

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора технических наук Елистратова Сергея Львовича на диссертацию Пискунова Максима Владимировича «Фазовые превращения капель воды с твердыми нерастворимыми включениями при высокотемпературном нагреве», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.14– Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Актуальность темы диссертации

Одним из важнейших направлений развития технологий пожаротушения является интенсификация теплообмена используемой для ликвидации горения воды с горящими объектами и продуктами горения в высокотемпературной пламенной зоне. Образование паров воды способствует снижению температуры и вытеснению кислорода из зоны горения. Добавки специализированных примесей в исходную воду, а также смешение воды с угольными частицами объектов горения в процессе тушения пожара, как показывает практика, позволяют ускорить процесс парообразования и снизить общий расход воды.

В теплоэнергетике и теплотехнологиях сжигание углей по экологическим соображениям целесообразно производить в виде водоугольных суспензий. Эффективность начальной стадии их прогрева в топочном пространстве котла определяется закономерностями фазовых превращений на межфазных границах.

В связи с изложенным, актуальность и своевременность диссертационной работы Пискунова М.В., посвященной исследованию особенностей фазовых превращений капель воды с твердыми нерастворимыми включениями при высокотемпературном нагреве, не вызывает сомнения.

Степень обоснованности научных положений и рекомендаций.

Научные положения, выводы и рекомендации представляются достоверными, так как опираются на известную экспериментальную базу и методики исследований.

Использованные автором экспериментальные методики хорошо продуманы и обоснованы, направлены на прояснение физической картины процессов тепломассопереноса при теплообмене капель в контролируемых

условиях. Достоверность результатов исследований определяется повторяемостью результатов, приведенным анализом погрешностей измерений высокоточного современного оборудования, общепринятыми методиками представления и сравнения результатов.

Новизна, научная и практическая значимость диссертационного исследования.

В значительной степени новизна, научная и практическая значимость диссертационного исследования обусловлены комплексным характером выполненных экспериментальных исследований с привлечением современных экспериментальных методик.

Научная ценность диссертации заключается в следующем:

1. Определены пространственно-временные характеристики развития парообразования и взрывного дробления одиночных капель на гетерогенной поверхности твердых, нерастворимых и непрозрачных для теплового излучения внутренних соразмерных с каплей включений в высокотемпературных газовых средах в поле действия массовых сил.
2. Выделено определяющее влияние радиационной составляющей передачи тепла на характеристики процессов парообразования и взрывного разрушения.

Результаты исследований могут быть использованы на практике для разработки перспективных технологий пожаротушения за счет инициации паровзрывного разрушения капель с механическими нерастворимыми включениями в зоне пламени и последующего образования пароводяных облаков с высокоразвитой поверхностью жидкой фазы, способствующих увеличению площади покрытия очага горения и вытеснению из него кислорода воздуха. Также практически значимым представляется их применение для термической огневой очистки загрязненных твердыми нерастворимыми включениями вод.

Оценка содержания диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка условных обозначений и символов, списка использованных источников. Работа изложена на 210 страницах машинописного текста, содержит 12 таблиц и 77 рисунков. Список использованных источников включает 242 наименования, в том числе 141 работу на иностранном языке и 23 ссылки на публикации автора диссертации.

Во введении обоснована актуальность проведенного исследования, сформулированы цель и основные задачи работы, проведена оценка научной новизны и практической значимости полученных результатов, сформулированы основные направления диссертационного исследования, а также положения, выносимые на защиту. Также представлена общая структура работы.

В первой главе проанализированы известные результаты исследований фазовых превращений неоднородных капель, пленок и струй жидкости в высокотемпературных средах. Сформулированы проблемные вопросы, охарактеризованы успехи в области интенсификации теплообмена. Показано, что для развития современной теории теплообмена неоднородных капель жидкости в высокотемпературных потоках необходимы достоверные экспериментальные данные.

Во второй главе приведено подробное описание трех экспериментальных стендов, рассмотрены особенности методик проведения исследований и дана оценка погрешностей результатов измерений. Первый из стендов был выполнен на основе трубчатой муфельной печи Nabertherm R50/250/13 с максимальной температурой нагрева 1550К; второй – на основе топливной горелки Leister LHS61 с максимальной температурой нагрева до 900К при работе на керосине, бензине, этиловом спирте и ацетоне; третий – на основе электрического воздухоподогревателя. Стенды обеспечивали проведение опытов в широком температурном диапазоне от 300 до 1400К в неподвижной и движущихся воздушных средах, продуктах горения углеводородных топлив.

В качестве объектов исследования рассматривались закрепленные в потоке крупные капли воды с нерастворимыми включениями различной формы, размеров и физической природы. Использовались изготовленные из графита и различных металлов единичные включения в виде цилиндрических дисков, конусов, кубов, сфер, параллелепипедов и многогранников с эквивалентными размерами $1 \div 4$ мм. Для исследования влияния присутствия мелкодисперсных включений использовались частицы графита с размерами 0,05 и 0,2 мм с массовой концентрацией в капле $1 \div 2\%$.

Для регистрации процессов использовалась современная измерительная аппаратура, в том числе высокоскоростная видеокамера Phantom V411 с высоким пространственно-временным разрешением (до $6 \cdot 10^5$ кадров/с, 1280x800пикселей/кадр) с макрообъективом, система пространственного измерения скоростей газа Particle Image Velocimetry (

PIV), электронные дозаторы жидкости Finnpiptette Novus с ценой деления 0,1 мкл в диапазоне до 50мкл, газоанализатор Testo 300XXL для определения состава продуктов горения, высокоточные аналитические весы Vibra с ценой деления 0,001 г в диапазоне взвешивания до 220г, а также современная тепловизионная техника.

Полученные в многочисленных экспериментах видеокadres поведения зафиксированных в потоке газов или неподвижной газовой среде капель воды с нерастворимыми включениями стали для автора диссертации исходным материалом для анализа физики фазовых превращений при их высокотемпературном нагреве.

В третьей главе приведены результаты исследований автора, выполнено их сравнение с результатами других авторов при свободном движении капель в высоконагретых потоках газов. В качестве наиболее вероятного механизма увеличения скорости испарения водяных капель с начальным радиусом 3 мм при наличии в них углеродных частиц размером 50÷500 мкм определено значительное увеличение радиационного теплового потока к поверхности нерастворимых частиц от продуктов горения.

Приведены результаты экспериментов с нерастворимыми частицами миллиметровых размеров. Выделены три схемы парообразования неоднородных капель жидкости: при испарении только со свободной поверхности жидкости, интенсивного многопузырчатого парообразования на внутренних границах раздела жидкой и твердой фаз и парообразования со взрывным разрушением капли. Автор выделяет два режима взрывного дробления жидкости в неоднородной капле: с образованием большого количества мелких капель и с отделением крупных фрагментов жидкости и небольшого количества мелких капель. Определены характерные размеры, а также количество фрагментов жидкости, формирующихся в результате интенсивного парообразования с эффектом взрывного вскипания, приводящего к дроблению капли.

В целом весь процесс интенсивного парообразования с взрывным распадом на большое количество мелких капель при варьировании температур газового потока от 650 до 800 К занимал от 1,5 до 12 с.

Выявлено влияние формы крупных включений на времена полного испарения жидких капель с взрывным распадом: меньшим значениям соответствовала многогранная форма, а наибольшим – сферическая. Приведены результаты, которые указывают на дополнительную 50% уменьшение времен испарения жидкости для капель, содержащих одно

крупное включение, с добавлением в них до 2% весовых мелких графитовых включений с диаметром 0,05 мм.

В качестве основного физического фактора, способствующего взрывному дроблению капель, автор рассматривает быстрый нагрев непрозрачных включений до температур, превышающих температуру кипения воды. Произведена экспериментальная проверка гипотезы о значительной роли лучистого теплообмена на интенсификацию теплообмена в неоднородных каплях воды, содержащих непрозрачные твердые включения.

Оценивая содержание диссертации в целом можно сделать заключение о логической завершенности большого объема экспериментальных исследований и практически полном отсутствии теоретических, которые могли бы органически дополнить общую картину изучаемых физических явлений. Большое количество задач экспериментального исследования: восемь, - представляется для кандидатской диссертации несколько чрезмерным, так как некоторые из них по сути дублируются. Это привело к некоторому «разбуханию» текста работы. Большое количество литературных источников, на которые ссылается автор, свидетельствуют о тщательной проработке темы. Номера ссылок на литературные источники приводятся автором строго по тексту диссертации, что значительно облегчает общее восприятие материала.

Оформление текста диссертации соответствует требованиям, предъявляемым к диссертационным работам. Содержание автореферата по своей структуре и приведенным результатам полностью отражает материалы диссертации и содержит ее основные идеи и выводы.

Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 23 работах, в том числе в 10 журнальных статьях, включенных в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук. Период публикаций статей, рекомендованных ВАК - 2015 и 2016 гг, что в основном позволяет широкой научной общественности ознакомиться с основными результатами диссертационного исследования.

По диссертационной работе имеются **замечания:**

1. Автор не представил физико-математического описания рассматриваемых явлений. Короткие формулы, приведенные в тексте

диссертации, не дают полного представления о физической природе процессов тепломассопереноса при фазовых превращениях.

2. В работе имеются ссылки на эффект Лейденфроста (стр. 148, 151). Однако, это явление в его классической интерпретации (стабильное отделение жидкости тонким слоем пара от греющей поверхности) в представленных материалах не зафиксировано.

3. Из текста диссертации неясно, каким образом определялся характерный размер включений.

4. Для измерения скоростей потока продуктов сгорания использовалась самая современная экспериментальная техника (PIV), однако обработка результатов была выполнена без привлечения критериев Рейнольдса, Вебера и других, связанных со скоростью газового потока.

5. В опытах даже при полном покрытии водой крупных включений имели место существенно различные толщины пленок. На стр. 45 диссертации отмечается, что «случаи частичного выступления включений с их поверхности являются регулярными». В процессе опытов эффект взрывного вскипания (по имеющимся фотографиям рис.2.4.2, 2.4.3, 3.2.5 и др.) фиксировался только на ограниченной площади контакта «твердое тело-жидкость». В этом случае обобщение результатов таких опытов на капли нельзя признать правомерным.

6. Заключение о том, что «применение растворов соли в составе неоднородных капель способствует интенсификации испарения жидкости при нагреве в достаточно широком диапазоне температур (стр. 95)» является спорным. Испарение водно-солевых растворов происходит с меньшей интенсивностью по сравнению с дистиллированной водой – это экспериментально установленный факт.

Отмеченные недостатки не снижают общей положительной оценки результатов работы, которая выполнена на высоком экспериментальном уровне на основе разработанных автором диссертации методик исследования.

Диссертационная работа «Фазовые превращения капель воды с твердыми нерастворимыми включениями при высокотемпературном нагреве» соответствует требованиям и критериям «Положения о присуждении ученых степеней» и является завершенной научно-квалификационной работой, в которой на основе физического моделирования теплообмена в газочапельных потоках решена научная

задача определения физического механизма и условий паровзрывного разрушения капель, имеющая значение для интенсификации теплообмена в двухфазных и гетерогенных системах, а ее автор Пискунов Максим Владимирович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

Официальный оппонент,

д. т. н

С.Л. Елистратов

Елистратов Сергей Львович, заведующий кафедрой тепловых электрических станций Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», доктор технических наук (специальность - 01.04.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника»)

Адрес: Россия, 630073, г. Новосибирск, пр-кт К. Маркса, 20

Тел.: (383) 346-11-42, E-mail: elistratov@corp.nstu.ru

04.12.2016

Ученый секретарь университета

д. т. н., профессор



Г.М. Шумский

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет».

Адрес: Россия, 630073, г. Новосибирск, пр-кт К. Маркса, 20

Тел.: (383) 346-08-43, E-mail: rsi@nstu.ru, <http://www.nstu.ru>