

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.129.01,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ИНСТИТУТА ТЕПЛОФИЗИКИ
ИМ. С.С. КУТАТЕЛАДЗЕ СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ
АКАДЕМИИ НАУК ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ
СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 06.04.2022 № 9/2022

О присуждении Антонову Дмитрию Владимировичу гражданину Российской Федерации учёной степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Микро-взрывная фрагментация двухжидкостных капель» по специальности 1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника принята к защите 26.01.2022, протокол № 2/2022 диссертационным советом 24.1.129.01, созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН) Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 1, приказы Минобрнауки России от 11.04.2012 № 105/нк, от 03.06.2021 № 561/нк.

Соискатель Антонов Дмитрий Владимирович, 29 мая 1996 года рождения, в 2020 году окончил с отличием магистратуру Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по направлению подготовки 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», с 01.09.2020 обучается в очной аспирантуре федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», работает младшим научным сотрудником (инженером-исследователем) в лаборатории тепломассопереноса, НИ ТПУ.

Справка № 49 о сдаче кандидатских экзаменов по специальности 1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника (иностранный язык (английский язык), история и философия науки, 1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника) выдана 21 сентября 2021 г. Федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Диссертация выполнена в Федеральном государственном автономном

образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск.

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», профессор.

Официальные оппоненты:

Скрипов Павел Владимирович - доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики Уральского отделения Российской академии наук, лаборатория быстропротекающих процессов и физики кипения, ведущий научный сотрудник;

Крюков Алексей Павлович - доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Национальный исследовательский университет «МЭИ», кафедра низких температур, профессор;

дали положительные отзывы на диссертацию Антонова Дмитрия Владимировича.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук (ИПМех РАН), г. Москва, в своем положительном заключении, подписанном Рашковским С.А. - доктором физико-математических наук, главным научным сотрудником ИПМех РАН и Котовым М.А. - кандидатом физико-математических наук, старшим научным сотрудником ИПМех РАН, указала, что: «Диссертационная работа Антонова Д.В. посвящена получению новых экспериментальных данных по предельным условиям инициирования микро-взрывного распада двухжидкостных капель при разных схемах нагрева, которые позволили сформулировать критерии (в виде необходимых критических условий) для реализации соответствующих процессов при разработке физических и математических моделей с учетом перегрева границы раздела вода/топливо, роста размеров пузырей и роста давления в капле. Данные модели являются базой для перехода к аэрозольным потокам и спреям. Тема диссертационной работы, несомненно, актуальна и имеет большую значимость в топливных, химических и оросительных приложениях. Диссертационная работа Антонова Д.В. характеризуется полнотой и завершенностью».

Соискатель имеет 30 опубликованных печатных работ по теме диссертации, в том числе 10 – в журналах из списка, рекомендованного ВАК РФ, 20 статей в

международных журналах, входящих в 1 квартиль Web of Science. Получено 25 свидетельств о регистрации программ ЭВМ по теме диссертации. Доля авторского участия соискателя составляла 40–60 %. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем работах.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Antonov D.V., Piskunov M.V., Strizhak P.A. Breakup and explosion of droplets of two immiscible fluids and emulsions // International Journal of Thermal Sciences. – 2019. – V. 142. – P. 30-41 (входит в базы данных Scopus и WoS).

2. Antonov D.V., Strizhak P.A. Heating, evaporation, fragmentation, and breakup of multi-component liquid droplets when heated in air flow // Chemical Engineering Research and Design. – 2019. – V. 146. – P. 22-35 (входит в базы данных Scopus и WoS).

3. Antonov D.V., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A., Rybdylova O., Sazhin S.S. Micro-explosion and autoignition of composite fuel/water droplets // Combustion and Flame. – 2019. – V. 210. – P. 479-489 (входит в базы данных Scopus и WoS).

4. Antonov D.V., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Fragmentation of heated droplets of coal-water slurries containing petrochemicals // Applied Thermal Engineering. – 2021. – V. 195. No 117190 (входит в базы данных Scopus и WoS).

5. Антонов Д.В., Ребров А.К., Стрижак П.А. Влияние схемы нагрева неоднородной капли на характеристики микровзрывной фрагментации // Доклады Академии наук. – 2019. – Т. 488, № 4. – С. 372-376 (из перечня ВАК).

На автореферат диссертации поступило 5 отзывов. Все отзывы положительные.

В отзыве на автореферат Гасанова Б.М. - д.ф.-м.н., ведущего научного сотрудника лаборатории криогеники и энергетики ФГБУН Института теплофизики Уральского отделения Российской академии наук - отмечается, что «исследования взрывного распада гетерогенных капелек при их интенсивном нагреве является одним из актуальных направлений развития топливных технологий используемых в различных теплогенерирующих установках и в двигателях внутреннего сгорания. Автором получены новые экспериментальные данные по характеристикам микровзрывного распада при интенсивном нагреве двухжидкостных капелек и топливных эмульсий. Предложены математические модели тепломассопереноса в капле с учетом особенностей протекания теплофизических процессов. Даны рекомендации по практическому применению результатов исследования». В отзыве имеются следующие замечания: «1. К сожалению, в автореферате не приводятся средние размеры капелек дисперсной фазы (воды) в топливной эмульсии и их распределения по объему, так как эти параметры оказывают влияние

на режим паффинга и взрывную фрагментацию. 2. В п. 6 “Заключения” автор пишет “Влияние соседних капель на условия нагрева, «паффинг» и микро-взрывной фрагментации ослабевает при расстояниях между ними более $5 \cdot R_{d0} \dots$ ”. Означает ли это, что при расстояниях между соседними капельками меньше $5 \cdot R_{d0}$ микро-взрывная фрагментация одной капельки инициирует механизм паффинга и распада в другой?»

В отзыве на автореферат Донского И.Г. - к.т.н., старшего научного сотрудника лаборатории термодинамики ФГБУН Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук - отмечается, что «представленная работа посвящена экспериментальному исследованию интенсивных фазовых переходов в гетерогенных каплях. Теоретические исследования таких систем затруднено из-за сложных взаимосвязей тепловых, диффузионных и механических факторов. ... автору удалось сформулировать относительно простые закономерности протекания процесса фрагментации гетерогенных капель, которые имеют значение как для теплофизики и механики многофазных сред, так и возможных практических приложений (топливные технологии, уничтожение отходов, химическая промышленность)». В отзыве имеются следующие замечания: «1. На стр. 3 автор пишет: “Современные системы огневой и термической очистки воды ... имеют невысокий коэффициент полезного действия.”. Каким образом этот коэффициент определяется, и насколько его можно повысить с использованием полученных автором результатов? 2. На стр. 13 автор описывает устройство экспериментальных стендов, однако это описание несколько неполно. Каким образом осуществлялась подача горячего воздуха в схеме на рис. 2? Насколько велики неоднородности профиля скорости воздуха по сравнению с размером капли? 3. На стр. 19 в уравнении (1) включается источник $P(t,R)$, который далее не расшифровывается. Каким образом он связан с переменными и параметрами задачи? Задавался ли он постоянным, или определялся из эмпирических данных? Как определялся состав смеси паров и воздуха, для которой определяется плотность ρ_{total} ? 4. На стр. 20 автор вводит температуру начала взрывного кипения T_N , однако не дает способа ее определения: это эмпирическая формула, результат решения кинетической задачи, или подбор подходящего значения для описания экспериментальных данных? Для каких значений T_N получены кривые на рис. 7? 5. Ниже автор пишет о том, что вычисления проводились на пространственной и временной сетках, однако выше утверждается, что уравнения решались аналитически. Непонятно также, что означает использование 50 источников. Это разные виды функции $P(t,R)$? 6. На стр. 21 автор пишет о том, что максимальные отклонения результатов моделирования и

экспериментальных данных не превышают 7%, однако на графиках очевидно присутствуют точки с большими отклонениями. Какой критерий применялся для оценки отклонения результатов эксперимента и расчета? 7. Некоторые результаты в заключении, например п.6 (о влиянии соседних капель), показаны недостаточно подробно».

В отзыве на автореферат Сметанюка В.А. - к.ф.-м.н., старшего научного сотрудника ФГБУН Федерального исследовательского центра химической физики им. Н.Н.Семенова Российской академии наук, сообщается, что «В настоящей диссертационной работе выполнены экспериментальные и теоретические исследования процессов взрывного измельчения нагреваемых двухжидкостных капель при разных способах нагрева объектов исследования. ... Автор диссертации проведена огромная и системная работа». В отзыве имеются следующие замечания: 1. Высокоскоростная съёмка использовалась для регистрации процессов. Например, для анализа числа и размеров вторичных фрагментов (см. рис. 2.4.1). Учитывался ли выход фрагментов из плоскости фокусировки объектива и невозможность фиксации их изображения на камеру? 2. На рисунке 2.7.1.1 представлено влияние температуры газовой среды на время задержки микро-взрывного распада капли. Экспериментальные данные аппроксимированы функцией с двумя параметрами. В первом параметре используется избыточное количество значимых цифр. Округление первого параметра до десятков не влияет на вид зависимости. Аналогичный вопрос к другим аппроксимационным функциям. В них используются параметры с избыточным числом знаков. 3. На рисунке 2.7.1.1 представлено влияние температуры газовой среды на время задержки микро-взрывного распада капли для различных пар. Автор объясняет зависимость от типа топлива влиянием теплопроводности и летучести компонентов. Это объяснение требует разъяснений, так как теплопроводность дизтоплива и керосина примерно одинаковая. А содержание легколетучих компонентов в керосине больше, чем в рапсовом масле и дизтопливе. При этом пара вода/дизельное топливо демонстрирует наименьшее время задержки микровзрыва. 4. При объяснении влияния соотношения концентраций жидкостей на время задержки утверждается, что «Увеличение доли топлива (горючей жидкости) в двухжидкостной капле приводит к росту вязкости и прочности приповерхностного слоя исходной капли.» Термин прочность не ясен. Есть коэффициент поверхностного натяжения, который у топлива меньше, чем у воды. 5. Термин «перегрев» границы раздела «вода/топливо» вводит в заблуждение. Так как при реализованных скоростях нагрева и присутствии очагов парообразования вода явно вскипает при температурах кипения при данном

давления. Повышенная температура окружающей среды (топливо или продукты горения), относительно температуры кипения воды, не определяет факт перегрева воды на границе раздела. 6. Зависимости времени задержки микро-взрывного распада капель эмульсий от температуры потока воздуха при варьировании вязкости автором объясняется тем, что с ростом вязкостных сил в капле требуется больше энергии для ее трансформации и разрушения. Влияние вязкости справедливо только к трансформации, то есть изменению формы объекта, но не его разрушению. Фрагментация определяется поверхностным натяжением. 7. Зависимость времени задержки микро-взрывного распада от температуры газовой среды при различных парах, представленная на рисунке 2.2.2. объясняется автором исключительно скоростью испарения топлива. Дизельное топливо состоит из более тяжелых углеводородов, чем керосин, тогда как измеренные времена короче у дизтоплива, чем у керосина. 8. На рисунке 3.2.1.5 представлены температурные распределения внутри двухжидкостной капли в разные моменты времени. За счет каких эффектов, учтенных в математической модели, обеспечивается перегрев воды выше температуры кипения при н.у. Почему для капли 500 мкм температура воды близка к температуре кипения, тогда как для капли 5 мкм температуры воды достигает температуры кипения дизельного топлива? Учитывалось ли уменьшение плотности жидкостей при увеличении температуры? 9. На рисунке 3.4.1.1 с результатами математического моделирования не приведено сравнение с экспериментальными данными данной работы. 10. На рисунке 3.4.2.1 приведены зависимости времени задержки микро-взрывного распада от концентрации воды. Видно, что существует локальный минимум. Тогда как на рисунке 2.7.3.1 экспериментальные данные демонстрируют локальный максимум. В чем заключается расхождение этих данных? 11. На рисунке 3.4.3.1 приведены зависимости времени задержки микро-взрывного распада от начальных размеров капель. Если аппроксимировать зависимость функцией вида $\log_{10}(\tau) = 1.854 \cdot \log_{10}(r, \text{мм}) + 0.66$, то видно, что время задержки продолжает уменьшаться, это расходится с выводом о незначительном влиянии от размера капли при размерах последних менее 0.2 мм.

В отзыве на автореферат Крайнова А.Ю. - д.ф.-м.н., профессора ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет» - отмечается, что «задачи исследований являются весьма актуальными, связанными с повышением энергоэффективности и экологичной устройств энергетики и двигателей. ... полученные результаты обладают новизной и практической значимостью». В отзыве имеются следующие замечания: «1. При формулировке математической модели автор учитывает испарение капли. Это приводит к

изменению ее размера. Не указано, каким образом это учтено в постановке задачи (1)-(6)? 2. При описании метода решения автор пишет “решалось аналитически с использованием метода разделения переменных, позволяющего перейти от сложной формы дифференциальных уравнений к простым алгебраическим выражениям”. Требуется пояснение. При применении метода разделения переменных возникает задача о нахождении собственных значений (дифференциальное уравнение второго порядка) и собственных функций, которыми в сферическом случае являются полиномы Лежандра. Решение становится весьма громоздким!»

В отзыве на автореферат Исаева С.А. - д.ф.-м.н., профессора, заведующего лабораторией фундаментальных исследований ФГБОУ ВО "Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации" - отмечается, что «получены фундаментальные научные результаты, которые представлены в высокорейтинговых журналах 2019-2019 гг: International Journal of thermal Sciences, Chemical Engineering Research and Design, Combustion and Flame, International Journal of Heat and Mass Transfer, Fuel, Powder Technology, Applied Thermal Engineering. ... Диссертация выполнена в НИ ТПУ в набирающей известность научной школе профессора Стрижака П.А.». В отзыве имеются следующие замечания: «1. Полезно глубже раскрыть бэкграунд диссертации и упомянуть предшественников. 2. Насколько справедливо предположение о том, что “сферическая капля воды представляет ядро и располагается по центру, а топливу – оболочку”? Понятно, что такая простая конструкция позволяет свести задачу к алгебраическим формулам. Возможно ли усложнить постановку задачи и рассмотреть численно ситуации несферической капли и эксцентриситета капли и оболочки?»

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их высокой квалификацией в областях науки, непосредственно связанных с темой диссертации. Ведущая организация является одним из лидеров в области теплофизики многофазных систем, в ней работают специалисты, которые могут дать полноценную экспертную оценку научной и практической значимости результатов работы (д.ф.-м.н. Соболева Е.Б., д.ф.-м.н. Рашковский С.А., д.ф.-м.н. Цыпкин Г.Г., к.ф.-м.н. Федюшкин А.И., д.ф.-м.н. Якуш С.Е., д.ф.-м.н. Филиппов А.Н., д.ф.-м.н. Полянин А.Д., д.ф.-м.н. Калиниченко В.А., д.ф.-м.н. Рожков А.Н. и др.). Официальные оппоненты д.ф.-м.н., профессор П.В. Скрипов и д.т.н., профессор А.П. Крюков являются признанными специалистами в области теплофизики и теплоэнергетики, в частности, в вопросах тепломассообмена и фазовых превращений. Оппоненты имеют научные работы в области, изучению

которой посвящена диссертационная работа, опубликованные в рецензируемых научных изданиях.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований разработаны методические подходы к проведению экспериментальных и теоретических исследований критических условий реализации эффектов микро-взрывного дробления двухжидкостных капель вследствие интенсивного парообразования при различных условиях повода тепла (в потоке разогретого газа, на разогретой подложке и муфельной печи), позволяющие выявить новые закономерности исследуемого явления; предложен новый подход, отличающийся от известных комплексным использованием группы экспериментальных методик на базе высокоскоростной регистрирующей аппаратуры и бесконтактных оптических методов диагностики потоков «Particle Image Velocimetry», «Laser-Induced Fluorescence» и «Shadow Photography» для анализа закономерностей и условий микро-взрывной фрагментации двухжидкостных капель при интенсивном нагреве. Предложенный подход позволяет идентифицировать границу раздела жидкостей, зону зарождения пузырей, определять динамику поверхности и структуры капли. Обоснована целесообразность использования микро-взрывного измельчения капель топлива для интенсификации процессов тепломассообмена в камерах сгорания энергетических установок, дизельных двигателей, современных систем термической и огневой очистки воды от нерегламентированных примесей. Введены новые представления о критических условиях реализации эффектов микро-взрывного разрушения двухжидкостных капель, связанных с достижением перегрева границы раздела «вода/топливо» выше температуры начала взрывного кипения дисперсной фазы (воды) и критического размера (радиуса) пузыря.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что разработаны упрощенные математические модели тепломассопереноса в двухжидкостных каплях и показана их эффективность для анализа критических условий, предшествующих их микро-взрывному распаду; предложена и обоснована методика оценки эффективности микро-взрывного измельчения двухжидкостных капель и эмульсий; раскрыты основные механизмы, приводящие к микро-взрывной фрагментации двухжидкостных капель при интенсивном нагреве; определено влияние совокупности факторов (температуры среды, схемы нагрева, концентрации и материала горючей жидкости, размеров и технологии формирования капель, групповых эффектов) на характеристики микро-взрывного измельчения капель; проведена модернизация существующих алгоритмов обработки экспериментальных данных, обеспечивающих получение новых

результатов по теме диссертации.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что определены способы практического использования результатов диссертационной работы для разработки и модернизации перспективных высокотемпературных газопарокапельных приложений, а также развития и совершенствования существующих. В частности - приложений, относящихся к технологиям сжигания жидкого топлива в топочных устройствах и дизельных двигателях – использование новых видов топлива на основе воды и топлива для совместного улучшения экологических, энергетических и экономических характеристик, а также к термической или огневой очистке воды, пожаротушению с применением двухжидкостных капель – за счет микро-взрывной фрагментации капель с образованием пароводяных облаков, способствующих увеличению площади покрытия очага горения и вытеснению окислителя. Создана основа для эффективного применения результатов диссертационного исследования для модернизации дисциплины «Моделирование тепловых процессов», направленной на обучение магистрантов направления «Теплоэнергетика и теплотехника», что подтверждается опубликованием методических указаний к выполнению лабораторных работ по указанной дисциплине в Национальном исследовательском Томском политехническом университете. Представлен акт об использовании результатов диссертационной работы в образовательном процессе, реализуемом сотрудниками Научно-образовательного центра И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики НИ ТПУ. Кроме того, результаты и выводы диссертации могут быть использованы в научных организациях (например: ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», ФГБУН Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, ФГБУН Институт теплофизики УрО РАН, ФГБУН Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, ФГБУН Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН и др.), занимающихся исследованиями тепломассопереноса при фазовых превращениях, разработкой энергетического оборудования, систем термической очистки жидкостей, технологий тушения пожаров и др.

Оценка достоверности результатов исследования выявила: экспериментальные данные получены с использованием сертифицированного высокоточного оборудования, что позволяло минимизировать неопределенность и обеспечить удовлетворительную повторяемость результатов экспериментов при идентичных параметрах. Использованы программные методы обработки результатов с применением теории инженерного эксперимента. Теоретические

результаты в предельном случае соответствуют известным математическим моделям тепломассопереноса для однородных жидкостей, согласуются с экспериментальными данными, представленными в диссертации и опубликованными другими авторами.

Личный вклад соискателя состоит в проведении экспериментальных и теоретических исследований, включая отладку экспериментальных методик и вычислительных кодов, обработку данных, участии в анализе полученных результатов, а также в подготовке публикаций в высокорейтинговых журналах. 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 д.ф.-м.н., профессором П.А. Стрижаком.

Диссертационным советом 24.1.129.01 сделан вывод о том, что диссертация Антонова Дмитрия Владимировича представляет собой научно-квалификационную работу, в которой содержатся новые результаты комплексного экспериментального и теоретического исследования микро-взрывной фрагментации двухжидкостных капель, имеющие важное значение для развития теории тепломассообмена и фазовых превращений. Представленная диссертационная работа соответствует критериям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013.

На заседании 06 апреля 2022 года диссертационный совет 24.1.129.01 принял решение присудить Антонову Дмитрию Владимировичу ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 18 человек, из них 11 докторов наук по профилю специальности 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника, участвовавших в заседании, из 27 человек, входящих в состав совета, проголосовали за присуждение ученой степени - 18, против - 0, не участвовали в голосовании - 0.

Председатель
диссертационного совета
академик РАН

Ученый секретарь
профессор РАН



С.В. Алексеенко

В.В. Терехов

06 апреля 2022 года