

УТВЕРЖДАЮ:

Заместитель проректора по науке

Национального исследовательского Томского
политехнического университета,

доктор технических наук



Степанов И.Б.

«5» октября 2021 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования «Национальный исследовательский Томский
политехнический университет»

Диссертация «Микро-взрывная фрагментация 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 соискатель Антонов Дмитрий Владимирович работал в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» в лаборатории моделирования процессов тепломассопереноса в должности младшего научного сотрудника исследовательской школы физики высокоэнергетических процессов; с 01.09.2020 обучается в очной аспирантуре федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

В 2020 г. 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».

Справка о сдаче кандидатских экзаменов по истории и философии науки (физико-математические науки), иностранному языку (английский) и специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника по направлению подготовки 03.06.01 – Физика и астрономия выдана в 2021 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, профессор.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Общая характеристика работы

Диссертация Антонова Дмитрия Владимировича представляет законченную научно-квалификационную работу, в которой изложены результаты экспериментальных и теоретических исследований, совокупность которых можно квалифицировать как новые научные достижения в области интенсификации процессов тепломассообмена. Определены характеристики микро-взрывной фрагментации двухжидкостных капель по результатам экспериментальных и теоретических исследований с применением высокоскоростной видеорегистрации, бесконтактных оптических методов, коммерческих и собственных программных кодов.

Полученные экспериментальные и теоретические результаты и сформулированные выводы обладают единством изложения результатов выполненных исследований. Оформление и стиль написания диссертации отвечают требованиям, предъявляемым к научно-квалификационным работам на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

Актуальность темы исследования

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.

Личное участие автора в получении результатов, изложенных в диссертации

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. Сажиным. 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.

Степень достоверности результатов проведенных исследований

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.

Новизна результатов проведенных исследований

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).

Апробация результатов исследования

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; 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.

Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем

Основные результаты диссертации опубликованы в более чем 30 печатных работах, в том числе 10 – в журналах из списка, рекомендованного ВАК РФ: «Физика горения и взрыва», «Письма в Журнал технической физики» («Technical Physics Letters»), «Доклады Академии наук», «Journal of Engineering Physics and Thermophysics», более 20 статей в высокорейтинговых журналах (входят в 1–2 квартили Web of Science): «International Journal of Heat and Mass Transfer» (ИФ= 4,947), «Fuel» (ИФ=5,128), «Thermal Science» (ИФ=1,574), «Chemical Engineering Research and Design» (ИФ=3,350), «Acta Astronautica» (ИФ=2,482), «Journal of the Energy Institute» (ИФ=4,748), «Applied Thermal Engineering» (ИФ=4,026), «Experimental Thermal and Fluid Science» (ИФ=3,444), «Combustion and Flame» (ИФ=4,570), «Microgravity Science and Technology» (ИФ=1,40), «International Journal of Thermal Sciences» (ИФ=3,940), «International Communications in Heat and Mass Transfer» (ИФ=3,470), «Energies» (ИФ=2,676), «Fuel Processing Technology» (ИФ=4,982), «Energy» (ИФ=5,747). Получены 25 свидетельств о регистрации программ ЭВМ.

Соответствие содержания диссертации избранной специальности

Диссертация является завершенной научно-квалификационной работой и соответствует специальности 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника:

1. Теоретические и экспериментальные исследования свойств веществ в жидком состоянии при наличии всех видов тепло- и массообмена во всем диапазоне температур и давлений.
2. Численное и натурное моделирование теплофизических процессов в природе, технике и эксперименте.
3. Исследование и разработка рекомендаций по повышению качества и улучшению теплофизических свойств веществ в жидком состоянии для последующего использования в народном хозяйстве.

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 Теплоэнергетической секции Научно-технического совета Инженерной школы энергетики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Присутствовало на заседании – 10 чел. Результаты голосования: «за» – 10 чел., «против» – нет, «воздержалось» – нет, протокол № 13 от 28 апреля 2021 г.

Председатель Теплоэнергетической
секции Научно-технического совета,
д.ф.-м.н., профессор И.Н. Бутакова
ИШЭ ТПУ

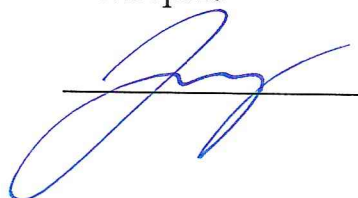
 Г.В. Кузнецов

Секретарь научно-технического совета
ИШЭ ТПУ

 С.В. Филимонова

Подписи Кузнецова Г.В. и Филимоновой С.В. заверяю

Ученый секретарь Ученого совета ТПУ

 Е.А. Кулинич