

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Романа Михайловича Федоренко на тему «Вторичные фрагменты при микро-взрывном распаде двухжидкостных капель», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника»

Создание технологий, способствующих минимизации расхода топлива, повышению интегральных характеристик и полноты его выгорания, и, в итоге, снижению антропогенных выбросов при сжигании топлива, является современным трендом в создании продвинутых энергетических технологий. Привлекательным, с точки зрения устойчивости осуществления, затрат энергии и времени, представляется достижение условий микро-взрывного распада двухжидкостных капель (вода в топливе) при их интенсивном нагреве с образованием топливного аэрозоля. В этом направлении предпринимаются попытки разработки соответствующих технологий научными группами со всего мира.

В частности, международной группой с центром в Национальном исследовательском Томском политехническом университете осуществляются систематические исследования характеристик микро-взрывной фрагментации двухжидкостных капель в зависимости от температуры и давления греющей среды, начальных размеров и концентрации капель, локализации капли воды в капле топлива. Существенная трудность исследования связана с выяснением локальных значений температур на границах двух жидкостей, запускающих микро-взрывной распад. Для внедрения сопровождающих распад эффектов, важно выяснить условия, при которых образуются вторичные фрагменты с требуемыми размерами и скоростями движения. В этой связи, решаемая автором задача определения характеристик вторичных фрагментов при микро-взрывном распаде двухжидкостных капель является сложной по сути, актуальной по тематике и практически значимой по содержанию.

Научная новизна работы состоит в вовлечении современных методик экспериментальных исследований, основанных на применении высокоскоростной регистрирующей аппаратуры и бесконтактных оптических методов для изучения характеристик вторичных фрагментов при микро-взрывном распаде двухжидкостных капель. С их помощью получено новое знание по таким характеристикам, отвечающим различным условиям подвода тепла, как распределения размеров и скоростей вторичных фрагментов, а также их компонентный состав. Развита физическая и математическая модели микро-взрывного распада и построены карты режимов распада с применением безразмерных комплексов, позволяющие прогнозировать фрагментацию капель с различной интенсивностью.

Теоретическая и практическая значимость работы состоит в получении нового знания, важного для фундаментального понимания физики процесса микро-взрывного распада двухжидкостных капель. Это знание составит практическую основу для разработки эффективных методов управления процессами тепломассообмена в перспективных высокотемпературных газопарокапельных технологиях (сжигание жидких и суспензионных топлив, термическая и огневая очистка жидкостей, пожаротушение и др.).

Достоверность полученных результатов обеспечивается применением современных методов, проведением калибровочных измерений, применением селективной методики обработки видеок кадров, повторяемостью первичных данных в серии опытов при сопоставимых начальных условиях, публикацией результатов исследований в научных журналах, а также международным признанием научной группы и собственно руководителя диссертанта.

Личный вклад автора Основные научные результаты и выводы, включенные в диссертацию и выносимые на защиту, получены соискателем лично. Вклад соискателя состоял в проектировании экспериментальной базы, отладке методик измерений и вычислительных кодов, проведении опытов и теоретических исследований, обработке результатов, участии в подготовке публикаций.

Структура диссертации

Введение обосновывает актуальность, практическую значимость объекта изучения, формулировку цели и задач исследования, научную новизну результатов, положений, выносимых на защиту, поясняет личный вклад соискателя.

Первая глава содержит обзор работ, сформировавших текущее состояние представлений о вторичных фрагментах при микро-взрывном распаде неоднородных капель в контексте возможности применения явления микро-взрывного распада в практических приложениях. Автор уделил внимание обсуждению работ, позволяющих, в определенных условиях, прогнозировать последствия микро-взрывного распада. Сделан вывод, выводящий, в итоге, на постановку задачи диссертационного исследования, об отсутствии в настоящий момент единой теории образования вторичных фрагментов при микро-взрыве капли, необходимой для получения более полного представления о процессах фазовых превращений и внедрения данного явления в технологии сжигания жидких и суспензионных топлив. В этой связи, подчеркнута важность, во-первых, создания базы данных, связывающей условия процесса с размерами, скоростями, и компонентным составом вторичных фрагментов и, во-вторых, разработки математических моделей, позволяющих прогнозировать характеристики вторичных фрагментов при задании условий процесса.

Итоги обзора подведены в разделе Выводы по первой главе. В них, в частности, не упомянута степень перегрева воды в перечне параметров, вносящих «наибольший вклад» в обсуждаемый процесс. В то же время, в качестве наиболее распространенного критерия запуска распада отмечено, со ссылкой на [71], «... достижение на границе раздела вода/горючая жидкость температуры кипения воды». На наш взгляд, подобный критерий не отражает сути процесса.

Во второй главе подробно описаны созданные под задачу экспериментальные установки. Задача измерений, амбициозная по своему содержанию, определена как выяснение размеров, скорости, компонентного

состава вторичных фрагментов, отношения площадей поверхности жидкости после и до распада при осуществлении частичного и полного (микро-взрыв) распада исходных капель. Перечень компонентов исходных двухжидкостных капель и их ключевых свойств, а также свойства эмульсий при начальной температуре сведены, для удобства читателя, в отдельные таблицы. Понятно описаны технологии формирования исходных капель и методы измерений параметров вторичных фрагментов.

Объем результатов опытов, вовлеченных в обсуждение, очень велик. Последовательно обсуждено влияние температуры внешней газовой среды, схемы нагрева, начальной температуры негорючего компонента, начального размера родительских капель, вязкости и поверхностного натяжения компонентов, коллективных эффектов, тонины помола, типа и концентрации твердых частиц. При анализе компонентного состава вторичных фрагментов сделан вывод, что оптимальным, с точки зрения достижения наименьших размеров вторичных фрагментов, является состав с минимальной концентрацией негорючего компонента, а именно, с объемной долей воды, не превышающей 10 объем.%. В свою очередь, увеличение начальных размеров капель, как и снижение температуры нагрева, приводит к смене режима распада с микро-взрыва на паффинг, который характеризуется более крупными вторичными фрагментами. Обобщение результатов измерений выполнено на основе зависимостей, характеризующих масштабы уменьшения размеров капли от двух наиболее значимых факторов (теплового потока и концентрации горючей жидкости) и отношения площадей поверхности испарения после и до распада (S_1/S_0). Хотя, отметим, собственно тепловой поток в работе не определялся. В целом, обобщающие результаты трехмерные графики позволяют прогнозировать условия, необходимые для уменьшения размеров вторичных фрагментов и увеличения площади поверхности испарения S_1/S_0 .

Полученный массив результатов дополнительно обсужден в разделе Выводы по второй главе. Он войдет в состав информационной базы данных для развития современных моделей распада двухжидкостных капель. В выводах, в

частности, отмечена возможность управления процессом распада за счет выбора области изменения исходных параметров, а именно, начального размера родительских капель, концентрации воды и топлива в них, температуры и схемы нагрева, а также значимость результатов для развития технологий зажигания жидких и суспензионных топлив, термической и огневой очистки жидкостей.

Третья глава посвящена теоретическому исследованию характеристик вторичных фрагментов при микро-взрывном распаде. Оно основано на понятном предположении, что вода вблизи границы раздела с горючей жидкостью оказывается перегретой. Данное обстоятельство отнесено к основной причине распада капель. Моделирование распада двухжидкостной капли выполнено с привязкой к росту давления паров и их расширению в образующейся паровой пленке. Его основным результатом считаю возможность прогнозирования среднего размера вторичных фрагментов в широкой области изменения параметров системы, таких, как размеры, концентрация и свойства жидкостей, составляющих каплю, а также температуры греющей среды, схемы нагрева и скорости газового потока.

Результаты моделирования средних размеров вторичных фрагментов верифицированы при сопоставлении с опытными данными, полученными при тех же исходных параметрах системы, а именно, с видеокадрами микро-взрывного распада двухжидкостной капли. Далее, результаты моделирования обсуждены применительно к изменению температуры внешней среды (от 573 до 773 К), смещению водяного ядра относительно центра капли и изменению формы (отклонению от сферичности) исходной капли. Результаты моделирования обобщены в разделе Выводы по третьей главе.

В заключении перечислены основные результаты работы, подчеркнута их важность как практической основы экономии энергоресурсов при создании технологий распыления жидкостей разного назначения.

Замечания по диссертации

1. Во введении, с. 8 и 11, в перечне факторов, оказывающих «определяющее влияние на количество и размеры вторичных фрагментов», не указана степень перегрева жидкости относительно температуры равновесия жидкость-пар. Именно этот фактор является ключевым в технологических приложениях (например, струйный принтер), основанных на преобразовании энергии взрывного вскипания в механическое перемещение. Речь идет о комплексе $V \cdot t_{\text{exp}}$, где V – объем перегретой фазы; t_{exp} – время наблюдения перегретого состояния.
2. В обзоре данных по микро-взрывному распаду отсутствует ссылка на монографию Н.В. Буланова «Взрывное вскипание диспергированных жидкостей». Екатеринбург, УрГУПС, 2011, обобщающую результаты, полученные в нашей теплофизической школе, начиная с 70-х годов. Ее вовлечение в обсуждение, возможно, способствовало бы снятию первого замечания.
3. В виду косвенного характера измерений температуры и своеобразия температурного поля в двухжидкостной капле, утверждение на с. 48 о том, что флуорофор Rhodamine B «не оказывает влияние на характеристики микро-взрывной фрагментации [162]» предполагает дополнительное обоснование. Ссылка 162 в данном контексте не вполне уместна, поскольку в ней речь идет об удобстве применения Rhodamine B как температурно-чувствительного маркера, без «детализации распределения температуры внутри капель».
4. В пояснениях на с. 53 и в 3.1 допущено смешение разных по сути понятий: «Давление насыщенных паров воды увеличивается с ростом степени перегрева», а именно, «давление н.п.» относится к равновесным условиям при плоской границе раздела фаз, а при росте пузырька в объеме перегретой жидкости оперируют понятиями давления внутри и вне пузырька.
5. В пояснении к виду зависимости $S_1/S_0(T_a)$, с. 61 и далее, на с. 109, указаны значения «максимальной температуры» перегрева воды в 393–398 К. Столь

низкие перегревы не могут привести к столь масштабным эффектам, наблюдаемым в обсуждаемых опытах. Отметим, что даже в квазистатических опытах по перегреву воды были получены степени перегрева, на порядок величины превышающие указанные выше значения, см., например, работу Висмера (K.L. Wismer) столетней (!) давности. Подробнее вопрос раскрыт в статьях с участием автора отзыва (J. Eng. Thermophys., 2022, 31(4), 664–667; Int. J. Heat and Mass Transfer, 2023, 207, 123970), не попавших в список литературы. Согласование данных опыта по микровзрыву двухжидкостных капель и известных данных по достижимому перегреву воды рассматривается мной как основная задача развития данного исследования.

Представленные замечания несут, отчасти, отпечаток «пионерского» характера данного исследования. Они сформулированы с учетом перспектив развития исследования, предполагают роль «подсказки» в выборе пути решения первоочередных задач исследования, и не влияют на его общую положительную оценку. Работа выполнена на высоком уровне, с привлечением современной измерительной техники и вычислительной базы. Отзыв составлен на основании изучения текста диссертации, знакомства с оригинальными статьями соискателя и его выступления на руководимом мной теплофизическом семинаре.

Заключение

Диссертация «Вторичные фрагменты при микро-взрывном распаде двухжидкостных капель», представленная Р.М. Федоренко 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. Текст автореферата дает представление о сути выполненного исследования. Результаты работы подробно опубликованы в международных и, что немаловажно, в российских журналах.

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 Роману Михайловичу Федоренко может быть присуждена ученая степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Доктор физико-математических наук

(01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника)

Главный научный сотрудник

лаборатории быстропротекающих процессов

и физики кипения

ФГБУН Института теплофизики

Уральского отделения

Российской академии наук

24 января 2024 г.

Скрипов Павел Владимирович

Подпись Скрипова П.В. заверяю

Начальник отдела кадров

Семенова Людмила Александровна



Почтовый адрес: 620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, д. 107а.

Телефон: +7(343) 267-88-01

Адрес электронной почты: pavel-skripov@bk.ru

Наименование организации: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики Уральского отделения Российской академии наук

Я, Скрипов Павел Владимирович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Федоренко Романа Михайловича, и их дальнейшую обработку.