

**Отзыв официального оппонента**  
**на диссертацию Антонова Дмитрия Владимировича**  
**«Микро-взрывная фрагментация двухжидкостных капель»,**  
**представленную на соискание ученой степени кандидата**  
**физико-математических наук по специальности**  
**1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника**

**Актуальность темы диссертации**

Процессы тепломассопереноса в каплях и на каплях как прежде, так и особенно в настоящее время, представляют интерес для фундаментального знания и для различных приложений. Одним из таковых является изучение эволюций капель топлив. В этом плане активно разрабатываются технологии, обеспечивающие минимизацию расхода топлива, повышение эффективности процесса горения, снижение вредных выбросов, повышение полноты выгорания топлива, улучшение качества и удешевление процесса подготовки и распыления топлива. Другое направление исследований связано с огневой очисткой воды от примесей, при которой очищаемая жидкость циклически подается в камеру термической очистки. Примеси не успевают выпариться в нагревательной камере в течение одного цикла, что приводит к увеличению расхода затрачиваемой энергии и существенному увеличению длительности протекания соответствующих процессов.

Автор справедливо отмечает, что 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». Однако дробление капель при подаче в нагревательные камеры может приводить к дополнительным технологическим сложностям и ограничениям, поэтому целесообразно осуществлять такое дробление в процессе нагрева. Одним из перспективных методов интенсивного дробления представляется достижение условий микро-взрывной фрагментации капель с образованием топливного аэрозоля, чему посвящена рассматриваемая работа. Ставящиеся задачи важны для достоверного прогнозирования последствий дробления капель вследствие локального перегрева и вскипания, а также возможных режимов протекания этих процессов, а тема диссертации Антонова Д.В. безусловно актуальна в этой области.

**Анализ содержания диссертационной работы**

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка условных обозначений и символов, списка процитированной литературы. Во введении описывается изучаемая проблема, обосновывается актуальность темы диссертации,

формулируются цели и задачи исследования, его научная новизна и практическая значимость, перечисляются положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен обзор современного состояния исследований характеристик микро-взрывной фрагментации, в котором анализируются работы отечественных и зарубежных научных школ по изучаемой проблеме, приводится информация о резком росте публикационной активности в рассматриваемой тематике, наблюдаемом с начала 21-го века. Констатируется многоплановость и широта изучаемой проблемы. В частности, говорится о том, что «энергоэффективное зажигание капель топлив в камерах сгорания двигателей, топках паровых и водогрейных котлов, печей и других промышленных установок является важной проблемой как с точки зрения рационального расходования энергоресурсов, так и с точки зрения снижения негативного антропогенного воздействия на окружающую среду». Далее рассматриваются применяемые в настоящее время модели микро-взрывного распада, отмечаются их ограничения, связанные с «учетом группы параметров и механизмов, установленных в экспериментах, а также исключением из рассмотрения некоторых процессов и эффектов по причине отсутствия адекватных экспериментальных сведений или сложностей вычислений». Глава заканчивается выводами, в которых дается определение понятия микро-взрыва, перечисляются ключевые подходы и методы регистрации этого явления, допущения и несовершенства современных моделей его описания, намечается программа проведения соответствующих экспериментальных и теоретических исследований.

Вторая глава посвящена экспериментальным исследованиям условий и характеристик микро-взрывной фрагментации. Последовательно излагаются планирование экспериментов, технология формирования капель, методы исследований, варьируемые и регистрируемые параметры, неопределенности измерений. Рассмотрены пять экспериментальных стендов для нагрева исследуемых капель различными способами. Описание аппаратуры и методики проведения экспериментальных исследований осуществлено подробно и конкретно. Чувствуется, что автор хорошо освоил изучаемый материал. Во второй части этой главы в разделе 2.7 изложены результаты экспериментов, подробно обсуждается влияние температуры газовой среды, схемы нагрева, соотношения концентраций компонентов, входящих в состав капель, размеров и технологии формирования капель, вязкости, поверхностного натяжения. Представление результатов экспериментов осуществлено наглядно в виде фотографий эволюций капель и графических зависимостей времени задержки микро-взрывного распада от температуры. Глава заканчивается обобщением результатов экспериментальных исследований для капель с разным размером дисперсной фазы (воды).

В третьей главе даются теоретические исследования условий и характеристик микро-взрывного распада двух-жидкостных капель. Рассматриваются три модели тепломассопереноса в таких каплях до условий микро-взрывного распада: по перегреву

границы раздела «вода/топливо» выше температуры кипения воды (модель 1), по критическому размеру пузыря (модель 2), по превышению давления в паровой пленке (модель 3). Затем выполняются апробация и верификация предложенных моделей путем сравнения в том числе тестовых результатов расчета зависимостей времени задержки распада от начального радиуса капли, полученных по модели 1, с соответствующими экспериментальными данными. Отмечается удовлетворительное согласие при начальных радиусах капель меньше 0.7 мм и возрастание различий с ростом этого размера. Предложено объяснение такого поведения. В завершающем разделе 3.4 этой главы осуществляется обобщение и обсуждение данных проведенного математического моделирования. При этом анализируется влияние на получаемые результаты различных факторов: температуры и давления внешней среды, соотношения концентраций жидкостей, входящих в состав капель, их начальных размеров, способа подвода теплоты, роли коллективных эффектов в совокупности капель. Глава заканчивается предложением трех критериев микро-взрывного распада, определяющих времена задержки фрагментации двух-жидкостных капель (вода/дизельное топливо) при варьировании ключевых входных параметров в широких диапазонах температуры внешней среды, начальных радиусов, соотношений объемных концентраций жидкостей входящих в состав капель. Подчеркивается, что «эти диапазоны соответствуют перспективным технологиям вторичного измельчения топлив в энергетических установках и дизельных двигателях».

### **Научная новизна**

В работе представлены оригинальные результаты об эволюции двух-жидкостных капель, полученные лично соискателем. Экспериментальные данные о времени задержки микро-взрыва обладают мировым уровнем. Установлены условия реализации эффектов дробления двух-жидкостных капель, а также масштабы влияния состава и вида этих капель на времена существования и распада в потоке высокотемпературных газов. На базе высокоскоростной регистрирующей аппаратуры и бесконтактных оптических методов диагностики потоков разработаны экспериментальные методики, позволившие изучить закономерности микро-взрывной фрагментации исследуемых капель при интенсивном нагреве.

### **Достоверность и обоснованность результатов и выводов**

Достоверность полученных экспериментальных данных подтверждается их хорошей воспроизводимостью, подробным анализом влияния различных факторов на характеристики исследуемых процессов, оценкой неопределенностей измерений. Научные положения и выводы, сформулированные в диссертации, подкреплены теоретическими выкладками и результатами расчетов.

### **Практическая значимость работы**

Новые опытные данные по различным режимам эволюции двух-жидкостных капель и топливных эмульсий при высокотемпературном нагреве, приведенные в работе, уже сами по себе представляют практическую ценность. Кроме того, в последнем пункте заключения диссертации обоснованно делается вывод о том, что «полученные результаты создают объективные предпосылки для развития технологий зажигания облака капель жидких топлив, а также технологий термической и огневой очистки жидкостей от загрязняющих их нерегламентированных примесей».

### **Замечания по диссертационной работе**

1. Рисунок 2.7.6.5 на странице 90 показывает не карту типичных режимов микро-взрывной фрагментации группы капель топливных эмульсий, как значится в подрисуночной подписи, а скорее представляет обобщение полученных экспериментальных данных.

2. На странице 105 в знаменателе формулы 3.2.1.8 пропущена плотность жидкой капли  $\rho_d$ .

3. Слишком оптимистичным выглядит заключение по рисунку 3.3.2 на странице 126 о том, что «максимальные отклонения результатов математического моделирования и экспериментальных данных не превышают 7 %».

4. В разделе 3.4.6 анализируется влияние коллективных эффектов в совокупности капель. С этой целью рассматривалась задача о взаимном влиянии двух капель разного размера, расположенных на фиксированном расстоянии друг от друга. Для получения корреляционных соотношений для чисел Нуссельта и Шервуда решалась система дифференциальных уравнений с использованием метода конечных элементов в программном комплексе Comsol Multiphysics для двумерной геометрии. В диссертации ничего не говорится о числе элементов, на которые разбивалась изучаемая область, а также о влиянии количества разбиений и типа сетки на результаты решений.

5. Второй вывод по третьей главе на странице 150 неадекватно передает роль полученных результатов численных исследований. Вместо заключительного предложения этого вывода: «Разработанные модели позволяют с высокой степенью достоверности воспроизводить результаты экспериментов и в широком диапазоне варьировать параметры двухжидкостных капель» правильней было бы констатировать, что эти расчетные модели при наличии полученных экспериментальных данных позволяют прогнозировать времена задержки распада капель.

6. Жаль, что в разделе 2.4 не описана процедура синхронизации обработки получаемых данных.

Перечисленные замечания не меняют общей положительной оценки диссертационной работы, которая демонстрирует высокую квалификацию автора в исследуемой области.

Результаты работы вполне исчерпывающе представлены более чем в тридцати печатных публикациях, из них в десяти статьях журналов перечня ВАК РФ, не менее двадцати статьях в высокорейтинговых журналах, входящих в 1 – 2 квартили Web of Science. Автореферат полно отражает содержание диссертации, которая прошла необходимую апробацию на многочисленных научных отечественных и международных конференциях, семинарах и школах.

Считаю, что диссертационная работа Д.В. Антонова является законченным научным исследованием, которое имеет научную и практическую ценность в области экспериментального исследования эволюции двух-жидкостных капель, включая их фрагментацию, и соответствующего численного моделирования. Диссертация соответствует требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор Антонов Дмитрий Владимирович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Официальный оппонент,  
доктор технических наук,  
(1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника),  
профессор кафедры низких температур  
ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»

Крюков Алексей Павлович

10.03.2022

Крюков Алексей Павлович

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Почтовый адрес: 111250, Россия, г. Москва, вн.тер.г. муниципальный округ Лефортово, ул. Красноказарменная, д.14, стр.1

Телефон: +7-495-362-78-41

Электронная почта: [KryukovAP@mpei.ru](mailto:KryukovAP@mpei.ru)



Подпись Крюкова А.П. заверяю  
Заместитель начальника управления  
по работе с персоналом

Полевая Л.И.

Я, Крюков Алексей Павлович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Антонова Дмитрия Владимировича, и их дальнейшую обработку.