

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МЕХАНИКИ
им. А.Ю. Ишлинского
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИПМех РАН)

пр. Вернадского, д. 101, к. 1, г. Москва, 119526,
Тел.: +7-495-434-00-17, Факс: 8-499-739-95-31,
E-mail: ipm@ipmnet.ru, Сайт: <https://ipmnet.ru>
ОКПО 02699323, ОГРН 1037739426735,
ИНН/КПП 7729138338/772901001

15.03.2022 № 11804/01-2143-127
На № _____

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор федерального государственного
бюджетного учреждения науки Институт
проблем механики им. А.Ю. Ишлинского
Российской академии наук (ИПМех РАН)

Якуш Сергей Евгеньевич

«15» _____ 2022 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук (ИПМех РАН) на диссертационную работу Антонова Дмитрия Владимировича на тему «Микро-взрывная фрагментация двухжидкостных капель», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Оценка содержания диссертации. Диссертационная работа Антонова Д.В. посвящена получению новых экспериментальных данных по предельным условиям инициирования микровзрывного 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. Текст диссертации состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы, перечня основных публикаций по теме диссертации. Диссертация изложена на 178 страницах, содержит 52 рисунка, 5 таблиц, а также библиографический список, включающий 183 наименования. Тема и содержание диссертации, несомненно, соответствует специальности 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Актуальность темы. Измельчение капель жидкостей, растворов, суспензий и эмульсий является одним из эффективных способов повышения эффективности процессов их нагрева, испарения и зажигания. Уменьшение размеров капель, подаваемых в камеру сгорания, способствует увеличению площади поверхности испарения и химического реагирования за счет увеличения площади свободной поверхности жидкости, контактирующей с греющей средой. Процессы микровзрывного распада являются одними из самых эффективных в области так называемого вторичного измельчения, т.е. уже после первичного распыления с применением форсуночных устройств, данные эффекты позитивно влияют на равномерность распыления топлива в камере сгорания, способствуют повышению полноты его выгорания, снижению инерционности зажигания, минимизации расхода топлива и сокращению антропогенных выбросов. Дробление капель жидкостей непосредственно в зоне теплообмена минимизирует влияние негативных эффектов уноса, разворота и торможения мелких капель за счет встречных конвективных потоков

Общая характеристика работы. Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, научная проблема, практическая значимость и научная новизна полученных результатов. **Первая глава** отражает современное состояние теоретических и экспериментальных исследований микровзрывной фрагментации двухжидкостных капель. Проанализированы известные результаты

исследований закономерностей, условий и характеристик микровзрывной фрагментации жидкостей. Рассмотрены установленные ранее особенности быстропротекающих процессов микровзрывной фрагментации топлив при интенсивном нагреве. Выделены основные высокотемпературные газопарокапельные и топливные технологии, для которых актуально изучение рассматриваемых процессов. Сформулированы проблемные вопросы, характерные соответствующим технологиям, и отмечены достижения в изучении микровзрывной фрагментации топлив. Во **второй главе** представлены: описание созданных экспериментальных стендов; разработанные методики проведения исследований и обработки полученных результатов; оценка погрешностей результатов выполненных измерений. Приведены результаты экспериментальных исследований влияния температуры греющей среды, схемы нагрева, концентрации горючих жидкостей с разными теплофизическими и реологическими свойствами, начальных размеров капель, а также коллективных эффектов на характеристики микровзрыва (времена задержки микровзрывного распада, число и размеры вторичных фрагментов). В **третьей главе** представлены разработанные математические модели с использованием собственных и коммерческих программных кодов. Представлены результаты теоретических исследований влияния температуры греющей среды, концентрации горючих жидкостей с разными теплофизическими и реологическими свойствами, начальных размеров капель, коллективных эффектов, схемы нагрева (кондуктивный, конвективный и радиационный), критериев распада, а также давления окружающей среды на времена задержки микровзрывного распада. В **заключении** представлены выводы по результатам диссертационных исследований, а также сформулированы соответствующие рекомендации.

Автореферат соответствует тексту рукописи диссертации.

Научная новизна результатов диссертации. Научная новизна изложенных в работе результатов заключается в следующем: экспериментально

и теоретически установлены условия реализации эффектов микровзрывного 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 микровзрывной фрагментации двухжидкостных капель при интенсивном нагреве. Установлены режимы существования двухжидкостных капель при нагреве. Выделены условия нагрева, при которых происходит микровзрывное разрушение двухжидкостной капли. Определены временные характеристики микровзрывной фрагментации. Зарегистрированы процессы зажигания и горения вторичных капель, образующихся в результате микровзрывного распада. Установлены масштабы влияния состава и вида капли (двухжидкостная капля или эмульсия) на времена существования и распада в потоке высокотемпературных газов. Определены характерные значения соотношений площадей поверхности испарения жидкости после и до микровзрывного дробления двухжидкостных капель при интенсивном нагреве.

Новые научные результаты опубликованы в международных журналах 1 квартеля: «International Journal of Heat and Mass Transfer» (ИФ= 4,947), «Fuel» (ИФ=5,128), «Applied Thermal Engineering» (ИФ=4,026), «Experimental Thermal and Fluid Science» (ИФ=3,444), «Combustion and Flame» (ИФ=4,570), «International Journal of Thermal Sciences» (ИФ=3,940), «Energy» (ИФ=5,747). Выполнена их апробация на российских и международных конференциях высокого уровня: Всероссийская конференция «XXXIV Сибирский теплофизический семинар, XXII Школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепло-массообмена в энергетических установках», XII

Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, 7th Sprays SIG workshop Sprays in engineering applications: modelling and experimental studies, The 3rd International Scientific Conference «Sustainable and Efficient Use of Energy, Water and Natural Resources».

Достоверность и обоснованность результатов диссертации.

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.

Теоретическая и практическая значимость.

Полученные экспериментальные и теоретические результаты, а также сформулированные заключения являются научными основами для разработки 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 топлива для совместного улучшения экологических, энергетических и экономических характеристик); термическая или огневая очистка воды; пожаротушение с применением двухжидкостных капель (за счет реализации микровзрывной фрагментации капель жидкости и последующего образования пароводяных облаков, способствующих увеличению площади покрытия очага горения и вытеснению окислителя). В диссертации отмечено, что имеется справка об использовании результатов исследований при разработке и реализации образовательных курсов с целью обучения студентов и магистрантов ресурсоэффективным технологиям вторичного измельчения капель различных жидкостей за счет микровзрывного распада. Результаты диссертационного исследования стали основанием для

актуализации содержания дисциплины «Моделирование тепловых процессов», направленной на обучение магистрантов направления «Теплоэнергетика и теплотехника», что подтверждается опубликованием методических указаний к выполнению лабораторных работ по указанной дисциплине.

Результаты диссертации могут быть использованы в Томском политехническом университете (ТПУ), Институте теплофизики им. С.С.Кутателадзе СО РАН, Всероссийском научно-исследовательском институте противопожарной обороны МЧС России (ВНИИПО), Академии Государственной противопожарной службы МЧС России.

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 д.ф.-м.н., профессором П.А. Стрижаком. Автор проводил лично и непосредственно участвовал в проведении экспериментальных и теоретических исследований, включая отладку экспериментальных методик и вычислительных кодов, проводил численные расчеты, участвовал в совместных обсуждениях при получении результатов исследований, а также при подготовке рукописей к публикации в высокорейтинговых журналах.

Замечания по рукописи и автореферату диссертации:

1. В диссертации нечетко сформулировано различие между режимами фрагментации в виде «паффинга» и микровзрывного распада. Было бы желательно предложить однозначный количественный критерий, позволяющий характеризовать режим фрагментации.
2. Диссертация содержит большое количество экспериментальных данных по временам задержки микровзрывного распада в широком диапазоне варьируемых параметров – температуры греющей среды, схемы нагрева, концентрации, типа и свойств горючей жидкости, размеров и технологии формирования капель. Полученные данные представлены в размерном

виде, хотя значительный интерес представляло бы их обобщение в виде безразмерных зависимостей.

3. На рис. 3.2.1.5 показаны примеры температурных распределений в двухжидкостной капле в разные моменты времени по результатам математического моделирования. При описании этих распределений отсутствует информация о соотношении значений теплопроводности жидкостей (воды и топлива) в составе двухжидкостных капель.
4. В работе экспериментально исследовались капли миллиметрового размера, однако в реальных энергетических установках форсунки распыляют топливо до капель с размерами порядка десятков микрон или даже нескольких микрон. К сожалению, в работе не отмечено, можно ли масштабировать исследованные закономерности и эффекты, т.е. перенести результаты проведенных исследований миллиметровых капель на капли микронных размеров.
5. С точки зрения использования результатов в практических приложениях, важную роль играют коллективные эффекты в плотном аэрозоле, когда происходит фрагментация неоднородной струи и достигаются высокие концентрации дисперсных капель. Поэтому было бы важно обсудить возможность применения полученных результатов исследований по одиночным каплям для таких систем, приведя соответствующие оценки.

Несмотря на указанные замечания, не вызывает сомнений, что в диссертации выполнен большой объем исследований по актуальному направлению на высоком научно-техническом уровне, основанном на применении современной измерительной аппаратуры и вычислительной базы, а также получены результаты, пополняющие объем знаний в данной области.

Заключение. Диссертация «Микро-взрывная фрагментация двухжидкостных капель», представленная Д.В. Антоновым на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, представляет собой научно-квалификационную работу, выполненную на современном исследовательском

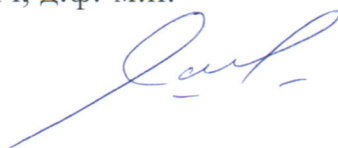
уровне, в которой представлены результаты уникальных экспериментальных исследований по предельным условиям инициирования микровзрывного распада двухжидкостных капель при разных схемах нагрева, которые позволили сформулировать критерии для реализации соответствующих процессов при разработке физических и математических моделей с учетом перегрева границы раздела вода/топливо, роста размеров пузырей и роста давления в капле, которые являются отправной точкой при переходе к аэрозольным потокам и спреям. Текст диссертации написан технически грамотным языком, соответствующим по стилю общепринятому в технической литературе. Текст автореферата правильно отражает содержание выполненного исследования. Результаты работы опубликованы в ведущих журналах и представлены на российских и международных конференциях.

Отзыв обсужден и одобрен на совместном заседании научного семинара «Механика реагирующих систем» (руководители: д.ф.-м.н. А.Д. Полянин и д.ф.-м.н. С.Е. Якуш) и научного семинара «Прикладная механика сплошных сред» (руководитель: д.ф.-м.н. А.Н. Рожков) в Институте проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук (ИПМех РАН), 119526, Москва, пр-т Вернадского, д. 101, к. 1, тел.: +7-495-434-00-17, Факс: 8-499-739-95-31, e-mail: ipm@ipmnet.ru, сайт: <https://www.ipmnet.ru/>. На семинаре присутствовали Сиваков Н.С., Садиллин А.С., д.ф.-м.н. Соболева Е.Б., Брызгалов А.И., д.ф.-м.н. Рашковский С.А., к.ф.-м.н. Котов М.А., Понаев 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. Калинин В.А., Руденко А.О., д.ф.-м.н. Рожков А.Н. Вопросы задавали д.ф.-м.н. Цыпкин Г.Г., д.ф.-м.н. Рожков А.Н., д.ф.-м.н. Соболева Е.Б., д.ф.-м.н. Якуш С.Е., д.ф.-м.н. Рашковский С.А., д.ф.-м.н. Полянин А.Д., д.ф.-м.н. Филиппов А.Н.. В обсуждении работы приняли участие д.ф.-м.н. Цыпкин Г.Г., д.ф.-м.н. Рожков А.Н., д.ф.-м.н. Соболева Е.Б., д.ф.-м.н. Якуш С.Е., д.ф.-м.н. Рашковский С.А., д.ф.-м.н. Полянин А.Д., д.ф.-м.н. Филиппов А.Н.

По результатам обсуждения единогласно принято решение считать диссертационную работу Д.В. Антонова «Микро-взрывная фрагментация двухжидкостных капель» завершенным исследованием, выполненным на высоком научном уровне. Диссертация соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842, и рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 Теплофизика и теоретическая теплотехника. Ее автор Дмитрий Владимирович Антонов заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Рашковский Сергей Александрович, д.ф.-м.н.

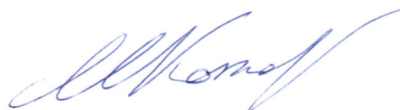
Главный научный сотрудник



Секретарь семинара

Котов Михаил Алтаевич, к.ф.-м.н.

Старший научный сотрудник



Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук (ИПМех РАН)

Адрес: 119526, Москва, пр-т Вернадского, д. 101, корп. 1

Тел.: +7-495-434-32-38, e-mail: ipm@ipmnet.ru, сайт: <https://ipmnet.ru/>