерами и скоростями движения. Эффекты вторичного измельчения находят активное применение в таких технологиях как сжигание жидких топлив и топливных смесей в камерах сгорания двигателей и теплогенерирующих установок; выпаривание и сушка растворов, суспензий и эмульсий; термическая и огневая очистка жидкостей от нерегламентированных примесей; тушение пожаров с применением специализированных составов и др. Большинство исследований в области микро-взрывного измельчения капель неоднородных жидкостей посвящено изучению предельных условий микро-взрывной фрагментации, механизмов и влияющих факторов. При этом из поля зрения упускается

важность изучения характеристик образующихся при микро-взрывной фрагментации вторичных фрагментов. В настоящее время опубликовано немного результатов исследований характеристик вторичных фрагментов при микро-взрывном распаде, особенно если учитывать схемы нагрева с конвективным, радиационным и смешанным теплообменом. Компонентный состав вторичных капель чрезвычайно сложно прогнозировать с высокой достоверностью. Это связано с ограничениями имеющихся экспериментальных методик и стендов, программно-аппаратных комплексов, необходимостью привлечения специализированных следящих систем и добавок-красителей.

Личный вклад автора

Автор проводил лично и непосредственно участвовал в проведении экспериментальных и теоретических исследований, включая отладку экспериментальных методик и вычислительных кодов, проведении численных расчетов, участвовал в совместных обсуждениях при получении результатов исследований. Автором подготовлены публикации и доклады, сформулированы основные защищаемые результаты, положения и выводы.

Поставлены и решены следующие задачи:

1. Разработаны методики экспериментальных исследований характеристик вторичных фрагментов при микро-взрывной фрагментации двухжидкостных капель с несмешиваемыми компонентами при интенсивном нагреве с варьированием в широких диапазонах параметров исследуемых процессов: температуры внешней среды, начальных размеров капель, концентраций и типа компонентов и др.

2. Спроектированы и созданы экспериментальные стенды с применением высокоскоростной регистрирующей аппаратуры и бесконтактных оптических методов для изучения характеристик вторичных фрагментов при микро-взрывном распаде двухжидкостных капель.

3. Разработаны физические и математические модели для прогнозирования последствий микро-взрывного распада двухжидкостных капель с использованием коммерческих и авторских программных кодов.

4. Установлены зависимости интегральных характеристик вторичных фрагментов при микро-взрывном распаде двухжидкостных капель от совокупности основных параметров системы (температура греющей среды, вид и концентрация горючей жидкости, способ нагрева исходных капель, размер и способ формирования исходных

капель и др.) по результатам экспериментальных исследований и численного моделирования.

5. Установлены размеры вторичных фрагментов, их количество и компонентный состав, вычислены площади поверхности испарения жидкости после и до распада при различных условиях подвода тепла к исходным каплям.

6. Установлено влияние коллективных и каскадных эффектов на характеристики вторичных фрагментов при микро-взрывном распаде двухжидкостных капель.

7. Изучено влияния свойств вязкости и поверхностного натяжения жидкостей на характеристики вторичных фрагментов при микро-взрывном распаде.

8. Разработаны рекомендации по использованию результатов фундаментальных научных исследований при совершенствовании перспективных высокотемпературных газопарокапельных технологий (топочные устройства энергетических установок, дизельные двигатели, технологии термической очистки жидкостей, пожаротушение и др.).

Достоверность полученных результатов подтверждается оценкой систематических и случайных погрешностей измерений, удовлетворительной повторяемостью результатов экспериментов при идентичных начальных параметрах системы, а также использованием современного высокоточного оборудования. Также выполнено сравнение части полученных экспериментальных и численных результатов с известными теоретическими и экспериментальными заключениями других авторов.

Научная новизна изложенных в работе результатов заключается в следующем: экспериментально и теоретически установлены размеры, количество, скорости движения и компонентный состав вторичных фрагментов при микро-взрывном распаде двухжидкостных капель при различных условиях подвода тепла – с доминированием кондуктивного, радиационного, конвективного и смешанного теплообмена. С применением разработанных экспериментальных методик на базе высокоскоростной регистрирующей аппаратуры и бесконтактных оптических методов диагностики потоков установлены распределения размеров и скоростей вторичных фрагментов при микро-взрывном распаде двухжидкостных капель, установлен компонентный состав вторичных фрагментов, образующихся в результате микро-взрывного распада двухжидкостных капель. Установлено влияние состава и свойств компонентов исходной капли (двухжидкостная неперемешанная капля или эмульсия) на количество и размеры вторичных фрагментов при микро-взрывном распаде. Определено влияние вязкости и поверхностного натяжения жидких компонентов исходных капель на количество и

размеры вторичных фрагментов. Выделены значительные коллективные и каскадные эффекты совместного влияния исходных капель в спреях на характеристики их микро-взрывного распада. Выделены отличия количества и размеров вторичных фрагментов при реализации различных режимов микро-взрывного распада (микро-взрыв, паффинг). Определены характерные значения соотношений площадей поверхности испарения жидкости после и до микро-взрывного распада двухжидкостных капель.

Научная и практическая ценность

Полученные результаты экспериментов и сделанные заключения являются информационной базой для разработки перспективных высокотемпературных газопарокапельных технологий, а также совершенствования и развития существующих. К ним относятся: топливные технологии, а именно топочные устройства и двигатели внутреннего сгорания (использование новых видов топлива на основе воды и топлива для совместного улучшения экологических, энергетических и экономических характеристик); термическая или огневая очистка воды; пожаротушение с применением двухжидкостных капель (за счет реализации микро-взрывной фрагментации капель жидкости и последующего образования аэрозоля, способствующих увеличению площади покрытия очага горения и вытеснению окислителя).

Основные публикации автора по материалам диссертации

Результаты диссертационных исследований опубликованы более чем в 20 печатных работах, в том числе 4 – в журналах из списка, рекомендованного ВАК РФ: «Горение и взрыв», «Письма в Журнал технической физики» («Technical Physics Letters»), «Journal of Engineering Physics and Thermophysics», более 10 статей в высокорейтинговых журналах (входят в 1–2 квартили Web of Science)

Статьи в журналах из перечня рецензируемых научных изданий для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискания ученой степени кандидата наук:

1. Antonov D.V., Fedorenko R.M., Strizhak P.A. Child droplets produced by micro-explosion and puffing of two-component droplets // Applied Thermal Engineering. – 2020. – V. 164. – P. 114501 (входит в базы данных Scopus и WoS).

2. Antonov D.V., Kuznetsov G.V., Fedorenko R.M., Strizhak P.A. Micro-explosion of a two-component droplet: How the initial temperature of the water core affects the breakup conditions and outcomes // Powder Technology. – 2021. – V. 382. – P. 378-387 (входит в базы данных Scopus и WoS).

3. Antonov D.V., Kuznetsov G.V., Fedorenko R.M., Strizhak P.A. Ratio of water/fuel concentration in a group of composite droplets on high-temperature heating // *Applied Thermal Engineering*. – 2022. – V. 206. – P. 118107 (входит в базы данных Scopus и WoS).
4. Antonov D.V., Kuznetsov G.V., Strizhak P. A., Fedorenko R. M. Micro-explosion of droplets containing liquids with different viscosity, interfacial and surface tension // *Chemical Engineering Research and Design*. – 2020. – V. 158. – P. 129–147 (входит в базы данных Scopus и WoS).
5. Antonov D.V., Fedorenko R.M., Strizhak P.A. Collective effects during the formation of child droplets as a result of puffing/micro-explosion of composite droplets // *International Journal of Thermal Sciences*. – 2023 – V. 183. P. 107858 (входит в базы данных Scopus и WoS).
6. Antonov D.V., Fedorenko R.M., Strizhak P.A. Micro-explosion and puffing of a group of two-component droplets // *Applied Thermal Engineering*. – 2020. – V. 181. P. 116023 (входит в базы данных Scopus и WoS).
7. Антонов Д.В., Федоренко Р.М., Стрижак П. А. Коллективные эффекты при формировании вторичных фрагментов в результате микровзрывной фрагментации композиционных топлив // *Горение и взрыв*. – 2022. – Т. 15. – № 2. – С. 22–33 (из перечня ВАК).
8. Антонов Д.В., Вершинина К.Ю., Федоренко Р.М. Микровзрывная фрагментация двухжидкостных капель на основе таллового масла // *Письма в ЖТФ*. – 2023. Т. 49. №. 14. – С. 3–7 (из перечня ВАК).

Апробация работы

Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих научных мероприятиях: Международный научный симпозиум студентов и молодых ученых имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр», г. Томск, 2019, 2020 гг.; Международная молодежная научная конференция «Тепломассоперенос в системах обеспечения тепловых режимов энергонасыщенного технического и технологического оборудования», г. Томск, 2019 г.; Всероссийская научная конференция с международным участием «XI Семинар ВУЗов по теплофизике и энергетике», г. Санкт-Петербург, 2019 г.; Всероссийская конференция с элементами научной школы для молодых учёных «Сибирский теплофизический семинар», г. Новосибирск, 2019, 2021, 2022, 2023 гг.; IV Всероссийский конкурс научно-исследовательских работ студентов и аспирантов ВУЗов России по естественным, техническим и гуманитарным наукам «Шаг в науку», г. Томск, 2019 г.; XVI «Минский

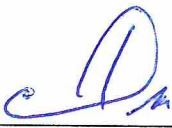
международный форум по тепломассообмену», г. Минск, 2020 г.; XVII Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук», г. Томск, 2020 г.; XVI Всероссийская школа-конференция молодых ученых с международным участием «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики», г. Новосибирск, 2020 г.; III международная конференция «Современные проблемы теплофизики и энергетики», г. Москва, 2020 г.; XXIII Школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках», г. Екатеринбург, 2021 г.; 6th International Conference on Combustion Science and Processes (CSP 2021), Virtual Conference, 2021 г.; Advanced Engineering Centre Workshop. Experimental studies and modelling of puffing and micro-explosion in emulsion and two-component droplets, University of Brighton, г. Брайтон, Великобритания, 2021 г.; 2nd International Conference on Fluid Flow and Thermal Science (ICFFTS'21), Virtual Conference, 2021 г.; VI Всероссийская научно-практическая конференция «Энергетика и энергосбережение: теория и практика», г. Кемерово, 2021 г.; XVII Всероссийская (IX Международная) научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «ЭНЕРГИЯ – 2022», г. Иваново, 2022 г.; VII Всероссийский молодежный форум «Наука будущего – наука молодых», г. Новосибирск, 2022 г.; XVII Всероссийская школа-конференция молодых ученых с международным участием «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики», п. Шерегеш, 2023 г.; I Всероссийская научная конференция с международным участием «Енисейская теплофизика – 2023», г. Красноярск, 2023 г.; XXIV Школа-семинар молодых ученых и специалистов имени академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках», г. Казань, 2023 г.

Решение о рекомендации работы к защите

Диссертация «Вторичные фрагменты при микро-взрывном распаде двухжидкостных капель» Федоренко Романа Михайловича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Заключение принято на заседании семинара Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук под руководством академика РАН С.В. Алексеенко.

Присутствовало на заседании 14 чел., в том числе 1 академик РАН, 1 член-корреспондент РАН, 11 докторов и 3 кандидатов наук. Результаты голосования: «за» – 14 чел., «против» – 0 чел., «воздержалось» – 0 чел., протокол № 4 от «27» сентября 2023 г.



Председатель семинара
Алексеев С.В., академик РАН,
Научный руководитель ИТ СО РАН



Секретарь семинара
Лукашов В.В., к.т.н., в.н.с.
лаборатории физических основ
энергетических технологий
ИТ СО РАН