

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию 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»

Понимание научным сообществом и руководством большинства стран необходимости снижения техногенной нагрузки на окружающую среду послужило мотивацией для разработки новых топливных технологий, направленных на улучшение экологических, энергетических и экономических характеристик применения топлива. Многообещающий путь повышения эффективности топлива состоит в измельчении капель жидкостей за счет фазового перехода жидкость-пар, что позволяет значительно увеличить площадь поверхности испарения, вплоть до двух порядков величины. Вовлечение в исследование фазового перехода, в том числе, сосредоточенного во времени и в пространстве (взрывного вскипания), сопровождается серьезными требованиями к быстродействию и разрешающей способности аппаратуры. Выяснить характерные черты процесса в области изменения параметров, недоступной в опытах, возможно применением моделирования. В этой связи, решаемая автором задача осуществления в опытах микро-взрывной фрагментации двухжидкостных капель при интенсивном нагреве в газовой среде и разработки математических моделей тепломассопереноса в каплях вода-топливо и каплях топливных эмульсий перед их фрагментацией является сложной по сути, актуальной по тематике и практически значимой по содержанию.

Действительно, ее решение важно для развития ряда парокапельных технологий. Основываясь на опыте преподавания в вузе системы МЧС России, в том числе, авторского курса «Теплофизика быстропротекающих процессов», меня привлекла техника тушения пожаров с применением тонкораспыленной воды и парокапельных завес. Поясню, что одна из проблем пожаротушения

состоит в повышении эффективности использования воды. Нередко потери от излишне пролитой воды наносят больший ущерб, чем сам пожар.

Научная новизна работы состоит в экспериментальном осуществлении микро-взрывной фрагментации двухжидкостных капель «вода-топливо» с установлением основных стадий и механизмов фрагментации при различных условиях подвода тепла;

в определении, в рамках разработанных моделей, зависимостей интегральных характеристик микро-взрывной фрагментации от группы основных параметров системы, а именно, от температуры, давления, скорости потока газовой среды, вида и концентрации горючей жидкости, способа нагрева и размера капель;

в выяснении характерных черт физических процессов, протекающих в двухжидкостной капле при ее интенсивном нагреве.

Теоретическая и практическая значимость работы состоит в получении массива экспериментальных и теоретических результатов, послуживших научной основой собственного направления в системе быстропротекающих фазовых переходов в неоднородных системах и практической основой разработки высокотемпературных газопарокапельных приложений, в том числе, средства пожаротушения, упомянутого выше.

Достоверность результатов подтверждается оценкой систематических и случайных погрешностей измерений, повторяемостью экспериментальных данных в серии опытов при идентичных начальных параметрах системы, а также применением современного высокоточного оборудования и процедур его калибровки.

Личный вклад автора состоял в проведении экспериментальных и теоретических исследований, включая отладку экспериментальных методик и вычислительных кодов, проведении численных расчетов, участии в совместных (с проф. П.А. Стрижаком и другими соавторами) обсуждениях полученных результатов исследований, а также при подготовке рукописей к публикации в журналах.

Структура диссертации

Введение обосновывает актуальность, практическую значимость объекта изучения, формулировку цели и задач исследования, научную новизну полученных результатов.

Первая глава содержит краткий обзор состояния исследований микро-взрывной фрагментации двухжидкостных капель, проводимых в мире. При обсуждении истории вопроса, не упомянута, важная, на наш взгляд, пионерская работа по достижимому перегреву капелек жидкости в фоновой (нерастворимой) жидкой среде, см. В.П. Скрипов, В.И. Кукушкин, ЖФХ, 1961, 35, 2811. По масштабам характерных параметров она перекликается с рассматриваемым в обзоре подходом. В то же время, ней выявлена величина перегрева жидкости (относительно температуры равновесия жидкость-пар при атмосферном давлении), на порядок превышающая перегрев, наблюдаемый при микро-взрывной фрагментации капель. Выяснение внутренних причин такого рассогласования может дать подсказку для пути снятия ограничения по перегреву капли перед ее фрагментацией.

В выводах по первой главе, в частности, отмечено, что анализируемые модели микро-взрыва имеют ряд серьезных допущений, в том числе, независимость теплофизических и термодинамических свойств от температуры. Поставлена задача под экспериментальное и теоретическое исследование характеристик микро-взрывной фрагментации двухжидкостных капель. Отмечена важность выяснения механизмов осуществления микро-взрывных эффектов в разных условиях нагрева, а именно, на разогретой поверхности, в потоке газа и в муфельной печи.

Во второй главе дано представление о созданных под задачу экспериментальных установках, разработанных методиках измерений, обработки первичных данных и оценке погрешностей измерений. Понятно описаны методы регистрации процессов прогрева, испарения, микро-взрывного распада капель и обработки данных с использованием программных комплексов. Приведена классификация

задаваемых и регистрируемых в опыте величин. Пристальное внимание уделено представлению экспериментальных результатов и обсуждению основных факторов влияния, а именно, температуры газовой среды и теплового потока, схемы нагрева, концентрации жидкостей, размеров капель, вязкости, поверхностного и межфазного натяжения, коллективных эффектов на микро-взрывной распад капель. Речь идет, в первую очередь, о времени задержки *микро-взрывного* распада. Под этим временем понимается полная продолжительность нагрева капли. Важно, на наш взгляд, ввести дополнительную переменную – «время нахождения вещества в перегретом состоянии», по аналогии с понятием «время жизни» в явлении перегрева. Очевидно, такой шаг потребует уменьшения времени дискретизации работы возбуждающего лазера относительно принятого в работе значения 0,1 с. Самый тонкий момент в быстрых опытах – измерения температуры капли и границы раздела двух жидкостей описан недостаточно подробно. И если процедура калибровки представлена в деталях, то техника отслеживания эволюции искомой температуры в опыте оставлена за занавесом. Не разрешает проблему и приведенная на с. 50 ссылка [136], в которой «подробно описаны» детали. Далее, обсуждение измерений *температуры* по интенсивности люминесценции в условиях быстрого нагрева было бы усилено при наличии анализа вклада собственно Rhodamine B, который хорошо поглощает ИК излучение. Напрашивается проведение сопоставления времен задержки в опытах с добавками частиц и без них.

Третья глава содержит подробные результаты применения разработанных автором физических и математических моделей тепломассопереноса в двухжидкостной капле в условиях, предшествующих микро-взрывному распаду. Обоснован выбор группы типичных предельных условий распада: по достижению температуры дисперсной фазы (воды) на границе раздела значений, соответствующих температуре начала взрывного вскипания (автором применен малоупотребительный в данном контексте термин «кипение»); по превышению критических значений размеров пузырей или объединенного пузыря в капле; по

превышению давления в паровой пленке. В ходе моделирования было выяснено влияние температуры греющей среды, концентрации горючих жидкостей с разными теплофизическими и реологическими свойствами, начальных размеров капель, коллективных эффектов, трех схем нагрева, упомянутых выше критериев распада, а также давления окружающей среды на времена задержки распада. Больше всего вопросов возникло именно в связи с зависимостью от давления, см. следующий раздел.

В результате, удалось теоретически предсказать значения времени задержки фрагментации двухжидкостных капель при задании ключевых входных параметров в широкой области их изменения. Эта область соответствует перспективным технологиям вторичного измельчения топлив в энергетических установках и дизельных двигателях. При этом, опыты в ней трудно (или невозможно на данном этапе) осуществить. Разработанные модели могут быть распространены на случай аэрозольных потоков и спреев.

Замечания по диссертации

1. Результаты по температуре перегрева капли относительно температуры равновесия жидкость-пар получены с использованием скоростных бесконтактных измерений. Однако при анализе результатов не приведены ключевые сведения о ходе опыта. В частности, не показан ход изменения температуры во времени, в том числе, его повторяемость и чувствительность к изменениям параметров опыта. Данное обстоятельство затрудняет оценку времени жизни перегретого состояния, выяснение динамических неопределенностей и обоснование неопределенности измерения температуры. В целом оно приводит к нарушению протокола температурных измерений в быстропротекающих процессах (S.B. Rutin, P.V. Skripov, Int. J. Thermophys. **37**, 102, 2016).
2. Требуется пояснение предложение, с. 112, «Режим нуклеации, *подобный гомогенному режиму*, в двухжидкостных каплях достигается при гетерогенном режиме нуклеации около границы раздела вода/топливо». Дело в том, что

гомогенный режим должен сопровождаться совершенно отличными признаками фазового перехода, которые, как мне известно, в опыте пока не наблюдались.

3. Вывод «При предельных значениях перегрева жидкости ... использование выражения (3.2.2.9) не имеет ясного физического обоснования» (с. 122) неверен. Оно представляет собой условие механического равновесия, дополняемого, в общем случае, условиями температурного и вещественного равновесия.

4. Знак зависимости времени задержки от давления окружающей среды требует дополнительного пояснения. Процесс развивается на фоне существенного повышения температуры равновесия жидкость-пар (на 160 К для 5 МПа) и температуры достигаемого перегрева, снижения теплопроводности горючей жидкости и конечного температурного напора, работающих на повышение времени задержки. На его снижение работает только коэффициент теплоотдачи к среде. Масштаб рисунка 3.4.4.1 неоправданно грубый.

5. Неправоммерно применен термин «теплопередача» (с. 25), переменная «тепло, затрачиваемое на повышение температуры капли» (с. 156) не соответствует приведенной размерности; опечатки на с. 84, 108, 115.

Замечания сформулированы с прицелом на развитие исследования и не влияют на его общую положительную оценку. Работа выполнена на высоком научно-техническом уровне, основанном на применении современной измерительной и вычислительной базы, свойственном исследованиям взаимодействия капель жидкостей с газовыми средами, проводимых в группе профессора А.П. Стрижака.

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 высоком исследовательском уровне и на актуальную тему. Текст диссертации написан технически грамотным языком, соответствующим по стилю общепринятому в технической литературе. Текст автореферата дает представление о сути выполненного исследования. Результаты работы

опубликованы в ведущих журналах и представлены на российских и международных конференциях.

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».

Считаю, что Дмитрию Владимировичу Антонову может быть присуждена ученая степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Ведущий научный сотрудник Федерального
государственного бюджетного учреждения науки
Института теплофизики Уральского отделения
Российской академии наук,
Доктор физико-математических наук по
специальности 01.04.14 - теплофизика и
теоретическая теплотехника



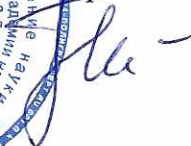
Скрипов Павел Владимирович

10 февраля 2022 г.

Отзыв составил Скрипов Павел Владимирович, ФГБУН Институт
теплофизики Уральского отделения Российской академии наук, 620016, г.
Екатеринбург, ул. Амундсена, д. 106
pavel-skripov@bk.ru, тел. +7(343) 267-8800, сайт: <http://itp.uran.ru/>

Подпись д. ф.-м. н. П.В. Скрипова заверяю:

Ученый секретарь института



Мезенцев Петр Евгеньевич