

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИТ СО РАН

Академик Д.М. Маркович



«15» октября 2021 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

**Секции 1 “Теплофизика и гидрогазодинамика многофазных и многокомпонентных систем (включая фазовые переходы, волновые явления и акустику)” Ученого совета
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 «Микро-взрывная фрагментация двухжидкостных капель» выполнена Антоновым Д.В. в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

В 2020 году Антонову Д.В. присуждена степень магистра, диплом магистра с отличием 107004 0016170. В настоящее время Антонов Д.В. работает младшим научным сотрудником в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

По итогам обсуждения принято следующее **заключение**.

Актуальность темы. Традиционно при разработке и модернизации топливных технологий основное внимание уделяется решению ограниченной, но в то же время наиболее значимой (первостепенной) группы задач. В частности, активно проводятся исследования для создания технологий, способствующих минимизации расхода топлива, повышению интегральных характеристик процесса горения, снижению антропогенных выбросов при сжигании топлива, повышению полноты его выгорания, улучшению качества и в тоже время удешевлению процесса подготовки и распыления топлива.

Современные системы огневой и термической очистки воды от нерегламентированных примесей, да и другие существенно отличающиеся по принципу действия системы, к сожалению, имеют довольно невысокий коэффициент полезного действия. Это обусловлено тем, что очищаемую жидкость приходится повторно

циклически подавать в камеру термической очистки. Примеси не успевают выпариться (оседать или выгорать) в нагревательной камере в течение одного цикла. При этом повышается расход энергии, затрачиваемой на работу данных систем, а также существенно увеличивается длительность протекания соответствующих процессов.

И в первом (топливные технологии), и во втором (термическая очистка жидкостей от примесей) случаях рациональным способом решения указанных проблем может стать дробление капель топлив или очищаемых жидкостей до характерных размеров десятков и сотен микрометров. Но как показали эксперименты, такие мелкие капли могут быть унесены из камеры термической очистки при малых скоростях движения (вследствие высоких скоростей движения разогретых дымовых газов или встречного воздушного потока) или налипать и оседать на стенках камер сгорания. Поэтому дробление капель при подаче в нагревательные камеры может приводить к дополнительным технологическим сложностям и ограничениям. В таком случае целесообразно дробление капель в фиксированных зонах камер сгорания или термической очистки в процессе нагрева. В этом направлении предпринимаются попытки разработки соответствующих технологий коллегами со всего мира. Наиболее привлекательным, с точки зрения стабильности реализации, требуемых расходов энергии и времени, представляется достижение условий микро-взрывной фрагментации капель (интенсивного дробления) с образованием топливного аэрозоля.

Исследования фазовых превращений двухжидкостных капель в высокотемпературной газовой среде выполнены при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 18-71-10002. Экспериментальные и теоретические исследования микро-взрывной фрагментации эмульгированных топлив выполнены при финансовой поддержке гранта Президента РФ № МД-314.2019.8, гранта Президента РФ № МД-289.2021.4 и стипендии Президента РФ № СП-447.2021.1. Условия микро-взрывного распада капель суспензий изучены в рамках проекта Министерства науки и высшего образования № 075-15-2020-806 (с ИТ СО РАН).

Результаты исследований используются в образовательном процессе в Национальном исследовательском Томском политехническом университете при подготовке бакалавров и магистрантов по направлению теплоэнергетика и теплотехника, а также аспирантов в области тепловых электрических станций, их блоков и агрегатов, промышленной теплоэнергетики, теплофизики, химической физики, горения и взрыва, физики экстремальных состояний вещества.

Цель работы:

Целью диссертации являлось является определение характеристик микро-взрывной фрагментации двухжидкостных капель по результатам экспериментальных и теоретических исследований с применением высокоскоростной видеорегистрации, бесконтактных оптических методов, коммерческих и собственных программных кодов.

Поставлены и решены следующие задачи:

- Разработка методики экспериментальных исследований характеристик микро-взрывной фрагментации двухжидкостных капель при интенсивном нагреве с варьированием в широких диапазонах параметров исследуемых процессов: температуры греющей среды, начальных размеров капель, концентраций компонентов и др.
- Создание экспериментальных стендов с применением высокоскоростной регистрирующей аппаратуры и бесконтактных оптических методов для изучения механизмов микро-взрывного распада.
- Разработка математических моделей тепломассопереноса в двухжидкостных каплях перед микро-взрывной фрагментацией в высокотемпературной газовой среде с использованием коммерческих и собственных программных кодов.
- Экспериментальное и теоретическое определение зависимостей интегральных характеристик микро-взрывной фрагментации от группы основных параметров системы (температура, давление, скорость потока газовой среды, вид и концентрация горючей жидкости, способ нагрева объектов исследований, размер многокомпонентных капель и др.).
- Исследование временных характеристик микро-взрывной фрагментации двухжидкостных капель с установлением основных стадий и механизмов фрагментации при различных условиях подвода тепла.
- Определение влияния коллективных эффектов на процессы микро-взрывной фрагментации двухжидкостных капель.
- Изучение закономерностей физических процессов, протекающих в двухжидкостной капле (вода/горючая жидкость) при ее интенсивном нагреве.
- Исследование эффектов микро-взрывной фрагментации двухжидкостных капель в условиях интенсивного дробления; регистрация количества отрывающихся жидкостных фрагментов; вычисление площадей поверхности испарения жидкости после и до распада.

- Анализ времен задержек микро-взрывного распада и последующего зажигания двухжидкостных капель и аналогичных временных характеристик испарения и зажигания однородных капель топлив.
- Разработка рекомендаций 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.).

Научная новизна основных положений, результатов и выводов, полученных в диссертации:

Экспериментально и теоретически установлены условия реализации эффектов микро-взрывного разрушения (дробления) двухжидкостных капель вследствие их интенсивного парообразования при различных условиях повода тепла (в потоке разогретого газа, на разогретой подложке и муфельной печи). С применением разработанных экспериментальных методик на базе высокоскоростной регистрирующей аппаратуры и бесконтактных оптических методов диагностики потоков «Particle Image Velocimetry» (PIV), «Planar Laser-Induced Fluorescence» (PLIF), «Laser Induced Phosphorescence» (LIP) и «Shadow Photography» (SP) изучены закономерности и условия микро-взрывной фрагментации двухжидкостных капель при интенсивном нагреве. Установлены режимы существования двухжидкостных капель при нагреве. Выделены условия нагрева, при которых происходит микро-взрывное разрушение двухжидкостной капли. Определены временные характеристики микро-взрывной фрагментации. Зарегистрированы процессы зажигания и горения вторичных капель, образующихся в результате микро-взрывного распада. Установлены масштабы влияния компонентного состава и технологии формирования капли (неперемешанная капля или эмульсия) на времена существования и распада в потоке высокотемпературных газов. Определены характерные значения соотношений площадей поверхности испарения жидкости после и до микро-взрывного дробления двухжидкостных капель при интенсивном нагреве.

Теоретическая и практическая значимость работы:

Полученные экспериментальные и теоретические результаты, а также сформулированные заключения являются научными основами при разработке и модернизации перспективных высокотемпературных газопарокапельных приложений, а также развития и совершенствования существующих. К ним относятся: топливные технологии, а именно топочные устройства и дизельные двигатели (использование новых

видов топлива на основе воды и горючего компонента 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 пароводяных облаков, способствующих увеличению площади покрытия очага горения и вытеснению окислителя).

Степень достоверности результатов:

Достоверность 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 полученных экспериментальных и численных результатов с известными теоретическими и экспериментальными заключениями других авторов.

На защиту выносятся:

- Механизм микро-взрывного распада двухжидкостной капли при высокотемпературном нагреве связан с перегревом воды на границе топливо/вода выше температуры начала кипения.
- Режимы, условия и характеристики процессов микро-взрывной фрагментации неперемешанных в исходном состоянии двухжидкостных капель и эмульгированных топлив существенно отличаются.
- Времена задержки микро-взрывного распада двухжидкостных капель на подложке существенно меньше (в 5–10 раз), чем в потоке разогретых газов и муфельной печи при идентичной температуре нагрева, а число и размеры вторичных фрагментов зависят от режима фрагментации: частичный (от 5 до 20 одиночных вторичных капель с размерами (радиусами) более 0.3 мм) или полный распад (более 20 мелких вторичных капель с размерами менее 0.3 мм).
- Времена задержки микро-взрывного распада и последующего зажигания двухжидкостных капель значительно меньше (в 4–10 раз) аналогичных временных характеристик испарения и зажигания однородных капель этих топлив. Площадь поверхности испарения смеси жидкостей после микро-взрывного распада увеличивается существенно (от 10–15 до 100–200 раз) относительно начальных значений.
- При выполнении теоретических исследований в качестве критериев микро-взрывного распада правомерно использовать: критерий по перегреву границы

вода/топливо выше температуры начала взрывного кипения дисперсной фазы (воды) и критерий по достижению критического размера (радиуса) пузыря.

Личный вклад автора:

Научные результаты и выводы, послужившие основой диссертации и выносимые на защиту, получены соискателем самостоятельно. Постановка решаемых задач проводилась диссертантом как лично, так и совместно с научным руководителем проф. П.А. Стрижаком. 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, а также при подготовке рукописей к публикации в высокорейтинговых журналах. Математические модели с авторскими программными кодами разработаны совместно с проф. П.А. Стрижаком, аналитические решения сформулированных задач – с проф. С.С. Сажиним. Экспериментальные исследования с применением оптических методов многофазных потоков проводились совместно с проф. П.А. Стрижаком и доц. Р.С. Волковым. Высокоскоростная видеорегистрация процессов распада капель при разных схемах нагрева проводилась с проф. П.А. Стрижаком, асп. Р.М. Федоренко. С проф. Г.В. Кузнецовым. С зарубежными учеными Т. Bar-Kohany, G. Castanet, O. Rybdylova, J. Bellettre готовились совместные статьи, в которых анализировались полученные диссертантом результаты. Автор выражает благодарность сотрудникам Лаборатории тепломассопереноса ТПУ за помощь в проведении исследований, обсуждение результатов и сформулированные предложения по дальнейшему развитию работы.

Список работ автора по тематике диссертации, опубликованных в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Sazhin S.S. A new approach to modelling micro-explosions in composite droplets / Sazhin S.S., Bar-Kohany T., Nissar Z., Antonov D., Strizhak P.A., Rybdylova O.D. // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2020. – Vol. 161. – P. 120228. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120238.
2. Antonov D.V. Puffing/micro-explosion in rapeseed oil/water droplets: The effects of coal micro-particles in water / Antonov D.V., Strizhak P.A., Fedorenko R.M., Nissar Z., Sazhin S.S. // Fuel. – 2021. – Vol. 289. – P. 119814. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.119814.
3. Antonov D.V. Micro-explosive droplet fragmentation of environmentally promising coal-water slurries containing petrochemicals / Antonov D.V., Nyashina G.S., Strizhak P.A.,

- Romanov D.S. // Fuel. – 2021. – Vol. 283. – P. 118949. DOI: 110.1016/j.fuel.2020.118949.
4. Antonov D.V. Dispersed phase structure and micro-explosion behavior under different schemes of water-fuel droplets heating / Antonov D., Piskunov M., Strizhak P., Tarlet D., Bellettre J. // Fuel. – 2020. – Vol. 259. – P. 116241. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.116241.
 5. Antonov D.V. Micro-explosion and autoignition of composite fuel/water droplets / Antonov D.V., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A., Rybdylova O., Sazhin S.S. // Combustion and Flame. – 2019. – Vol. 210. – P. 479-489. DOI: 10.1016/j.combustflame.2019.09.004.
 6. Strizhak, P.A. Application of the laser induced phosphorescence method to the analysis of temperature distribution in heated and evaporating droplets / Strizhak P.A., Volkov R.S., Antonov D.V., Castanet G., Sazhin S.S. // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2020. – Vol. 163. – P. 120421. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120421.
 7. Antonov D.V. Breakup and explosion of droplets of two immiscible fluids and emulsions / Antonov D.V., Piskunov M.V., Strizhak P.A. // International Journal of Thermal Sciences. – 2019. – Vol. 142. – P. 30-41. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2019.04.011.
 8. Антонов Д.В. Влияние схемы нагрева неоднородной капли на характеристики микровзрывной фрагментации / Антонов Д.В., Ребров А.К., Стрижак П.А. // Доклады Академии наук. – 2019. – Т. 488, № 4. – С. 372–376.
 9. Антонов Д.В. Характеристики аэрозольного облака, образующегося при микровзрывном разрушении двухжидкостной капли / Антонов Д.В., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. // Письма в Журнал технической физики. – 2019. – Т. 45, № 16. – С. 14–17.
 10. Антонов Д.В. Микровзрывная фрагментация группы неоднородных капель топлив / Антонов Д.В., Стрижак П.А., Федоренко Р.М. // Письма в Журнал технической физики. – 2020. – Т. 46, № 10. – С. 14–17.
 11. Антонов Д.В. Интенсификация парообразования и вторичного измельчения капель огнетушащих составов / Антонов Д.В., Стрижак П.А. // Письма в Журнал технической физики. – 2020. – Т. 46, № 3. – С. 23–26.
 12. Антонов Д.В. О возможных перспективах применения эффектов взрывного дробления капель воды при пожаротушении / Антонов Д.В., Войтков И.С., Высокоморная О.В., Пискунов М.В. // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2017. – № 2. – С. 45–54.

Апробация работы: основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих научных мероприятиях: Международный

молодежный форум «Интеллектуальные энергосистемы», г. Томск, 2015, 2016, 2017; Международная конференция студентов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук», г. Томск, 2015, 2016, 2017; VI Всероссийская конференция «Ресурсоэффективным технологиям - энергию и энтузиазм молодых», г. Томск, 2015; XXI Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современная техника и технологии», г. Томск, 2015; Международная конференция студентов и молодых ученых «Nanoparticles, Nanostructured coatings and micro containers: technology, properties, applications», г. Томск, 2016; XX Международный научный симпозиум имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр, г. Томск, 2016, 2020; Международная научно-техническая конференция молодежи «Транснефть», г. Томск, 2016; III Всероссийский молодежный форум «Наука будущего-наука молодых», г. Нижний Новгород, 2017; III Всероссийский конкурс научно-исследовательских работ студентов и аспирантов ВУЗов и научных академических институтов России по естественным, техническим и гуманитарным наукам «ШАГ В НАУКУ», г. Томск, 2017; Всероссийский инновационный конкурс на базе Новосибирского государственного университета, г. Новосибирск, 2017; Всероссийская школа-конференция молодых ученых с международным участием «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики», г. Новосибирск, 2018, 2020; Всероссийская конференция «XXXIV Сибирский теплофизический семинар», г. Новосибирск, 2018, 2019, 2020; Международная научная конференция «Энерго-ресурсоэффективность в интересах устойчивого развития», г. Томск, 2018; VIII Международная молодежная научная конференция «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики - 2018», г. Томск, 2018; Международная молодежная научная конференция «Тепломассоперенос в системах обеспечения тепловых режимов энергонасыщенного технического и технологического оборудования», г. Томск, 2018, 2019; III Всероссийская научная конференция с элементами школы молодых учёных, г. Ялта, 2018; XXII Школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепло-массообмена в энергетических установках», г. Москва, 2019; XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, г. Уфа, 2019; Всероссийская научная конференция с международным участием «XI Семинар ВУЗов по теплофизике и энергетике», г. Санкт-Петербург, 2019; III международная конференция «Современные проблемы теплофизики и энергетики», г. Москва, 2020; 7th Sprays SIG workshop. Sprays in engineering applications: modelling and experimental studies, University of Brighton, г. Брайтон, Великобритания, 2020; Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых энергия–2021, г.

Иваново, 2021; The 3rd International Scientific Conference «Sustainable and Efficient Use of Energy, Water and Natural Resources», г. Санкт-Петербург, 2021 г.

Соответствие содержания диссертации специальности, по которой она рекомендуется к защите:

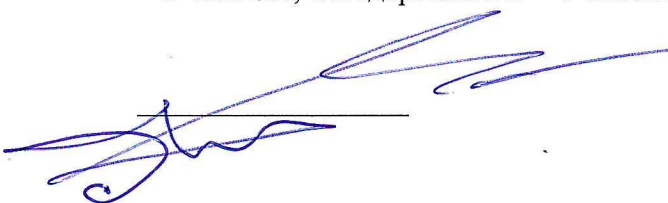
Диссертация Антонова Д.В., посвященная экспериментальному и теоретическому исследованию микро-взрывной фрагментации двухжидкостных капель, соответствует паспорту специальности 1.3.14 – *“Теплофизика и теоретическая теплотехника”* для физико-математических наук.

Решение о рекомендации к защите.

Диссертация «Микро-взрывная фрагментация двухжидкостных капель» Антонова Дмитрия Владимировича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 – *“Теплофизика и теоретическая теплотехника”*.

Заключение принято на заседании секции 1 “Теплофизика и гидрогазодинамика многофазных и многокомпонентных систем (включая фазовые переходы, волновые явления и акустику)” Ученого совета Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН) под руководством член-корреспондента РАН А.Н. Павленко. В качестве замечаний высказано пожелание устранить опечатки в диссертации и автореферате, конкретизировать терминологию и личный вклад автора и добавить список обозначений в автореферат.

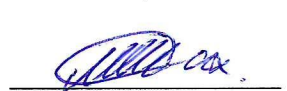
Присутствовало на заседании **18** человек, в том числе **2** член-корреспондента РАН, **13** докторов наук, **3** кандидата наук. Результаты голосования: «за» – **18** человек, «против» – **0** человек, «воздержалось» – **0** человек. Протокол № 3 от 14 октября 2021 года.



Председатель семинара

Павленко Александр Николаевич, чл. -корр. РАН,
д.ф.-м.н., заведующий лабораторией
низкотемпературной теплофизики ИТ СО РАН.

Секретарь семинара



Пахомов Максим Александрович, д.ф.-м.н.,
ведущий научный сотрудник ИТ СО РАН.