

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

На правах рукописи



Пискунов Максим Владимирович

ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ КАПЕЛЬ ВОДЫ
С ТВЕРДЫМИ НЕРАСТВОРИМЫМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ
ПРИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ НАГРЕВЕ

01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Диссертация
на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель
доктор физико-математических наук,
доцент Стрижак Павел Александрович

Томск – 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
Глава 1. Современные представления о фазовых превращениях неоднородных капель суспензий.....	16
Выводы по первой главе.....	30
Глава 2. Экспериментальные стенды и методы исследований.....	31
2.1. Планирование экспериментальных исследований.....	31
2.2. Экспериментальные стенды.....	33
2.3. Характеристики неоднородных капель жидкости.....	37
2.4. Методы исследований процессов фазовых превращений неоднородных капель жидкости.....	46
Выводы по второй главе.....	58
Глава 3. Результаты экспериментальных исследований фазовых превращений неоднородных капель водных суспензий.....	59
3.1. Взрывное разрушение неоднородной капли водной суспензии при интенсивном парообразовании.....	59
3.2. Интенсивное испарение неоднородных капель суспензий на внутренних и внешних границах раздела сред с установлением типичных стадий реализации механизмов парообразования.....	68
3.3. Анализ временных характеристик фазовых превращений неоднородных капель суспензий при нагреве в высокотемпературной газовой среде.....	79
3.4. Влияние искусственных неровностей поверхностей включений в каплях воды на интенсификацию теплообмена.....	86
3.5. Влияние добавления примесей в неоднородные капли на временные характеристики процесса испарения.....	89

3.6. Распад существенно неоднородных капель воды в высокотемпературной газовой среде. Повышение эффективности использования воды за счет взрывного дробления капель суспензий.....	95
3.7. Испарение капель воды с металлическими включениями при нагреве в высокотемпературной среде	117
3.8. Исследование нагрева и испарения неоднородных капель жидкости в различных высокотемпературных газовых средах.....	136
3.9. Изменение конфигурации поверхности неоднородных капель жидкости при высокотемпературном нагреве	140
3.10. Особенности процессов теплопереноса в пленке воды при воздействии лучистого теплового потока на ее поверхность.....	160
3.11. Рекомендации по использованию полученных результатов и дальнейшему развитию сформулированного в диссертации подхода	169
Выводы по третьей главе.....	173
Список условных обозначений и символов	178
Заключение	181
Список литературы	184

Введение

За последние 25–40 лет выполнено большое количество проектных исследований процессов испарения и кипения жидкостей в двухфазных и гетерогенных системах, где в качестве объектов исследований используются вода, а также эмульсии, суспензии и растворы на ее основе. Основное внимание в этих исследованиях (например, [1–3]), как правило, уделяется интенсификации теплообмена. Результаты теоретических и экспериментальных исследований [1–6] нередко находят свое применение в теплоснабжении (с использованием дымовых газов, капель и паров воды), системах пожаротушения (в том числе с использованием неоднородных тушащих составов), термической очистки жидкостей, закалки и обработки металлов, очистки различных поверхностей высокотемпературными гетерогенными потоками, охлаждения оборудования различного назначения и их ограждающих конструкций или корпусов (например, в электронных устройствах, двигателях автомобилей, ядерных реакторах и др.) [7–15].

Важно отметить высокую эффективность [1, 3, 4] гетерогенных (с включениями) газочапельных систем при интенсификации фазовых превращений на границах раздела сред «поверхность нагрева – жидкость» и «жидкость – газовая среда». Введение неметаллических и металлических включений в жидкости (создание суспензий), к примеру, увеличивает критическую плотность теплового потока, отводимого от теплообменной поверхности при кипении и испарении жидкостей [16]. В области высоких (более 1000 К) температур механизм фазовых превращений гетерогенных капельных потоков чрезвычайно сложен [3] и слабо изучен.

Ввиду отсутствия теории процессов фазовых превращений гетерогенных капель при высоких температурах (до 1000–1200 К) установление требуемых для различных технических систем и технологий параметров реализации этих

процессов представляется возможным за счет анализа экспериментально полученных данных.

Газопарокапельные смеси широко используются в различных высокотемпературных технологиях современных производств [17–19]. Однако выбор и настройка технологических режимов, как правило, осуществляется эмпирически [19]. Это обусловлено как отсутствием общей теории тепломассопереноса для процессов формирования газопарокапельных смесей (особенно в условиях высоких температур), так и отсутствием моделей испарения капель жидкостей (в частности, с «неоднородным» составом) при движении через высокотемпературную среду.

Известны результаты кинетического анализа интенсивного испарения жидкостей [20] с целью изучения закономерностей фазовых переходов в рамках моделей, отличающихся от используемых уже многие годы представлений Герца [21] и Кнудсена [22] об «испарении в вакуум». Однако полученные с применением метода обратных балансов результаты [20] позволяют утверждать только о «качественно верных» изменениях «плотности обратного молекулярного потока» при росте интенсивности испарения жидкости. Достоверных количественных экспериментальных данных очень мало.

Ввиду этого наиболее целесообразным является экспериментальное исследование основных закономерностей интенсивного испарения капель жидкостей в условиях движения последних через высокотемпературные газовые среды с целью детализации физических процессов, протекающих при испарении.

Известны результаты исследований (например, [23–25]) интенсификации прогрева и фазовых превращений различных жидкостей и суспензий за счет введения в них инородных наночастиц, в частности, из серебра, алюминия, меди и других материалов. Наиболее интересными для исследований представляются процессы испарения «неоднородных по составу» капель жидкости, например, содержащих твердые включения – неметаллические частицы фиксированных размеров и концентрации. Интерес в этой области возник благодаря возможности анализа влияния примесей в жидкости на характеристики фазовых превращений.

В настоящее время одним из важнейших направлений развития технологий пожаротушения является интенсификация теплообмена тушащей жидкости с продуктами сгорания в зоне пламени [5, 8, 26–29]. Традиционный подход измельчения капель при распылении тушащих жидкостей имеет достаточно много ограничений [5, 8, 26–29]. В основном, эти ограничения связаны с уносом из зоны горения газовыми потоками (продуктами сгорания) мелких (размеры менее 0,5 мм) капель в случае крупных пожаров на открытых площадях [5, 8, 26–29]. К тому же, в реальной практике нередки случаи, когда капли тушащих жидкостных составов в процессе движения через пламена коагулируют. Эти эффекты затрудняют выбор начальных размеров капель и их контроль в процессе движения с целью интенсификации их испарения в пламенной зоне горения для поглощения энергии пожара, а также вытеснения окислителя и продуктов сгорания парами тушащей жидкости.

Помимо измельчения капель довольно значительную интенсификацию теплообмена в зоне пламени можно обеспечить за счет добавления специализированных примесей и включений в тушащие жидкостные составы. В последние годы предложено достаточно много подходов в этом направлении (например, [30]). Основной акцент традиционно делается на повышении скоростей испарения жидкости в пламени при введении в него таких двухфазных, многофазных и даже гетерогенных газопарокапельных смесей. Результаты экспериментальных и теоретических исследований [3, 4, 30] дают основание для гипотезы о возможности существенной интенсификации фазовых превращений при введении инородных примесей и твердых непрозрачных включений в типичную тушащую жидкость – воду, а также различные эмульсии на ее основе. Однако, эксперименты [3, 4, 30] иллюстрируют, что процессы нагрева гетерогенных (с включениями) капель в условиях высоких температур, соответствующих типичным пламенам при реальных пожарах, сопровождаются сложными комплексами фазовых превращений, тепло – и массопереноса. Можно отметить, что в области высоких (соответствующих типичным пламенам – более 1000 К) температур газов процессы испарения сложны и для однородных

жидкостей [31–33]. По результатам экспериментов [3, 4, 30] сделаны заключения, что включения в каплях воды приводят не только к интенсификации прогрева жидкости и фазовых превращений на внешней (свободной) поверхности капли, но и на внутренних границах «жидкость – включение». Эти процессы могут приводить к пузырьковому кипению и разрыву пленки жидкости вследствие роста и движения пузырьков. Данный эффект также можно использовать при интенсификации фазовых превращений в пламенах в процессе пожаротушения, но он слабо изучен к настоящему времени (нет достоверных экспериментальных данных).

В настоящее время можно отметить достаточно интенсивное развитие технологий термической очистки воды и различных эмульсий на ее основе [11, 12, 34–37]. Принято считать [37], что непрерывное развитие таких технологий обусловлено не только установлением новых типов примесей или инородных включений и условий их удаления, но и довольно невысокой эффективностью действующих систем. Данная проблема особенно актуальна для существенно неоднородных капельных потоков воды, которые проходят через соответствующие камеры систем термической очистки несколько раз (общая длительность процесса существенно растет).

В качестве газовой среды в современных системах термической очистки воды применяются [11, 12, 34–37] продукты сгорания различных горючих жидкостей или газов, а также разогретый воздух. Как правило, основной эффект достигается за счет фазовых превращений жидкости (парообразования) [11, 12, 34–37]. На сегодняшний день имеется критически мало экспериментальной информации об условиях парообразования при нагреве гетерогенных (неоднородных) капель жидкостей (с различными твердыми частицами) в типичных для систем термической очистки условиях. Очевидно, что это обусловлено довольно высокой сложностью рассматриваемых процессов и фазовых превращений.

Проблема, связанная с необходимостью обеспечения быстрого охлаждения поверхностей технологического оборудования, в частности, ограждающих

конструкций реакторов атомных электростанций, является актуальной на протяжении многих лет. Наглядным примером может служить авария, произошедшая на АЭС Фукусима-1, в результате которой температура топливных элементов в активной зоне АЭС возросла до 1200–1400 К [38]. Производительности существующей системы водяного охлаждения оказалось недостаточно для эффективной компенсации такой высокой температуры. Результаты расследования случившегося инцидента показали, что причиной неэффективного (недостаточного) охлаждения и, как следствие, физического повреждения активной зоны АЭС стало снижение скорости теплопередачи из-за пленочного кипения [9]. Этот режим кипения характеризуется образованием устойчивой паровой пленки на металлической поверхности, нагретой до столь высокой температуры. Такой процесс впоследствии повышает термическое сопротивление всей системы. В этом случае паровой слой является своего рода теплоизолирующим. Применение морской воды, как показывают исследования (например, [9]), исключает процесс пленочного кипения и повышает эффективность охлаждения металлических образцов.

Исследования механизма и минимальной температуры пленочного кипения (или температуры Лейденфроста) представлены многочисленными научными работами (например, [39–41]), подавляющее большинство которых являются теоретическими. Довольно ограниченная экспериментальная информационная база и сложность численных решений (моделирования) с многочисленными допущениями оставляют механизмы и условия пленочного кипения при интенсивном охлаждении до конца неизученным.

Таким образом, несмотря на большое количество проводимых ежегодно теоретических и экспериментальных исследований процессов испарения и режимов кипения жидкостей в двухфазных и гетерогенных системах, существуют процессы, требующие глубокого изучения, например, установление механизмов активации фазовых превращений в условиях высоких (более 1000 К) температур.

Целью работы является экспериментальное изучение основных закономерностей фазовых превращений капель воды с твердыми непрозрачными

включениями в высокотемпературной газовой среде с применением высокоскоростной видеорегистрации.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Разработка методики экспериментальных исследований закономерностей испарения и кипения жидкости при нагреве капель с твердыми включениями в высокотемпературной газовой среде с варьированием в широких диапазонах параметров исследуемых процессов.
2. Разработка схем и изготовление экспериментальных стендов с применением высокоскоростной регистрирующей аппаратуры, оптических методов диагностики, а также специализированного программного обеспечения для слежения за положением внешней и внутренней границ раздела сред; планирование и проведение экспериментов.
3. Экспериментальное определение зависимостей интегральных характеристик процессов тепломассопереноса и фазовых превращений в рассматриваемых гетерогенных системах от группы основных параметров системы (температура и скорость потока газовой среды, вид горючей жидкости и способ нагрева объектов исследований, свойства материалов включений, их форма, размер и концентрация, размер неоднородных капель, состав и свойства жидкости в капле).
4. Определение временных характеристик фазовых превращений неоднородных капель суспензий с установлением основных стадий и механизмов парообразования при нагреве в высокотемпературной газовой среде.
5. Установление закономерностей физических процессов, протекающих в неоднородной капле воды при ее высокотемпературном нагреве.
6. Изучение эффектов дробления и уноса неоднородных капель жидкости в условиях интенсивного парообразования; регистрация числа отрывающихся фрагментов жидкости; вычисление характерных площадей испарения.
7. Анализ влияния свойств высокотемпературных газов на условия прогрева и фазовых превращений неоднородной капли воды.

8. Разработка рекомендаций по использованию результатов выполненных фундаментальных исследований в группе перспективных высокотемпературных газопарокапельных приложений.

Научная новизна работы. Экспериментально установлен новый физический эффект – взрывное разрушение (дробление) неоднородной (с соразмерным твердым непрозрачным включением) капли воды вследствие ее интенсивного парообразования при нагреве в высокотемпературных (более 650 К) газовых средах (на примере воздуха и типичных продуктов сгорания). С применением разработанной экспериментальной методики, отличающейся от известных совместным использованием высокоскоростного видеокомплекса для визуализации особенностей рассматриваемых процессов, следящей системы и оптического метода «Particle Image Velocimetry» (PIV), изучены закономерности и условия фазовых превращений капель жидкостей с твердыми включениями в высокотемпературной газовой среде. Установлены стадии интенсивного парообразования неоднородных капель воды с взрывным разрушением последних. Выделены параметры нагрева, при которых происходит разрушение неоднородной капли жидкости. Определены временные характеристики фазовых превращений. Зарегистрированы процессы зарождения и эволюции парового слоя на внутренних границах раздела сред «поверхность твердого включения – слой жидкости». Установлены масштабы влияния паровых (буферных) слоев на внутренних и внешних границах раздела сред на времена существования неоднородных капель жидкости в потоке продуктов сгорания топлив. Выделено влияние радиационной составляющей передачи тепла на характеристики процессов испарения и кипения. Определены характерные соотношения площадей испарения жидкости до и после взрывного дробления неоднородных капель при высокотемпературном нагреве.

Практическая значимость работы. Полученные результаты экспериментов и сделанные заключения являются информационной базой для разработки перспективных высокотемпературных газопарокапельных технологий, а также совершенствования и развития существующих. К ним относятся: термическая или

огневая очистка воды (планирование и разработка очистных мероприятий с учетом установленных закономерностей процессов и диапазонов варьирования определяющих параметров системы); пожаротушение с применением неоднородных капельных суспензий (за счет реализации взрывного парообразования с разрушением капель жидкости и последующего образования пароводяных облаков, способствующих увеличению площади покрытия очага горения и вытеснению окислителя); эффективное охлаждение теплонагруженных поверхностей ограждающих конструкций энергетического оборудования (за счет создания вспомогательного теплообменного слоя между теплонагруженной поверхностью и наружной средой на основе суспензии с высокой теплоемкостью и теплопроводностью).

Степень достоверности результатов проведенных исследований.

Достоверность результатов подтверждается оценкой систематических и случайных погрешностей измерений, повторяемостью опытов при идентичных начальных параметрах системы, а также использованием современного высокоточного оборудования. Также выполнено сравнение полученных результатов с теоретическими заключениями других авторов.

Связь работы с научными программами и грантами. Исследования фазовых превращений неоднородных капель жидкостей в высокотемпературных продуктах сгорания выполнены при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 14-39-00003. Эксперименты по изучению взрывного высокотемпературного дробления неоднородных капельных потоков выполнены при финансовой поддержке гранта Президента РФ № МД-2806.2015.8 и стипендии Президента РФ № СП-1049.2016.1.

Тема диссертационных исследований соответствует приоритетным направлениям развития науки в Российской Федерации (указ Президента РФ № 899 от 7 июня 2011 г.): «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика», «Безопасность и противодействие терроризму», а также находится в сфере критических технологий федерального уровня, получивших высокий рейтинг по показателям состояния и перспективам развития («Технологии

создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования энергии», «Технологии предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера»).

Основные положения и результаты, выносимые на защиту:

1. При высокотемпературном нагреве неоднородной (с соразмерным включением) капли воды вследствие интенсивного парообразования на внутренней границе раздела сред происходит взрывное разрушение (дробление) слоя жидкости с образованием группы капель с существенно меньшими размерами или нескольких крупных фрагментов. Площадь поверхности испарения жидкости увеличивается в несколько раз (от 2–3 до 10–15) относительно начальных значений.
2. Механизмы и временные характеристики фазовых превращений неоднородных капель воды существенно отличаются (вследствие парообразования на свободной и внутренней границах раздела сред) от капель жидкостей, растворов и эмульсий.
3. Времена существования неоднородных капель при интенсивном парообразовании на их внутренних границах раздела сред с взрывным дроблением слоя воды значительно меньше (в 5–7 раз) аналогичных временных характеристик испарения воды со свободной поверхности.

Личный вклад автора состоит в: разработке методики экспериментальных исследований фазовых превращений капель жидкости с твердыми включениями в высокотемпературной газовой среде; постановке и планировании экспериментов; создании экспериментальных стендов; проведении опытов; обработке полученных результатов; оценке систематических и случайных погрешностей; выявлении нового физического эффекта – взрывного высокотемпературного дробления неоднородных капель; анализе и обобщении результатов исследований; разработке рекомендаций по их практическому применению.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих научных мероприятиях:

- ✓ XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, г. Казань, 2015 г.
- ✓ XIX Международный научный симпозиум студентов, аспирантов и молодых ученых имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр», г. Томск, 2015 г.
- ✓ XXI Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современная техника и технологии», г. Томск, 2015 г.
- ✓ VI Всероссийская научная конференция с международным участием «Теплофизические основы энергетических технологий», г. Томск, 2015 г.
- ✓ IV Минский международный коллоквиум по физике ударных волн, горения и детонации, г. Минск, 2015 г.
- ✓ XXIV Всероссийский семинар с международным участием по струйным, отрывным и нестационарным течениям, г. Новосибирск, 2015 г.
- ✓ Международная молодежная научная школа-семинар «Тепломассоперенос в системах обеспечения тепловых режимов энергонасыщенного технического и технологического оборудования», г. Томск, 2015 г.
- ✓ International Symposium and School for Young Scientists «Interfacial phenomena and heat transfer», г. Новосибирск, 2016 г.
- ✓ XX Международный научный симпозиум студентов, аспирантов и молодых ученых имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр», г. Томск, 2016 г.
- ✓ 5th International Fire Behavior and Fuels Conference, г. Портленд, штат Орегон, США, 2016 г.
- ✓ Международная молодежная научная конференция «Тепломассоперенос в системах обеспечения тепловых режимов энергонасыщенного технического и технологического оборудования», г. Томск, 2016 г.
- ✓ 7th International Conference «Nanoparticles, nanostructured coatings and microcontainers: technology, properties, applications», г. Томск, 2016 г.
- ✓ XV Международный форум по тепло- и массообмену, г. Минск, 2016 г.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 23 печатных работах, в том числе 9 – в журналах из списка, рекомендованного ВАК РФ: «Журнал технической физики» («Technical Physics»), «Письма в Журнал технической физики» («Technical Physics Letters»), «Известия ВУЗов. Проблемы энергетики», «Пожаровзрывобезопасность», «Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация», «Химическое и нефтегазовое машиностроение» («Chemical and Petroleum Engineering»). 10 статей опубликованы в зарубежных рецензируемых журналах («Journal of Engineering Physics and Thermophysics», «Procedia - Social and Behavioral Sciences», «IOP Conference Series: Earth and Environmental Science», «EPJ Web of Conferences», «MATEC Web of Conferences» и др.), индексируемых базами данных «Scopus» и «Web of Science», 4 из них в высокорейтинговых журналах (входят в 1–2 квартили): «International Journal of Heat and Mass Transfer» (ИФ=2,857), «Journal of Heat Transfer» (ИФ=1,723), «Thermal Science» (ИФ=1,222). Подготовлена 1 заявка на патент РФ (№ 2015141196 от 28.09.2015).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения, списка литературы, включающего 242 наименования, содержит 77 рисунков, 12 таблиц, 210 страниц.

Краткое содержание работы.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, практическая значимость и научная новизна полученных результатов.

Первая глава отражает современное состояние теоретических и экспериментальных исследований в области интенсификации теплообмена в двухфазных и гетерогенных системах. Проанализированы известные результаты исследований закономерностей, условий и характеристик фазовых превращений неоднородных капель, пленок и струй жидкостей. Рассмотрены установленные ранее особенности быстропротекающих процессов на границах раздела сред при интенсивном нагреве и охлаждении. Выделены основные высокотемпературные приложения, для которых актуально изучение рассматриваемых процессов.

Сформулированы проблемные вопросы, характерные соответствующим технологиям, и отмечены успехи в исследованиях интенсификации теплообмена. Показано, что для развития современной теории теплообмена необходимы достоверные экспериментальные данные о высокотемпературных фазовых превращениях неоднородных капель.

Во второй главе представлены описания созданных экспериментальных стендов, разработанные методики проведения исследований и обработки полученных результатов, а также проведена оценка погрешностей результатов выполненных измерений.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований фазовых превращений неоднородных капель водных суспензий. Проанализирован установленный эффект взрывного дробления неоднородной капли жидкости. Определены условия, при которых этот эффект устойчиво реализуется. Зарегистрированы характерные времена существования неоднородных капель жидкости в высокотемпературных средах. Установлены количественные характеристики процесса взрывного дробления, а именно количество и размеры отделившихся капель. Разработаны рекомендации по использованию полученных результатов и дальнейшему развитию сформулированного в диссертации подхода.

В заключении подведены основные итоги диссертационных исследований, а также сформулированы соответствующие выводы.

Глава 1. Современные представления о фазовых превращениях неоднородных капель суспензий

Одним из важнейших направлений развития теплофизических технологий в настоящее время является интенсификация теплообмена в двухфазных и гетерогенных системах. В этой области можно выделить труды таких исследователей и научных коллективов как: Б.В. Дзюбенко, Ю.А. Кузма-Китча, А.И. Леонтьев [42–47], А.Ю. Вараксин [1], В.И. Терехов, М.А. Пахомов [48, 49], В.Е. Накоряков, С.Я. Мисюра [50–52], Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак [6, 53–55], Е.А. Чиннов, О.А. Кабов [56–58], С.А. Исаев [59–61], Л. Тедрист [62–64], Д. Брутон [65], П. Ди Марко [65, 66], Х.А. Мохаммед [67–70], Д.-Ч. Хан [71–73], А.И. Бергл [74–76], П.А. Баранов [77–79], В.В. Олимпиаев [80–82], Г.А. Дрейцер [83, 84], Ю.А. Зейгарник [85–89] и других.

Согласно [75] первая работа об интенсификации теплообмена опубликована 155 лет назад [90], но по сути интенсивно данное направление стало развиваться лишь в 1950-е годы. На рис. 1.1 представлен рост публикационной активности в области исследований интенсификации конвективного теплообмена.

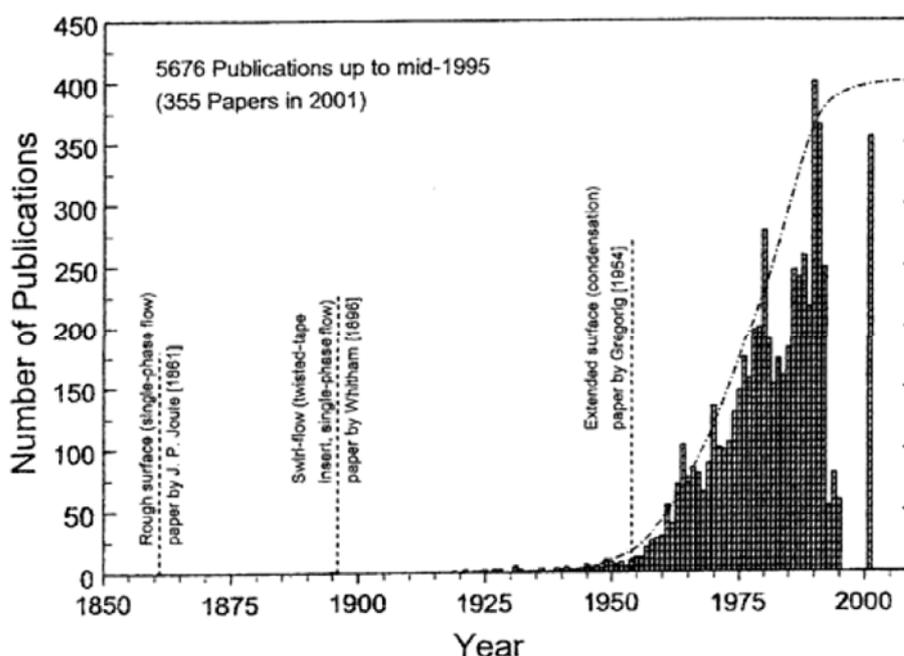


Рисунок 1.1. – Распределение по годам публикаций в области интенсификации конвективного теплообмена [91]

За последние несколько десятилетий количество публикаций заметно выросло (рис. 1.2) и превысило показатели асимптоты на рис. 1.1.

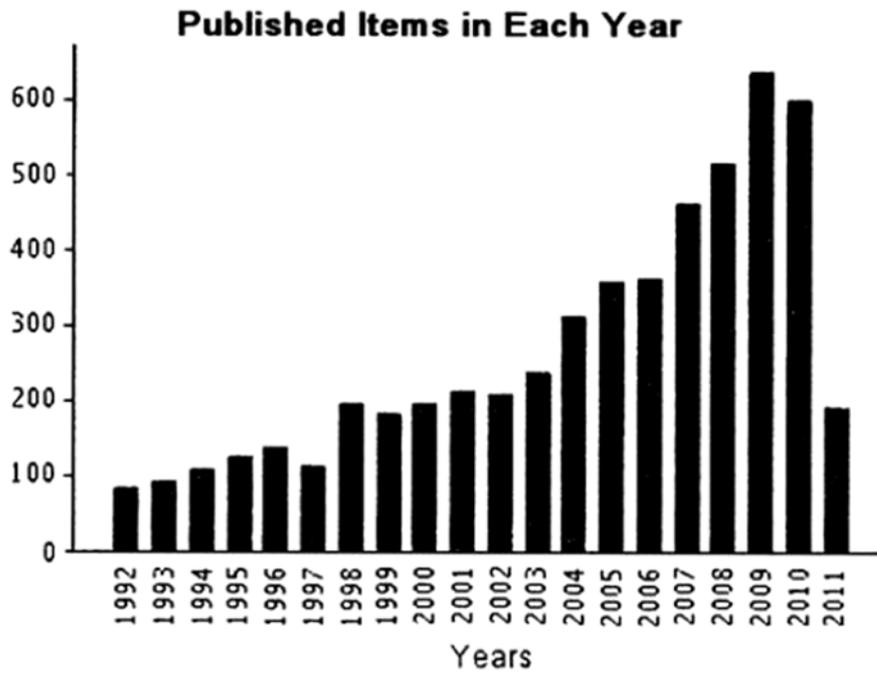


Рисунок 1.2. – Рост количества научных публикаций о подходах к интенсификации теплообмена (согласно базе данных «SciFinder Scholar»; статистика отражает информацию до июля 2011 года) [75]

Обзор научных зарубежных периодических изданий, выполненный по запросу «heat transfer augmentation» («интенсификация теплообмена») в базе данных «Scopus», также однозначно (рис. 1.3) указывает на ежегодный рост количества публикаций в этой области.

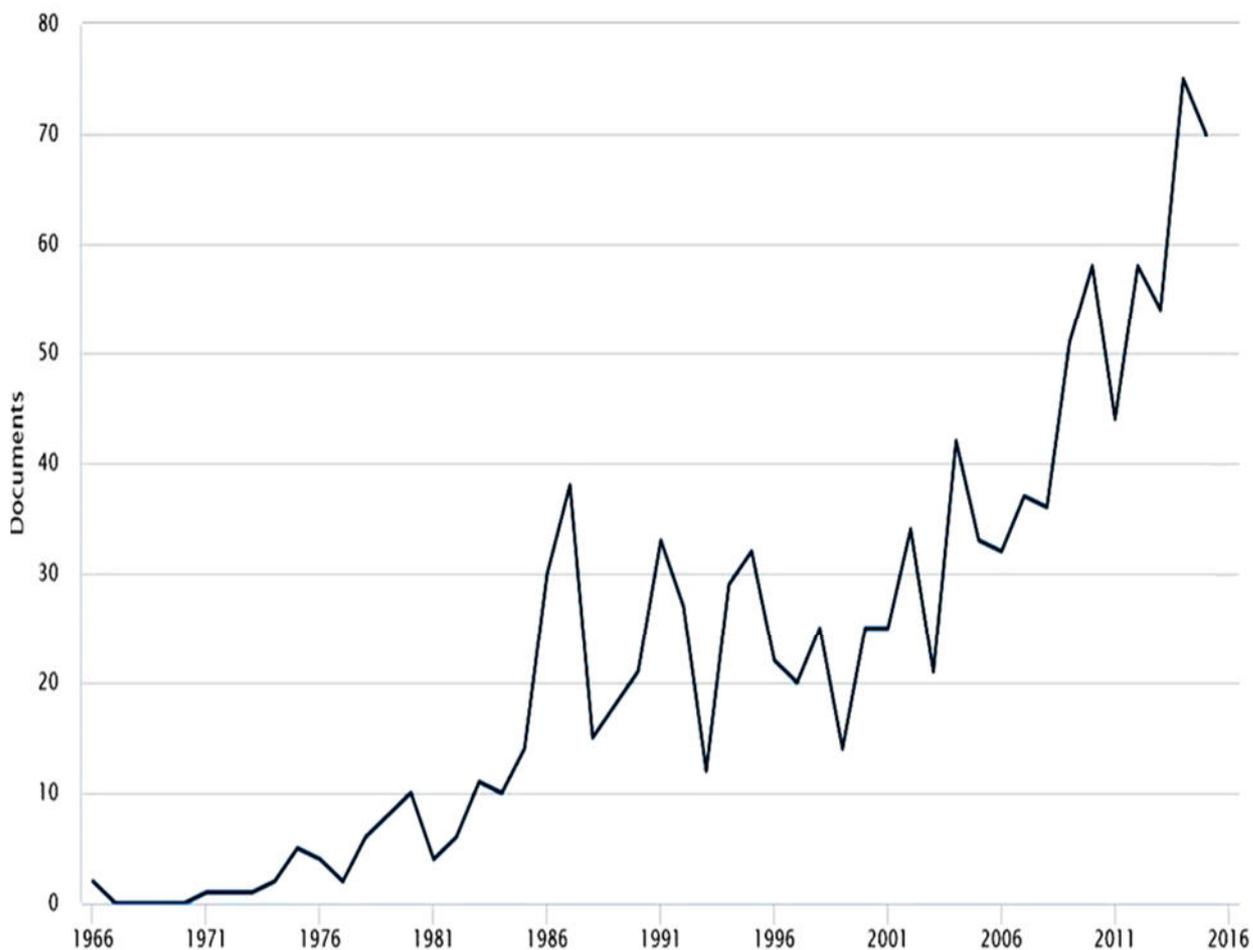


Рисунок 1.3. – Распределение по годам публикаций по тематике «Интенсификация теплообмена» согласно данным из реферативной базы «Scopus»

Рассматриваемая научная область охватывает широкий диапазон направлений исследований и практических приложений. Постоянный рост публикационной активности свидетельствует о развитии существующих энергетических и неэнергетических технологий, а также создании совершенно новых ресурсо- и энергоэффективных направлений.

Согласно общепринятой [75, 92] классификации существуют активные и пассивные методы интенсификации конвективного теплообмена (табл. 1.1). В основном, проводимые численные и экспериментальные исследования в данном научном направлении характеризуются применением одного метода или совокупности нескольких.

Таблица 1.1. – Методы интенсификации конвективного теплообмена [75, 93]

Пассивные	Активные
Обработанные (например, шероховатые, пористые) поверхности	Механическое воздействие на поверхность теплообмена (например, вращение или вибрация поверхности)
Развитые (например, оребренные, рифленые) поверхности	Воздействие на поток пульсациями давления
Вставные интенсификаторы (винтовые, локальные и пластинчатые закручиватели потока)	Воздействие на поток электрическим магнитным или акустическим полем
Примеси / добавки в жидкости	Вдув или отсос рабочей среды через пористую поверхность
Примеси / добавки в газы	

Активные методы интенсификации теплообмена менее востребованы с технологической точки зрения [94] из-за затрат на привлечение внешней энергии и возможных проблем, связанных с негативным воздействием вибрации или акустического шума [95]. Пассивные методы не требуют внешнего вмешательства и могут быть условно разделены на три направления:

1. Создание закрученного движения потока.
2. Совершенствование поверхностей теплообмена.
3. Изменение свойств жидкостей или газов (в том числе теплофизических) путем добавления различных твердых включений.

Первое и второе направления, в основном, находят свое применение при создании новых прототипов теплообменного оборудования и модернизации уже существующих моделей для повышения эффективности их работы. Третье направление представляет интерес [50–52, 68–70, 96] благодаря своему

применению не только в энергетике, но и в широкой группе других технологий (например, системы охлаждения микропроцессоров, микро-электро-механических устройств, двигателей автомобилей, пожаротушение однородными и неоднородными потоками и т.д.) [51, 53, 54, 96]. Такая универсальность обеспечивает высокую потребность в исследованиях свойств жидкостей с добавлением твердых включений.

Опубликовано большое количество работ (например, [30, 96–111]), результаты которых показывают возможности влияния на теплофизические свойства изучаемых жидких сред (растворов, суспензий, эмульсий и т.д.) с целью повышения эффективности их использования и технологических процессов, в которых они находят применение. Во многих случаях исследователи предпринимают попытки контроля параметров процесса теплообмена, управления иницированием механизмов фазовых превращений жидкостей. Результаты [30, 96–111] показывают, что в таких исследованиях существуют ограничивающие факторы. Развитие компьютерных технологий и появление высокоточного исследовательского оборудования позволяет уменьшать число факторов [30, 96–111]. В таком ключе в последние годы развиваются экспериментальные и теоретические исследования тепломассообменных процессов, протекающих в двухфазных и гетерогенных (неоднородных) системах. При этом должное внимание уделяется исследованиям методов увеличения критического теплового потока, отводимого от поверхности тепловыделения, посредством фазовых превращений [97, 101, 112–115]. За счет введения твердых частиц (различной физической природы и концентраций) в теплоноситель можно добиться существенного повышения критической плотности теплового потока q_{cr} [116]. Основной задачей в данном случае является изучение механизма, вследствие которого q_{cr} растет.

Для энергетических технологий важным является изучение и разработка подходов для изменения тепло- и электропроводящих свойств неоднородных и бинарных жидкостей, а также растворов солей и поверхностно-активных веществ [101, 102, 106, 117]. Опубликовано немало работ, свидетельствующих о

возможном изменении (увеличении) температур кипения (например, [39]) и Лейденфроста (например, [118]) для различных жидкостей. За счет добавления поверхностно-активных веществ (ПАВ) в воду, в основном, стремятся достичь высокой смачивающей способности жидкости (уменьшить силу ее поверхностного натяжения) [106]. Изучение смачивающих свойств различных поверхностей и, соответственно, изменений контактных углов при рассмотрении отдельных капель представляет самостоятельную задачу, а результаты исследований данного направления чрезвычайно актуальны, к примеру, для разработки покрытий, повышающих эффективность эксплуатации рабочих поверхностей энергетического и промышленного оборудования [119].

Развитие подходов интенсификации теплообмена началось с появлением теплотехнического оборудования и возникновением потребности к его постоянному совершенствованию. С тех пор, как отметил академик А.И. Леонтьев [120], ведется изучение процессов передачи тепловой энергии теплопроводностью, конвекцией и излучением, а также создается и развивается теория тепло- и массообмена. Необходимо отметить, что прогресс в изучении тепловых процессов неуклонно связан с интенсивным расширением областей применения теоретической базы теплообмена вследствие развития новых технологий и техники. Если в XIX и начале XX столетий теория теплообмена, какой мы ее знаем сейчас, находила свое применение, в основном, при конструировании теплообменного оборудования (в частности, паровых котлов и паровых машин), то к настоящему времени в ходе научно-технической революции создан ряд совсем неэнергетических приложений, эффективность использования которых полностью опирается на закономерности процессов теплообмена (например, охлаждение электронного оборудования [121–123]).

В монографии Б.В. Дзюбенко [42] проанализированы основные методы и подходы к интенсификации тепло- и массообмена в одно- и двухфазных средах, разработанные и апробированные в течение XX столетия на различных элементах энергетического оборудования. Такие интенсификаторы теплообмена как шероховатая структура поверхности и ее оребрение стали классическими

подходами и к настоящему моменту находят свое широкое применение не только в энергетике.

В международных базах цитирования зарубежные исследования в области интенсификации теплообмена в последние годы практически полностью сфокусированы на изучении свойств наножидкостей (например, [96,104,108,112,113,124–126]). В современной российской научной периодике данное направление также широко представлено (например, [97, 109, 110]). Во многом такая популярность наножидкостей обусловлена успехом в изучении влияния наночастиц на протекание тепловых процессов и свойства базовых жидкостей. Кроме того, заметно возросла потребность в такого рода прикладных исследованиях в различных отраслях промышленности [127–130].

Как известно [96], при изучении свойств наножидкостей возникают проблемы, обусловленные их нестабильностью. В первую очередь, это связано со способностью наночастиц объединяться в группы и оседать в объеме базовой жидкости (например, при скоплении и оседании частиц изменяется теплопроводность наножидкости [96]). В нестабильных наножидкостях с течением времени меняются теплофизические свойства, что является не благоприятным фактором при использовании в практических приложениях. Часто для повышения стабильности наножидкостей используют поверхностно-активные добавки, однако, функциональные возможности ПАВ при высоких температурах весьма ограничены. Таким образом, применение наножидкостей в высокотемпературных приложениях проблематично из-за непредсказуемости изменения теплофизических свойств.

Основной задачей при исследовании наножидкостей является установление механизма, благодаря которому возможна интенсификация теплообмена. В обзоре [131] авторы делают вывод, что у большинства известных наножидкостей реологические свойства нестабильны, а для определения, например, изменяющейся во времени вязкости суспензии необходимо проводить систематические наглядные экспериментальные исследования. Кроме того, в работе [131] отмечается определяющая роль объемной концентрации наночастиц

в интенсификации теплообмена, а также о ее неоднозначном влиянии на теплофизические свойства жидкости и процесс теплообмена, в целом. Из анализа содержания [131] можно сделать вывод, что изучение механизмов интенсификации теплообмена в гетерогенных жидкостях приходится выполнять с применением эмпирических подходов.

Активно развивается относительно новая технология – полидисперсное пожаротушение с применением неоднородных капельных потоков [3, 107, 132, 133], а также растворов солей и ПАВ [134, 135]. В данном случае, задача интенсификации теплообмена играет определяющую роль, как и теплофизические свойства применяемых тушащих жидкостей. Установлено [136–138], что большая часть (до 95 %) сбрасываемой (нераспыленной) тушащей жидкости проходит через пламенную зону горения без испарения, т.е. используется недостаточно эффективно и не участвует в процессе тушения. В последние годы активно ведутся исследования эффективности использования пароводяных завес, способствующих эффективному ограничению поступления окислителя в зону горения и покрытию большей площади пожара с применением меньшего количества тушащей жидкости [139, 140]. Необходимо отметить, что данная технология эффективна при ликвидации пламенного горения. Но существует и другая проблема – это низовые пожары, сопровождающиеся горением слоев лесного горючего материала (ЛГМ) и торфяников. В данном случае необходимо прохождение капель тушащей жидкости через пламенную зону горения и их проникновение в слои ЛГМ или торфяников [134, 141, 142]. Кроме того, для повышения смачиваемости поверхности горючего материала эффективным является добавление поверхностно-активных веществ (ПАВ) [134, 135, 143]. Авторами [144] установлено, что рабочая жидкость с примесями NaCl существенно медленнее испаряется по сравнению с водой. Таким образом, добавление солей может способствовать достижению поверхности ЛГМ или торфяников большего (в сравнении с водой) количества тушащей жидкости. Обе проблемы, указанные выше, связаны с установлением оптимальной дисперсности

капельного потока тушащей жидкости, а также выбором примесей (жидкостей и твердых частиц).

Результаты экспериментальных исследований [107] иллюстрируют влияние добавления твердых частиц в капли воды с достаточно широким варьированием размеров (от 1 до 5 мм), характерным для капельных потоков при тушении пожаров. Установлено, что за счет добавления твердых включений можно добиться существенной интенсификации парообразования при движении капель жидкости в зоне пламени. Однако, авторы [107] использовали углеродистые включения в весьма ограниченном диапазоне размеров 50–500 мкм. Кроме того, в экспериментах [107] взаимодействие высокотемпературных продуктов сгорания с каплей жидкости являлось достаточно скоротечным (менее 1 с). В работах [3,107,132,133,144] авторы регистрировали изменения параметров капель (размер, форма, скорость и т.д.) с добавлением примесей при их взаимодействии с высокотемпературной газовой средой. Поскольку процесс нагрева капель жидкостей являлся кратковременным, наблюдалось лишь испарение с их свободной поверхности. При пожаротушении время прохождения капли жидкости через высокотемпературные продукты сгорания может существенно превышать характерные для [3,107,132,133,144] времена нагрева. В этом случае в процессе нагрева капель жидкости реализуются несколько механизмов фазовых превращений [1, 100, 101], включая режимы кипения на внутренних границах раздела сред «твердая частица – жидкость», если речь идет о неоднородных каплях.

Говоря об эффективности тепловых процессов во многих химических, нефтехимических, энергетических и других отраслях промышленности, необходимо отметить проблему сохранения воды, как важнейшего энергетического ресурса [145]. При постоянном росте мощностей производств потребность в водных ресурсах только увеличивается, в связи с этим внедряются специализированные программы повышения эффективности применения воды. Рекомендуемые меры, чаще всего, предполагают возможность реализации различных механизмов фазовых превращений и направлены на экономное

использование водных ресурсов. Наиболее подходящим примером внедрения подобных программ является циклическое многократное использование воды на производствах, возможное за счет качественного функционирования систем термической очистки [146]. В последние годы следует отметить довольно интенсивное развитие технологий очистки воды и различных эмульсий на ее основе [11, 34, 147]. Вследствие недостаточной изученности условий испарения и кипения существенно неоднородных жидкостей и воды с высоким содержанием солей при высоких температурах и практически полного отсутствия экспериментальной базы по данному направлению можно выделить несколько проблем очистных мероприятий – длительное время процесса термообработки и высокие затраты энергии [148, 149]. Иными словами, незнание фундаментальных основ технологического процесса влечет за собой повторное (чаще многократное) проведение однотипных очистных работ.

Существует немало устройств и способов очистки воды (например, [150–152]) на основе процессов дистилляции жидкости с последующим охлаждением и конденсацией паров. Каждый выпарной аппарат наравне с достоинствами, такими как упрощение технологической схемы термической очистки, уменьшение габаритов установки и т.д., имеет и свои недостатки, которые чаще всего связаны с параметрами жидкости, подвергаемой дистилляции, переменными режимами работы устройств и их ограниченной производительностью. В целях повышения эффективности очистных мероприятий целесообразным является детальное изучение макроскопических тепловых процессов, протекающих на границах сред «жидкость – твердая частица» в существенно неоднородных жидкостях, и особенностей фазовых превращений жидкостей с различным химическим составом (воды с высоким содержанием солей, щелочные, бинарные жидкости и пр.). На основе полученных данных может появиться возможность установления основных варьируемых параметров системы и выработке рекомендаций по совершенствованию известных режимов эксплуатации выпарного оборудования и разработке более эффективных технологий таких процессов.

При изучении методов интенсификации теплообмена одно-, двухфазных и гетерогенных потоков, а также закономерностей фазовых превращений в таких средах одним из практических приложений является разработка подходов к решению задачи, связанной с необходимостью обеспечения эффективного и быстрого охлаждения поверхностей технологического оборудования, в частности, ограждающих конструкций реакторов АЭС и теплонагруженных поверхностей энергетического комплекса. Однако, несмотря на то, что проблема эта не является новой, особенно остро она заинтересовала ученых после аварии, произошедшей на АЭС Фукусима-1. Используемая методика проведения экспериментальных исследований режимов кипения является достаточно унифицированной (например, [9,10,41,153–155]). Нагретые до высоких температур металлические образцы (сферы, стержни) опускались в различные жидкости (в основном, воду с примесями). Визуализация и регистрация быстротекущих процессов проводились с применением высокоскоростной видеосъемки. Теплоперенос при быстром охлаждении ограничивался возникновением стабильной паровой пленки (пленочное кипение) на поверхности сильно нагретого металлического объекта. Эта пленка существенно замедляла теплообмен. Таким образом, ускорение перехода от пленочного кипения к пузырьковому является крайне важным для изучаемых процессов. Такого эффекта добиваются, например, за счет добавления наночастиц в охлаждающую жидкость или применения соленой (морской) воды [9,10,154,155]. Основным результатом исследований [9,10,154,155] является установление условий перехода от пленочного режима кипения к пузырьковому (второй кризис режима кипения) и определение соответствующих критических плотностей теплового потока, а также измерение тепловых потоков при пленочном кипении, включая выявление минимального теплового потока.

Для исследований [9,10,41,153–155] достижение значений минимального теплового потока является показателем того, что жидкость снова начинает частично контактировать с поверхностью нагрева, при этом отвод тепла растет. Металлические образцы [9,10,41,153–155] быстро охлаждаются, происходит

смена режимов парообразования и устанавливается стационарное пузырьковое кипение.

В экспериментах [86] установлено, что при охлаждении твердых сферических тел (диаметром 15 и 25 мм) с начальной температурой около 800 К посредством погружения в воду с температурой 297 К происходит взрывной переход от пленочного режима кипения к пузырьковому, который сопровождается характерным хлопком. Кроме того, авторы [86] выделили не описанный ранее пульсационный режим кипения общей продолжительностью менее 0,2 с, конечной стадией которого и является хлопок. Также в [86] проводилось охлаждение жидких капель расплава, в процессе которого наблюдалась их фрагментация. Отмечается, что указанные процессы во многом являются схожими с явлением парового взрыва [87, 156–160]. Несмотря на достаточно большой объем экспериментальных и теоретических работ, исследователи до сих пор не получили ответы на вопросы о природе возникновения данного явления и механизмах его реализации. Прежде всего из-за крайне малых времен протекания характерных процессов возникают сложности достоверного измерения температур и давлений фаз. Тем не менее, сформулировано [87, 159] предположение, что механизмом возникновения парового взрыва является внешний импульс давления.

Авторами [161–164] исследован режим интенсивного (развитого) пузырькового кипения капель эмульсий, включающий явление взрывного вскипания. Изучен механизм реализации этого явления, основная особенность которого заключается в достижении условий активации центров кипения под действием импульсов давления, возникающих при вскипании перегретых капель дисперсной фазы. Импульсы давления – это ударная волна, которая генерируется при вскипании перегретой капли. Такой механизм характеризуется эффектом цепной реакции в перегретой части объема эмульсии.

Выше [86] анализировались результаты исследований охлаждения жидких капель расплавов. Установлено [86] явление парового взрыва. Такой процесс на практике может иметь место при авариях на АЭС, где происходит разрушение

активной зоны ядерного реактора вследствие критического перегрева до температур плавления металлов [165–169]. При взаимодействии расплавленного металла с хладагентом системы охлаждения происходит бурное кипение или практически мгновенное (взрывное) парообразование с быстрым расширением паровой фазы, также известное как паровой взрыв. Вероятность этого процесса и сопутствующие импульсы давления будут угрожать целостности ядерного реактора [165–169]. Необходимо отметить, что явление парового взрыва встречается и в других отраслях промышленности, в которых происходит взаимодействие жидких расплавленных металлов с жидкостями, например, в металлургии при литейном производстве [166, 170], в процессе изготовления бумаги [41, 166], при транспортировке сжиженного природного газа. Часто негативными последствиями парового взрыва являются значительный экономический ущерб и человеческие потери [170].

Для изучения быстропротекающих интенсивных процессов на микроскопическом уровне достаточно эффективным инструментом является скоростная видеорегистрация, которая активно применяется исследователями по всему миру (например, [9, 10]). Создание экспериментальных методик с применением высокоскоростных камер и механизированных средств передвижения объектов исследований, а также современных средств регистрации параметров процессов (температуры, давления и т.д.) позволяют проводить исследования в самых разнообразных средах (высокотемпературных, в слое жидкости, в каналах и пр.) и регистрировать основные характеристики наблюдаемых явлений, а также записывать видеокадры опытов для последующей детальной обработки (например, [9, 10]).

Выполненные в последние годы исследования с применением панорамных оптических методов (например, [30, 133]) показали, что условия испарения гетерогенных и однородных капель в высокотемпературных (около 1100 К) газах могут значительно отличаться (возможны различные режимы кипения, а также испарение со свободной поверхности). Тем не менее, известно крайне мало об

условиях парообразования при нагреве гетерогенных капель жидкостей (с различными твердыми частицами) в высокотемпературных средах.

Таким образом, в теории фазовых превращений и теплообмена вопросы интенсификации и эффективного охлаждения остаются актуальными. Статистика [75, 91] показывает (рис. 1.1 и 1.2), что развитие методов интенсификации теплообмена только движется к своему пику, а появление новых технологий и совершенствование существующих способствуют этому росту.

Для разработки рекомендаций, адаптированных под определенные практические приложения, целесообразным является проведение физического моделирования процессов нагрева и охлаждения одиночных капель с выделением основных варьируемых параметров изучаемых процессов. Такой подход позволит наиболее полно изучить закономерности процессов фазовых превращений неоднородных капель жидкостей и детализировать механизмы теплообмена в этих условиях.

Выполненный анализ современных результатов исследований физических процессов, реализуемых при нагреве или охлаждении на границах раздела сред в условиях интенсивного теплообмена, позволяет сделать вывод об отсутствии единой теоретической базы о механизмах возникновения и реализации быстропротекающих явлений и процессов (паровой взрыв, интенсивное развитое кипение, взрывное вскипание, переходный режим кипения) в различных жидкостях, включая суспензии и эмульсии.

В настоящей диссертационной работе представлены результаты экспериментальных исследований, в которых изучается гетерогенная система – капля жидкости с одиночным твердым включением, нагреваемая высокотемпературными газами. Анализ результатов экспериментов позволяет подробно описать механизмы фазовых превращений неоднородных капель жидкости и выделить основные закономерности процессов теплопереноса в рассматриваемой системе. На основе установленных особенностей и явлений могут быть сформулированы рекомендации для технологий и практических приложений, указанных в настоящей главе.

Выводы по первой главе

1. Методы интенсификации теплообмена продолжают активно развиваться. Появление новых технологий, включая неэнергетические, способствует значительному росту исследований по разработке смешанных методов (комбинирование активных и пассивных подходов к интенсификации конвективного теплообмена) и усовершенствованию классических.
2. Целесообразным является проведение экспериментальных исследований фазовых превращений капель суспензий и эмульсий, уделяя особое внимание механизмам возникновения и реализации на границах раздела сред интенсивного (развитого) парообразования.
3. Следует определить характеристики тепломассопереноса и фазовых превращений в неоднородных каплях жидкости, исследовать влияние группы основных варьируемых параметров системы «капля суспензии или эмульсии – высокотемпературная среда» на эти характеристики. Кроме того, представляет интерес изучение развития во времени процессов, происходящих на границах раздела сред, а также определение типичных стадий реализации механизмов парообразования при нагреве неоднородных капель жидкости.

Глава 2. Экспериментальные стенды и методы исследований

2.1. Планирование экспериментальных исследований

Основной задачей планируемых экспериментов было установление условий устойчивой интенсификации испарения и кипения жидкостей с твердыми примесями. Выявление необходимых и достаточных условий реализации исследуемых процессов при проведении экспериментов часто вызывает затруднения, обусловленные необходимостью варьирования многих параметров рассматриваемой системы и разработкой алгоритмов, а также правил, благодаря которым возможно проведение экспериментов с минимизацией общего числа опытов.

Изучение особенностей и закономерностей испарения и кипения неоднородных капель жидкости в лабораторных условиях на стадии планирования экспериментов подразумевает воспроизведение основных параметров, характеризующих протекание рассматриваемых процессов в существующих практических приложениях [9–11, 34] и перспективных новых технологиях. Среди основных параметров, оказывающих существенное влияние на фазовые превращения неоднородных капель жидкости, необходимо выделить температурные режимы и характеристики среды, времена реализации режимов парообразования с учетом группы быстропротекающих процессов (возникновение и дальнейшая эволюция пузырьков пара на границах раздела сред; переходный режим кипения) при переходе от испарения к кипению и от одного режима кипения к другому, свойства компонентов капель жидкости и другие.

Целью данного исследования является экспериментальное изучение основных закономерностей и механизмов фазовых превращений неоднородных (с твердыми непрозрачными включениями) капель воды при нагреве в высокотемпературной газовой среде с использованием средств высокоскоростной

видеорегистрации. Для достижения поставленной цели спланирован многофакторный эксперимент с учетом варьирования основных параметров системы «неоднородная капля жидкости – высокотемпературная газовая среда».

При проведении экспериментов использовались различные жидкости. Изучение процессов испарения и кипения проводилось с применением водопроводной (питьевой) и дистиллированной воды, а также водных растворов с добавлением ПАВ, соли и твердых примесей. Концентрации солей в экспериментах изменялись от 0 до 4 %, смачивателя – от 0 до 1 %. В качестве твердых примесей выбраны графит природного происхождения и различные металлы. Размеры частиц варьировались в диапазоне от 0,05 мм до 4 мм. Кроме того, при исследовании влияния добавления мелких графитовых включений (размером 50 и 200 мкм) на интенсификацию испарения неоднородных капель изменялась их массовая концентрация (1 и 2 %).

Для формирования высокотемпературной газовой среды за счет сжигания горючих веществ использовались такие виды топлива как керосин, технический этиловый спирт, бензин, технический ацетон и бутан-пропановая газовая смесь. Также для обеспечения постоянной температуры нагрева (T_g) капель жидкости и исключения турбулентных возмущений потока продуктов сгорания использовались муфельная печь (до 1373 К) и воздухонагреватель (тепловая пушка с температурой до 950 К). Температура среды T_g в экспериментах с неоднородными каплями варьировалась в диапазоне от ~300 до ~1373 К. Регистрация изменений T_g во время проведения опытов выполнялась термоэлектрическими преобразователями. Использовалась методика термодпарных измерений [171].

Для варьирования объема жидкости в составе неоднородных капель применялся электронный дозатор с функциями забора жидкости от 5 до 50 мкл. Непосредственный забор жидкости проводился специальным сменным наконечником, которым оснащен электронный дозатор.

Измерение скорости потока продуктов сгорания осуществлялось оптическим бесконтактным методом цифровой визуализации Particle Image Velocimetry (PIV).

Для контроля времени нагревания неоднородной капли жидкости последняя закреплялась на керамическом стержне (диаметр 0,3 мм), который автоматическим передвижным механизмом помещался вместе с каплей в высокотемпературную газовую среду.

Исследование особенностей испарения и кипения неоднородных капель жидкости с детальной визуализацией процессов на внутренних и внешних границах раздела сред выполнено с применением высокоскоростной видеосъемки. Программный комплекс, обеспечивающий работу высокоскоростной камеры, использовался для оценки временных характеристик процессов, а также определения линейных размеров капель и массивов жидкостей.

2.2. Экспериментальные стенды

Для проведения экспериментальных исследований закономерностей фазовых превращений капель воды с твердыми непрозрачными включениями при нагреве в различных высокотемпературных газовых средах разработаны три стенда (рис. 2.2.1-2.2.3).

Стенды отличались между собой блоками, которые обеспечивали генерацию высокотемпературных газов и, соответственно, нагрев неоднородных капель жидкости. Основными частями стендов являлись: высокоскоростная камера 1 оснащенная CMOS матрицей (максимальное разрешение видеосъемки – 1280×800 пикселей, максимальная скорость записи видеоматериала при уменьшенном разрешении – $6 \cdot 10^5$ кадров/с) и устройства для формирования высокотемпературных сред: цилиндрический канал, в основании которого располагалась топливная горелка 2 (рис. 2.2.1); воздухонагреватель с регулировкой скорости потока 9 (рис. 2.2.2); муфельная трубчатая печь 3 (рис. 2.2.3).

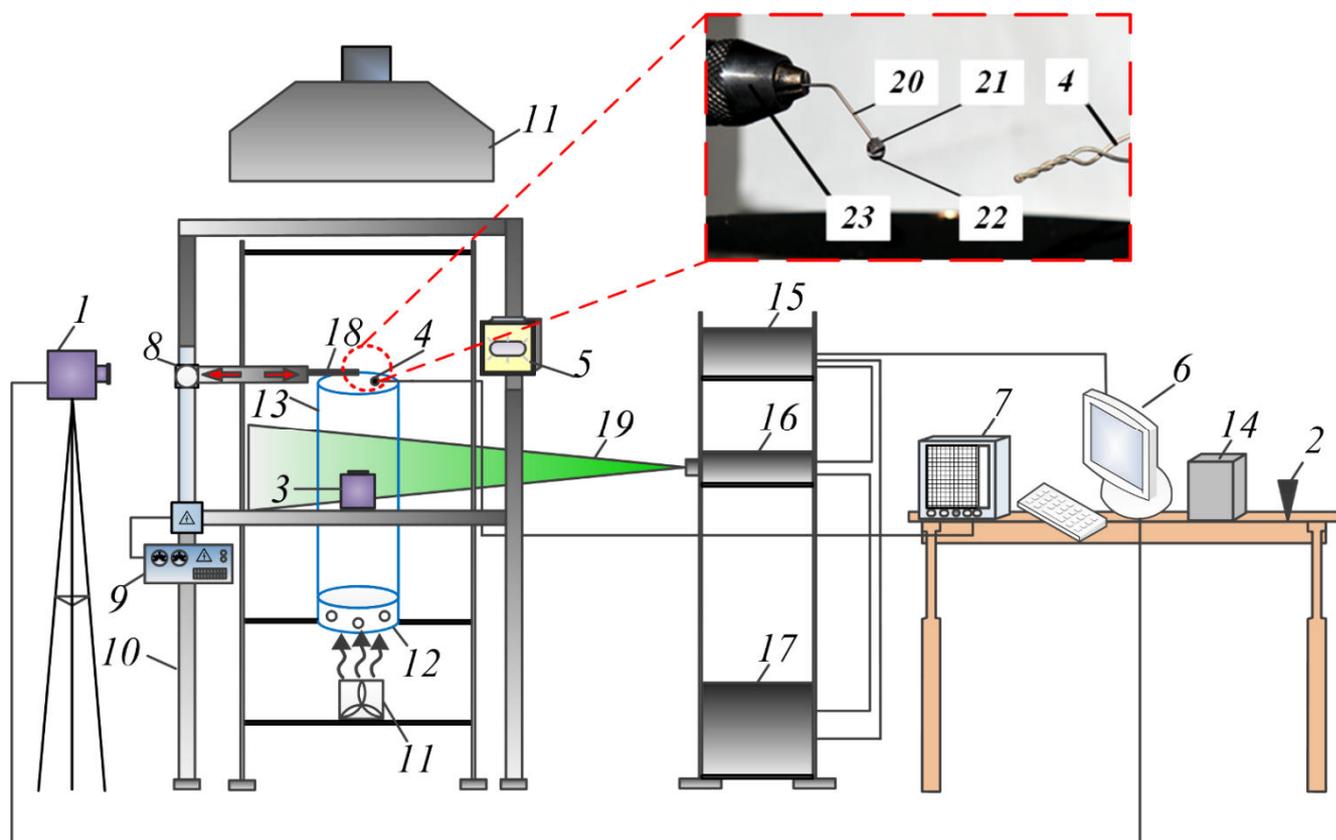


Рисунок 2.2.1. – Схематическое изображение экспериментального стенда с топливной горелкой в качестве устройства для генерации высокотемпературной газовой среды: 1 – высокоскоростная видеокамера; 2 – дозирующее устройство; 3 – кросскорреляционная камера; 4 – термопара; 5 – осветительный прожектор; 6 – персональный компьютер (ПК); 7 – регистратор многоканальный технологический (PMT); 8 – моторизованное координатное устройство (МКУ); 9 – блок питания МКУ; 10 – алюминиевая стойка; 11 – нагнетательная система; 12 – мультитопливная горелка; 13 – цилиндр из кварцевого стекла; 14 – система измерения массы; 15 – синхронизатор ПК, кросскорреляционной камеры и лазера; 16 – двойной импульсный Nd:YAG лазер; 17 – генератор лазерного излучения; 18 – направляющая для крепления керамического стержня; 19 – световой «нож»; 20 – стержень; 21 – твердое включение; 22 – капля жидкости; 23 – устройство фиксации стержня

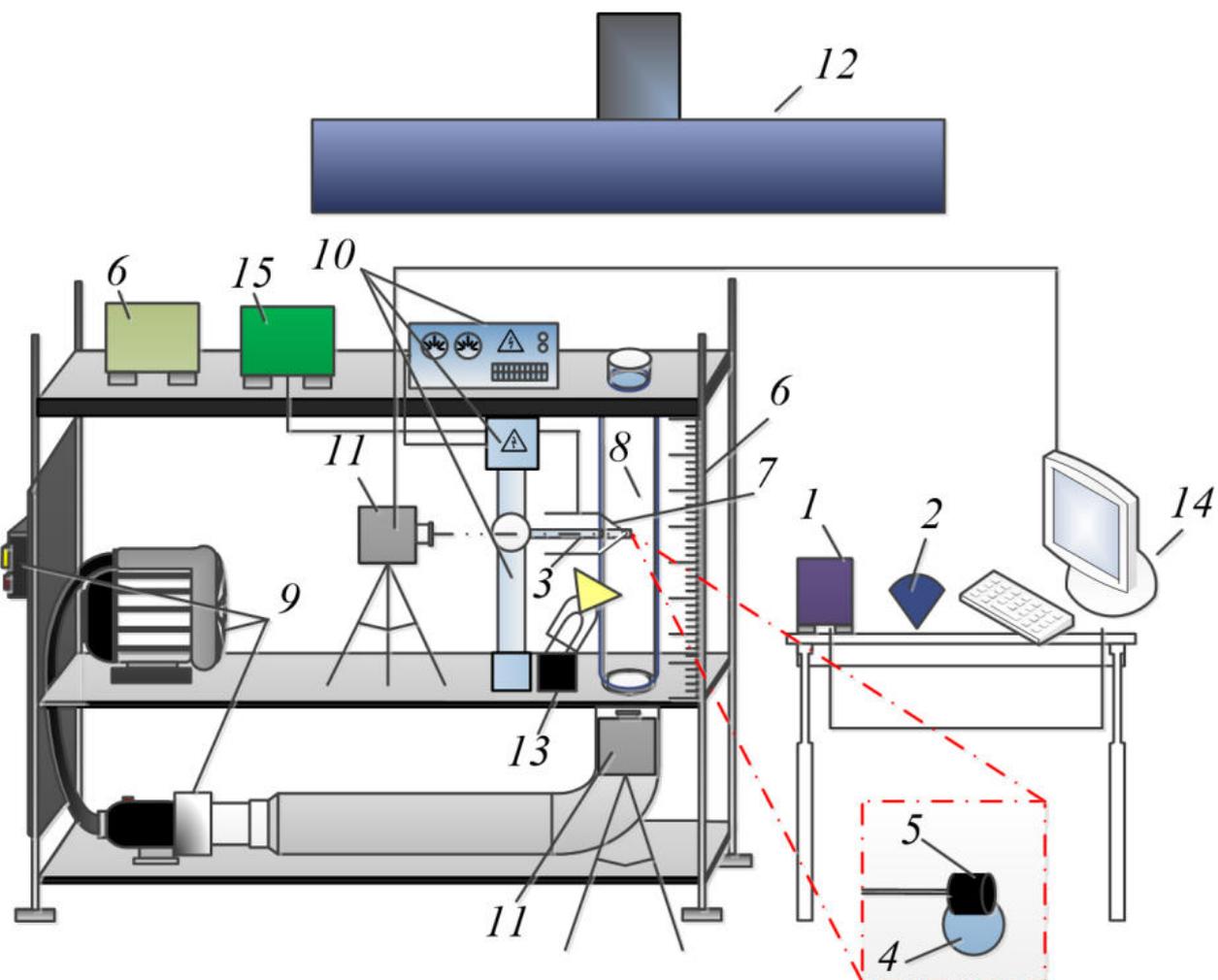


Рисунок 2.2.2. – Схематическое изображение экспериментального стенда с воздушнонагревателем в качестве устройства для генерации высокотемпературной газовой среды: 1 – аналитические весы; 2 – электронный дозатор; 3 – стержень (держатель включения); 4 – капля жидкости; 5 – твердое включение; 6 – комплекс для изготовления твердых включений; 7 – термопара; 8 – цилиндр из кварцевого стекла; 9 – воздушнонагреватель (тепловая пушка); 10 – моторизированное координатное устройство; 11 – высокоскоростная камера; 12 – нагнетательная система; 13 – прожектор; 14 – персональный компьютер (ПК); 15 – регистратор температуры

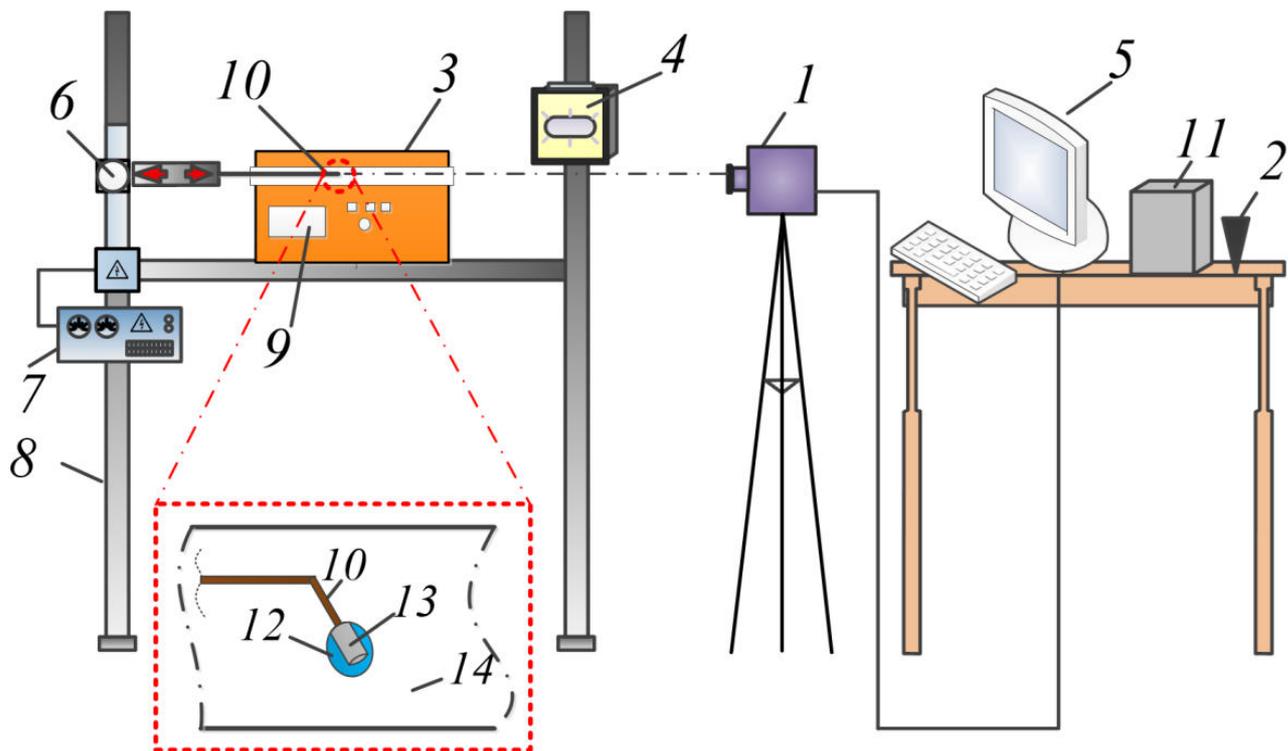


Рисунок 2.2.3. – Схематическое изображение экспериментального стенда с трубчатой муфельной печью в качестве устройства для генерации высокотемпературной газовой среды: 1 – высокоскоростная камера; 2 – дозирующее устройство; 3 – муфельная печь; 4 – прожектор; 5 – компьютер; 6 – моторизированное координатное устройство (МКУ); 7 – блок питания МКУ; 8 – алюминиевая стойка; 9 – регулятор температуры нагрева; 10 – стержень; 11 – аналитические весы; 12 – капля жидкости; 13 – твердое включение; 14 – полость трубки нагрева печи

Необходимо отметить, что только экспериментальный стенд с горелкой в качестве устройства для генерации высокотемпературной газовой среды (рис. 2.2.1) оснащен комплексом, обеспечивающим бесконтактные измерения скоростей потока продуктов сгорания 3, 15–17. В экспериментах с воздушнонагревателем 9 (рис. 2.2.2) скорость воздушного потока регулировалась.

2.3. Характеристики неоднородных капель жидкости

Неоднородные капли жидкости состояли из 2 или 3 компонентов. Первый вариант – в капле воды располагалось соразмерное включение. Вторым вариантом схож с первым, но, помимо прочего, в состав исследуемой капли вводились дополнительные вещества, влияющие на свойства жидкой фазы при нагреве: смачиватель, соль, мелкие графитовые включения.

В качестве материалов твердых включений использовались графит природного происхождения, металлы и сплавы. Размеры включений (d_p) варьировались в диапазоне от 1 до 4 мм. Это довольно крупные частицы. Не требовались большие трудозатраты при их изготовлении и сложные технологии производства, как, например, при производстве нанопорошков [172, 173].

Графит является «мягким» для механической обработки материалом и инертным по отношению к жидкостям. Известно [174, 175], что важным преимуществом графита природного происхождения является его доступность и дешевизна. При сравнении графита и углерода (угля) можно выделить принципиальные отличия в их кристаллических формах, обуславливающие более высокую теплопроводность первого [174]. Важно отметить, что в экспериментах [133] введение в капли воды частиц углерода (с относительной массовой концентрацией до 1 % и размерами от 50 до 500 мкм) приводило к существенному увеличению скорости испарения жидкости (в 2–2,5 раза) при движении через высокотемпературные ($T > 1000$ К) газы. Более того, капли с твердыми углеродистыми включениями существенно деформировались в этих условиях. Учитывая известные данные [174] и результаты [133], в целях достижения еще более значительной интенсификации испарения неоднородных капель сформулирована гипотеза о целесообразности использования графита природного происхождения.

В таблице 2.3.1 приводятся основные физические, теплофизические и оптические свойства графита природного происхождения (гексагональные кристаллы), а также его компонентный состав и внешняя цветовая

характеристика. Значения теплофизических величин, характерных для используемого вида графита, уточнялись (проводились контрольные измерения) с применением оборудования: «Discovery Flash DLF-1200» и «Shinko AFDK».

Таблица 2.3.1. – Основные физические, оптические и теплофизические свойства графита природного происхождения, его компонентный состав и внешняя цветовая характеристика [176–180]

<i>Физические свойства</i>	
Плотность, г/см ³	2,25
Удельная поверхность, м ² /г	1
<i>Теплофизические свойства</i>	
Удельная теплоемкость, Дж/г·°С	0,7077
Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К	24
<i>Оптические свойства</i>	
Коэффициент излучения	0,9
<i>Компонентный состав</i>	
Углерод (С), %	100
<i>Цвет</i>	Черный

В диссертационном исследовании использовались крупные графитовые включения различных форм: цилиндрический диск, конус, куб, параллелепипед, многогранник, сфера. На рис. 2.3.1 отчетливо видны контуры указанных тел. Характерные размеры графитовых включений в экспериментах – 2, 3 и 4 мм (рис. 2.3.2).

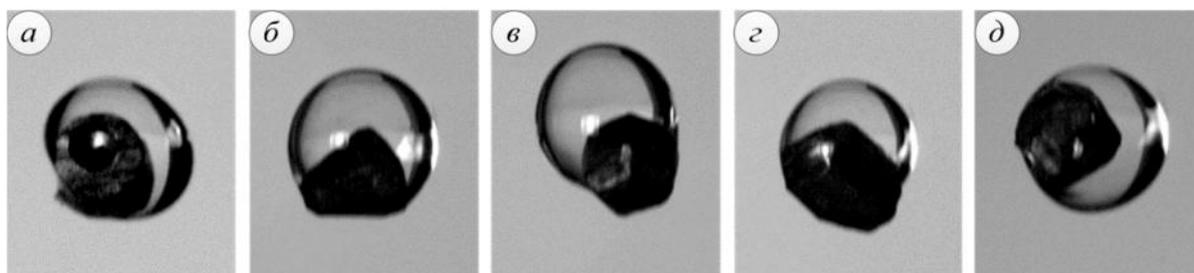


Рисунок 2.3.1. – Типичные положения включений разных форм (*a* – диск, *б* – конус, *в* – сфера, *г* – многогранник, *д* – параллелепипед) в каплях воды в процессе движения через высокотемпературные (около 700 К) газы

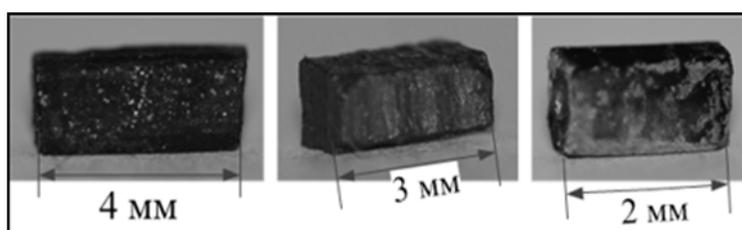


Рисунок 2.3.2. – Характерные размеры графитовых включений

В части экспериментов в рассматриваемую систему (рис. 2.3.1) добавлялись мелкие графитовые включения размерами (*d*) 50 и 200 мкм с массовой концентрацией (γ_p) 1 и 2 %. На рис. 2.3.3 представлены графитовые суспензии указанных размеров и концентраций. Также в капли воды добавлялись углеродистые частицы (каменный и бурый уголь) размером (L_m) 50÷500 мкм при варьировании их массовой концентрацией до 1 %.

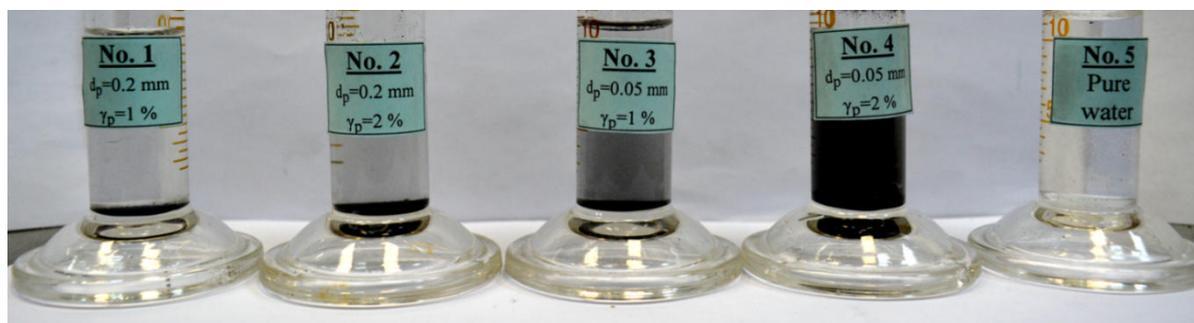


Рисунок 2.3.3. – Колбы с водными графитовыми суспензиями и чистой водой: No. 1 – $d = 0,2$ мм, $\gamma_p = 1$ %; No. 2 – $d = 0,2$ мм, $\gamma_p = 2$ %; No. 3 – $d = 0,05$ мм, $\gamma_p = 1$ %; No. 4 – $d = 0,05$ мм, $\gamma_p = 2$ %; No. 5 – водопроводная вода

Изготовление крупных графитовых включений проводилось с применением многофункциональной прямой шлифовальной машины «Sparky», поставляемой вместе с набором насадок для шлифовки, резки, сверления и фрезерования различных материалов (рис. 2.3.4). Данное устройство обеспечивает механическую обработку мягкого графита, позволяя придавать заготовкам необходимые формы и размеры.



Рисунок 2.3.4. – Устройство для изготовления графитовых включений и наборы насадок для обработки

При подготовке суспензий (рис. 2.3.3) проводилось измельчение монолитных кусков графита до порошкового состояния. Для получения порошков частичек графита фиксированного размера ($\sim 0,05$ и $\sim 0,2$ мм) применялись рассев лабораторный РЛ-1 и набор сит (ГОСТ Р 51568-99), перфорированные листы которых имеют соответствующие диаметры отверстий.

Металлические включения изготавливались из металлов, наиболее доступных и используемых в различных отраслях промышленности (теплоэнергетика, атомная энергетика, химическое и нефтехимическое производства). На рис. 2.3.5 приведены экспериментальные образцы различных металлических включений размером 1 и 2 мм. Эти образцы имеют технологический выступ, необходимый для закрепления включения на стержне (рис. 2.2.1, 2.2.2 и 2.2.3). Выступ предусмотрен при изготовлении металлических частиц и имеет размеры: высота $\sim 0,5$ мм, диаметр $\sim 0,3$ мм. При такой геометрии технологического выступа закрепление включения на стержне проводилось только механически.

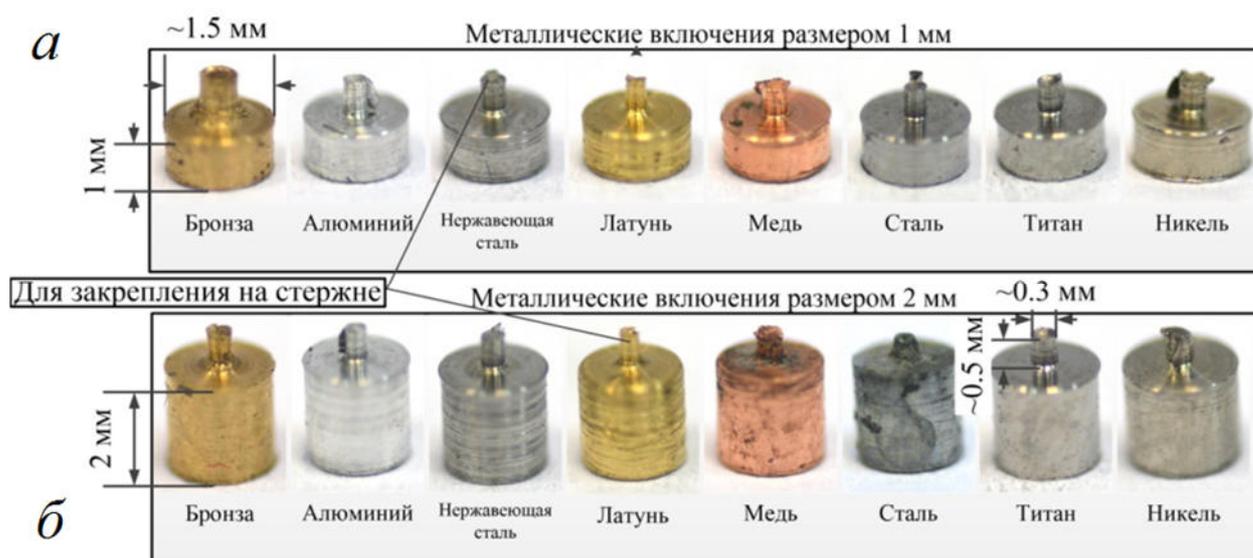


Рисунок 2.3.5. – Металлические включения цилиндрической формы: *а* – включения размером 1 мм; *б* – включения размером 2 мм

Металлические и графитовые включения взвешивались с применением аналитических весов Vibra AF 225DRCE (максимальная и минимальная масса – 220 г и 0,001 г, соответственно; погрешность не более 0,5 % от измеряемой массы; рис. 2.2.1, 2.2.2 и 2.2.3). Массы графитовых крупных включений варьировались в диапазоне от $\sim 0,015$ г до $\sim 0,025$ г. При проведении серии экспериментов с неоднородными каплями, содержащими включения одной формы и размера, отклонение по их массе могло достигать $\pm 0,002$ г. В зависимости от физических

свойств металлов существенно различались массы включений при одинаковых размерах. В таблицах 2.3.2 и 2.3.3 приведены массы рассматриваемых образцов металлических включений.

Таблица 2.3.2. – Массы металлических включений размером 1 мм

Высота включения h_{in} (мм)	№	Металл	Масса включения m_{in} (г)
1	1	Углеродистая сталь (AISI type 1080)	0,026
	2	Нержавеющая сталь (AISI 316L)	0,028
	3	Никель (без примесей)	0,034
	4	Титан (Ti6Al4V)	0,015
	5	Медь (без примесей, бескислородная)	0,029
	6	Алюминий (6000 series)	0,009
	7	Коммерческая бронза (90 % меди и 10 % цинка)	0,033
	8	Гильзовая латунь (70 % меди и 30 % цинка)	0,028

Таблица 2.3.3. – Массы металлических включений размером 2 мм

Высота включения h_{in} (мм)	№	Металл	Масса включения m_{in} (г)
2	1	Углеродистая сталь (AISI type 1080)	0,049
	2	Нержавеющая сталь (AISI 316L)	0,053
	3	Никель (без примесей)	0,068
	4	Титан (Ti6Al4V)	0,029
	5	Медь (без примесей, бескислородная)	0,057
	6	Алюминий (6000 series)	0,018
	7	Коммерческая бронза (90 % меди и 10 % цинка)	0,060
	8	Гильзовая латунь (70 % меди и 30 % цинка)	0,055

При анализе результатов экспериментальных исследований (см. Глава 3) учитывались теплофизические свойства металлов и воды [177, 181–185].

Неоднородные капли создавались на основе крупного твердого включения и следующих жидкостей: водопроводная питьевая и дистиллированная вода, водные растворы с добавлением ПАВ, солевые растворы и графитовые суспензии. При проведении экспериментов с металлическими включениями применялась только водопроводная и дистиллированная вода. Водные растворы ПАВ и солей, а также суспензии использовались для изучения влияния примесей на процессы и условия интенсификации фазовых превращений неоднородных (с крупными графитовыми включениями) капель жидкости. Кроме того, проводилось сравнение эффектов интенсификации теплообмена при применении воды и растворов (или суспензий). Концентрации смачивающего агента, соли и мелких графитовых включений, а также размеры последних указаны в п. 2.1.

В таблице 2.3.4 представлены характеристики примененного в экспериментах смачивающего агента.

Таблица 2.3.4. – Характеристики смачивающего агента

Показатель	Значение
Плотность при 293 К, кг/м ³	954
Внешний вид	Бесцветная жидкость
Содержание ПАВ, % масс	25
рН раствора	6,5
Название	Неолас

Для приготовления солевых растворов применялась соль пищевая NaCl.

Объем капель жидкости составлял 5, 10 или 15 мкл во всех проведенных экспериментах. Забор капель жидкости заданного объема осуществлялся из лабораторной посуды электронным одноканальным дозатором FinnpiPETTE Novus (минимальный забираемый объем – 5 мкл, максимальный – 50 мкл, шаг варьирования – 0,1 мкл, погрешность $\pm 3\%$) с использованием наконечника (рис. 2.2.1, 2.2.2 и 2.2.3). С помощью этого наконечника капля жидкости опускалась на

включение, механически закрепленное на стержне. Необходимо отметить обязательное условие проведения каждого опыта – полное обволакивание твердого включения каплей жидкости. Данное условие достигалось за счет погружения (на период 1–2 с) включения в емкость с подготовленной (температура ~ 298 К) водой перед проведением каждого эксперимента. Более того, для металлических включений при этом выполнялась стабилизация их начальной температуры. Графитовые включения для каждого опыта использовались новые. Оставшаяся на твердых включениях (после погружения) масса жидкости учитывалась при обработке результатов опытов и составляла в среднем $\sim 0,002$ г.

В отличие от экспериментов [3, 4, 30], где капли двигались через высокотемпературную газовую среду, в данной работе исследования проводились с закрепленными на стержне неподвижными неоднородными каплями (на рис. 2.3.6 приведены типичные для выполненных экспериментов конфигурации неоднородной капли). Стержень (диаметром 0,3 мм) изготавливался из изоляционного материала [186] (керамика; характеристики материала – см. таблицу 2.3.5) для минимизации его влияния на прогрев включения и жидкости при теплообмене с газовой средой. Тем не менее, для исследования влияния добавления углеродистых частиц ($L_m=50\div 500$ мкм) на процессы нагрева, испарения и деформации неоднородных капель жидкости, а также изучения особенностей расположения крупных графитовых включений внутри капель воды в условиях свободного падения последних проводились эксперименты с падающими через цилиндрический канал с высокотемпературными продуктами сгорания каплями.

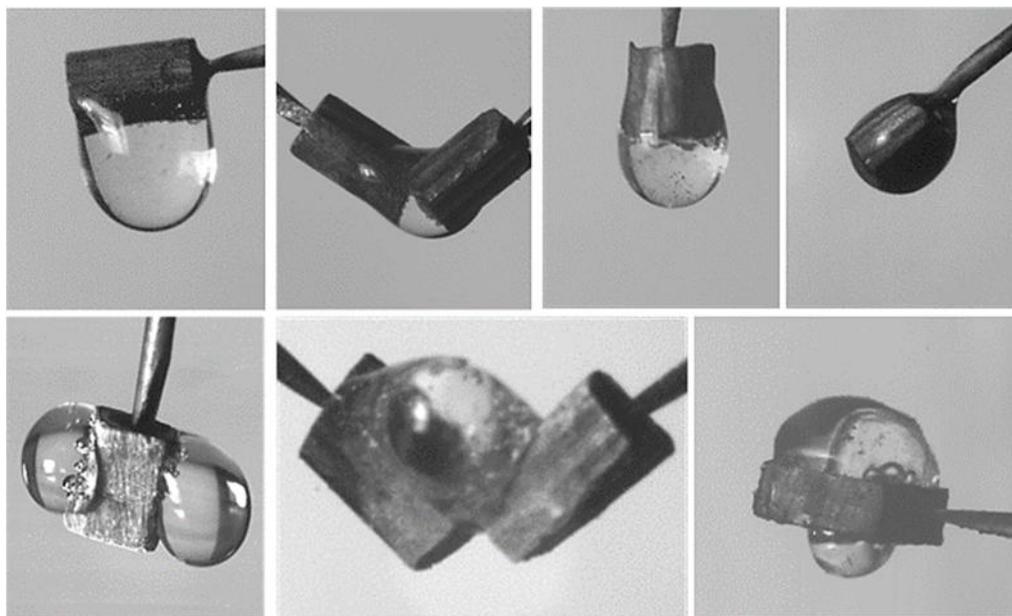


Рисунок 2.3.6. – Типичные варианты формирования неоднородных капель жидкости (варьировались: 1. размеры включений, их форма (включая шероховатость и пористость поверхности) и количество в составе неоднородной капли; 2. условия обволакивания включения каплями жидкости; 3. объемы жидкости в составе неоднородной капли; 4. углы наклона неоднородных капель относительно направления движения высокотемпературной среды)

Таблица 2.3.5. – Теплофизические свойства керамического стержня [186]

Удельная теплоемкость, Дж/г·°С	0,4
Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К	2,2
Максимальная эксплуатационная температура, °С	1500

Такие варианты формирования неоднородной капли выбраны, исходя из результатов предварительных экспериментов, проведенных на стенде (рис. 2.2.1), с движущимися (в режиме свободного падения; см. рис. 2.3.1) неоднородными каплями воды через высокотемпературные газы в цилиндрическом канале. Предварительные эксперименты показали, что положение твердых соразмерных включений в каплях может быть совершенно различным, а случаи частичного выступления (рис. 2.3.1) включений с их поверхности являются регулярными.

Следует также отметить критерии выбора именно таких размеров неоднородных капель жидкости и твердых включений, а также, соответственно, объемов жидкости. По результатам экспериментов [3, 4, 30] сделаны выводы о том, что включения в каплях воды приводят не только к интенсификации прогрева жидкости и фазовых превращений на внешней (свободной) поверхности капли, но и на внутренних границах «жидкость – включение». Это, в свою очередь, может приводить к пузырьковому кипению и разрыву пленки жидкости вследствие роста и движения пузырьков пара. Сделано предположение о введении в капли воды соразмерных твердых включений для возможного достижения указанных эффектов. Таким образом, после формирования капли воды, содержащей крупное твердое включение, ее характерный размер варьировался в диапазоне от ~ 3 мм до ~ 5 мм в зависимости от размера твердого включения. Более того, практическая направленность работ [3, 4, 30] обуславливает потенциальное использование результатов исследований при решении задач интенсификации фазовых превращений жидкостей в пламенах в процессе тушения лесных пожаров. Выделенный диапазон размеров неоднородных капель является характерным для капельных потоков, сбрасываемых с летательных аппаратов при тушении лесных пожаров.

2.4. Методы исследований процессов фазовых превращений неоднородных капель жидкости

Формирование высокотемпературной среды на первом стенде (рис. 2.2.1). В качестве горючих веществ для генерации высокотемпературных продуктов сгорания использовались керосин (ТС-1), бензин (АИ-95), этиловый технический спирт (95 %), технический ацетон (ГОСТ 2768-84 с изм. I, II) и бутан-пропановая газовая смесь. Сжигание керосина и бензина сопровождалось дымо- и сажеобразованием, которые отрицательно влияли на контрастность изображения неоднородной капли жидкости при видеосъемке. Образовавшаяся сажа, оседая на поверхности капли, затрудняла визуальную идентификацию

границ раздела сред в капле, поэтому выбор технического спирта и ацетона как основных горючих жидкостей являлся обоснованным. Но вследствие того, что пары ацетона являются токсичными и обладают характерным запахом, предпочтение по большей части отдавалось техническому спирту. Использование технического спирта и ацетона ограничивало верхний диапазон изменения температуры газов T_g в проведенных экспериментах. Для выполнения анализа влияния лучистого теплового потока на процессы прогрева и испарения неоднородных капель жидкости использовались все перечисленные виды горючих веществ.

Горючая жидкость заливалась в горелку, оснащенную четырьмя технологическими отверстиями и расположенную в основании цилиндрического канала (длина 1 м, внутренний диаметр 0,2 м) из кварцевого стекла. Отверстия в горелке обеспечивали требуемый подсос воздуха в зону горения, поток которого усиливался за счет работы нагнетательной установки. Необходимо также отметить, что объем заливаемой горючей жидкости в каждой серии экспериментов являлся постоянным, но варьировался в зависимости от требуемого времени горения и решаемой задачи. Например, при исследовании процессов фазовых превращений капель жидкости с металлическими включениями использовалась горючая жидкость объемом 60 мл. Горение технического спирта в этом случае при скорости движения потока высокотемпературных газов $\sim 1,5\text{--}2$ с (методика измерения скорости потока высокотемпературных газов будет описана далее) продолжалось около 300 с. Этого было достаточно для проведения одной серии экспериментов из 5–7 опытов в зависимости от параметров неоднородной капли жидкости (масса капель воды, размер включения, марка металла). В таблице 2.4.1 указаны основные компоненты продуктов сгорания примененных в исследовании этилового технического спирта и ацетона. Значения характеристик в таблице 2.4.1 средние по высоте цилиндра (рис. 2.2.1).

Таблица 2.4.1. – Основные компоненты продуктов сгорания использовавшихся горючих жидкостей

Компоненты	Этиловый технический спирт (95 %)	Технический ацетон (ГОСТ 2768-84 с изм. I, II)
CO ₂ , %	4,4	3,87
CO, %	0,058	0,0308
O ₂ , %	14,9	15,68
NO, %	0,0017	0,0027
NO _x , %	0,0018	0,00287
SO ₂ , %	0	0

Измерение содержания компонентов продуктов сгорания проводилось газоанализатором Testo 300XXL (погрешность измерения CO: ±5 %, O₂: ±0,2 %, NO: ±5 %, NO_x: ±5 %; содержание других компонентов является для указанной модели газоанализатора расчетным значением).

Температура продуктов сгорания T_g в цилиндрическом канале достигала 900–1100 К. За счет настройки нагнетательной системы, обеспечивающей дополнительную подачу воздушного потока (выполненные в горелке отверстия способствовали дополнительному притоку воздуха в горелку в зону горения топлива) и отведение газо-воздушной смеси, появлялась возможность регулировать скорость установления максимальной T_g в цилиндрическом канале. Это, в свою очередь, позволяло проводить эксперименты и при $T_g < 900$ К.

В экспериментах с нагревом неоднородных капель за счет сжигания бутан-пропановой смеси, в основание цилиндрического канала устанавливался газовый баллон, проводилось зажигание пьезоэлектрическим элементом. Баллоны с газом были оснащены механическими регуляторами подачи смеси. За счет этого становился возможным контроль скорости установления необходимого температурного режима в цилиндрическом канале.

Формирование высокотемпературной среды на втором стенде (рис. 2.2.2) осуществлялось с применением промышленного воздухонагревателя (Leister LHS 61, максимальная температура воздуха на выходе 923 К) и вентилятора вихревого высокого давления (Leister Robust с частотой до 50 Гц и расходом воздуха при 293 К до 1200 л/мин) с возможностью регулирования скорости потока разогретого воздуха. Продолжением выходного патрубка воздухонагревателя является высокотемпературный канал (диаметром 0,2 м), часть которого изготовлена из кварцевого стекла. Именно в этой части канала выполнено отверстие диаметром $\sim 0,015$ м для установки термоэлектрического преобразователя и ввода неоднородной капли жидкости. Капля жидкости передвигалась до оси симметрии кварцевой части высокотемпературного канала.

Формирование высокотемпературной среды на третьем стенде (рис. 2.2.3) проводилось с применением трубчатой муфельной печи Nabertherm R 50/250/13 (максимальная температура 1573 К, длина рабочей керамической трубы 250 мм). Контроль и установление необходимой температуры нагрева T_g выполнялись с помощью интегрированных регулятора и термопары типа S (платинородий-платиновая; максимальная рабочая температура 1623 К, показатель тепловой инерции – не более 5 с, предел допускаемых отклонений ± 1 К). Неоднородные капли жидкости вводились вдоль оси симметрии рабочей керамической трубы до ее середины для обеспечения требуемых температурных условий нагрева.

Высокоскоростная видеосъемка выполнялась цветной камерой Phantom V411 (ее основные характеристики указаны в п. 2.2) и макро-объективом Nikon AF MICRO-NIKKOR 200MM F/4D IF-ED (фокусное расстояние 200 мм). Применение данных устройств позволяло не только регистрировать особенности процессов фазовых превращений неоднородных капель жидкости на внутренних и внешних границах раздела сред, но и анализировать временные характеристики этих процессов.

В таблице 2.4.2, а также на рис. 2.4.1 и 2.4.2 приведены основные параметры, которые определялись в результате высокоскоростной съемки и

использования программ Phantom Camera Control и ТЕМА Automotive. Последняя по записанному видео материалу обеспечивала регистрацию изменения размеров неоднородной капли (рис. 2.4.3) и парового слоя на внутренней границе раздела сред «включение – слой воды», а также параметров мелких капель жидкости (формы, размеры, траектории), формируемых в процессе дробления неоднородной капли. При этом в программе ТЕМА Automotive использован алгоритм Advanced Airbag Tracker, который контролировал изменения контуров неоднородных капель жидкости в процессе фазовых превращений и приводил эти изменения как графические зависимости, по которым можно определить средний характерный размер (радиус капли (R_d)). Последний вычислялся по среднему значению четырех размеров капли в разных сечениях; рис. 2.4.3). Для измерения толщины парового слоя (h_v) на внутренней границе раздела сред и размеров мелких капель жидкости (радиусов R_{sd}), отделяющихся от поверхности неоднородной капли при интенсивном парообразовании, применялся инструмент Distance (измерение расстояния между двумя точками). Для этого предварительно в программе рассчитывался масштабный коэффициент (S) в соответствии с заранее известным диаметром керамического стержня (d_r). Систематические погрешности средств измерения размеров R_d , h_v , R_{sd} не превышали 0,05 мм. Программа Phantom Camera Control обеспечивала настройку скоростной камеры и ее управление (отображение субъектов исследования в режиме реального времени в окне программы, захват видеоматериала и его сохранение на накопитель ПК). Анализ временных характеристик изучаемых процессов проводился также этой программой. В диссертационном исследовании скорость съемки была относительно невысокой (до 10^3 кадров/с при разрешении съемки 512×512 пикселей или 512×256 пикселей). Однако, этой скорости было достаточно для детального изучения закономерностей испарения и кипения неоднородных капель жидкости, а также определения времен соответствующих процессов. Максимальные систематические погрешности определения временных характеристик исследуемых процессов (см. таблица 2.4.2, рис. 2.4.1 и 2.4.2) составляли от 0,01 до 0,001 с в зависимости от установленной частоты съемки при

настройке высокоскоростной видеорегистрации в программе Phantom Camera Control.

Таблица 2.4.2. – Основные определяемые характеристики системы «неоднородная капля жидкости – высокотемпературная среда»

Временные характеристики
Время существования неоднородной капли в высокотемпературной среде (τ_h), с
Время начала интенсивного парообразования на границе раздела сред «включение – слой жидкости» (τ_0), с
Время интенсивного парообразования неоднородной капли жидкости с ее взрывным разрушением (τ), с
Время начала испарения неоднородной капли (τ_{e0}), с
Конечное время испарения неоднородной капли (τ_e), с
Размеры
Радиус неоднородной капли жидкости (R_d), мм
Толщина парового слоя на границе раздела сред «твердое включение – слой жидкости» (h_v), мм
Радиус мелких капель жидкости (R_{sd}), мм

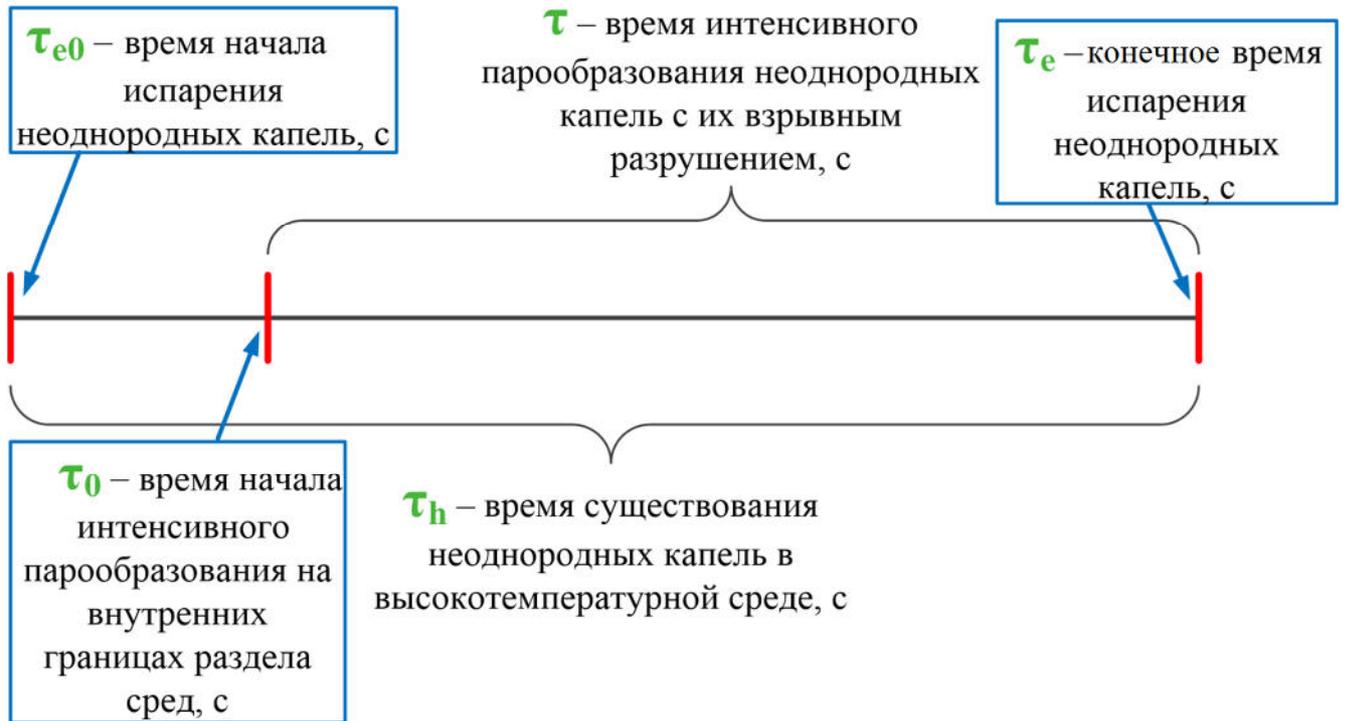


Рисунок 2.4.1. – Временные характеристики исследуемых процессов

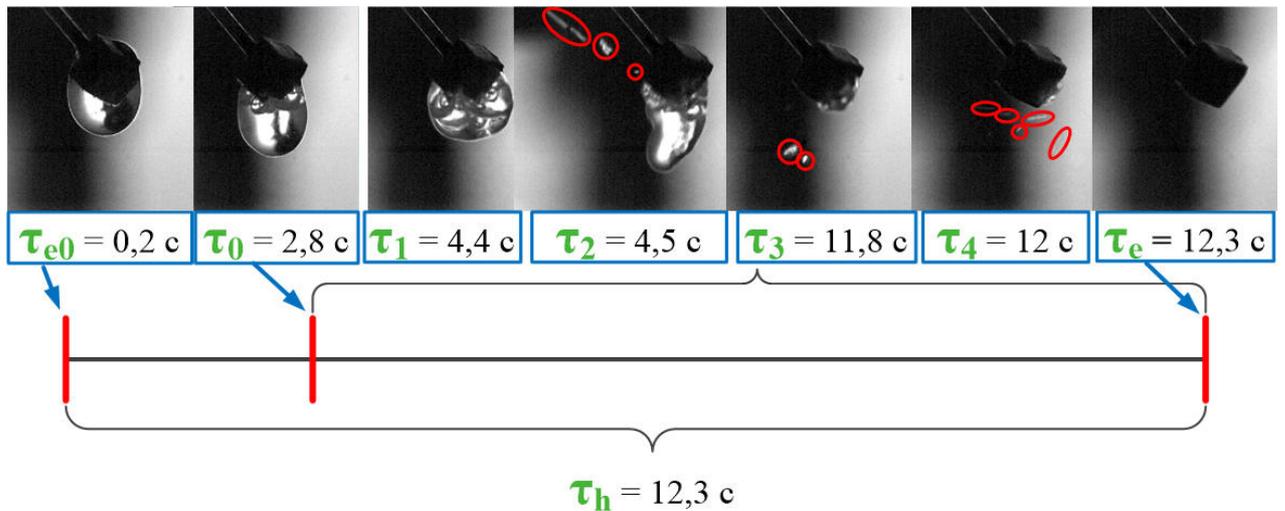


Рисунок 2.4.2. – Кадры видеогаммы процесса испарения неоднородной капли жидкости в соответствии с временными характеристиками, представленными на рис. 2.4.1

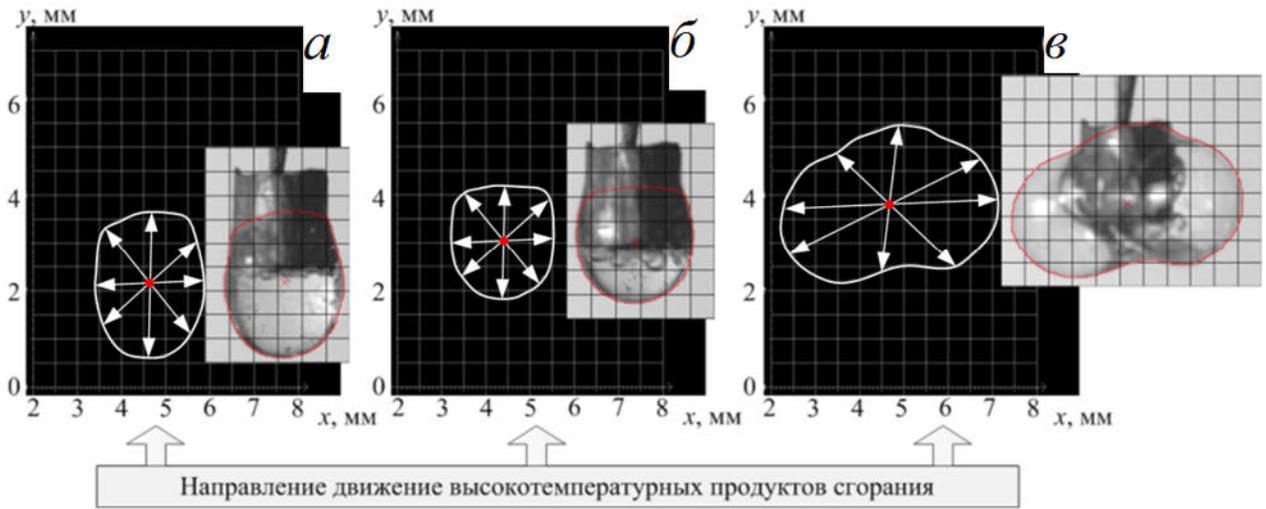


Рисунок 2.4.3. – Видеокадры фазовых превращений неоднородной капли жидкости (объем жидкости 15 мкл), нагреваемой в продуктах сгорания технического спирта, в программе TEMA Automotive: *a* – 0,01 с; *б* – 9 с; *в* – 12,18 с

Метод **Particle Image Velocimetry (PIV)** применялся для контроля скоростей движения потока высокотемпературных продуктов сгорания (U_g) в цилиндрическом канале. Использовались импульсный лазер, генератор лазерного излучения, кросскорреляционная камера и синхронизатор ПК, камеры и лазера (рис. 2.2.1), а также программное обеспечение Actual Flow. Трассирующие частицы (нанопорошок – диоксид титана TiO_2) вводились в поток газов в нижней части цилиндра (аналогично методике [187]). Проводилась регистрация мгновенных скоростей трассеров в потоке газов между вспышками лазера (см. рис. 2.2.1): трассеры многократно освещались последним; их образы регистрировались кросскорреляционной высокоскоростной видеокамерой. Обработка полученных изображений позволяла рассчитать смещения трассеров за время между вспышками лазера и их скорости, соответствующие скорости потока продуктов сгорания. Скорости движения газов U_g во всех экспериментах регулировались параметрами работы нагнетательной системы (позиция *II* на рис. 2.2.1) и поддерживались на уровне $\sim 1,5\text{--}2$ м/с (рис. 2.4.4). Такие скорости движения газов U_g являлись приемлемыми для обеспечения следующих условий:

- (1) Сохранение целостности неоднородной капли при нагреве в потоке высокотемпературных газов.
- (2) Обеспечение необходимой высоты пламени (по длине канала цилиндра).

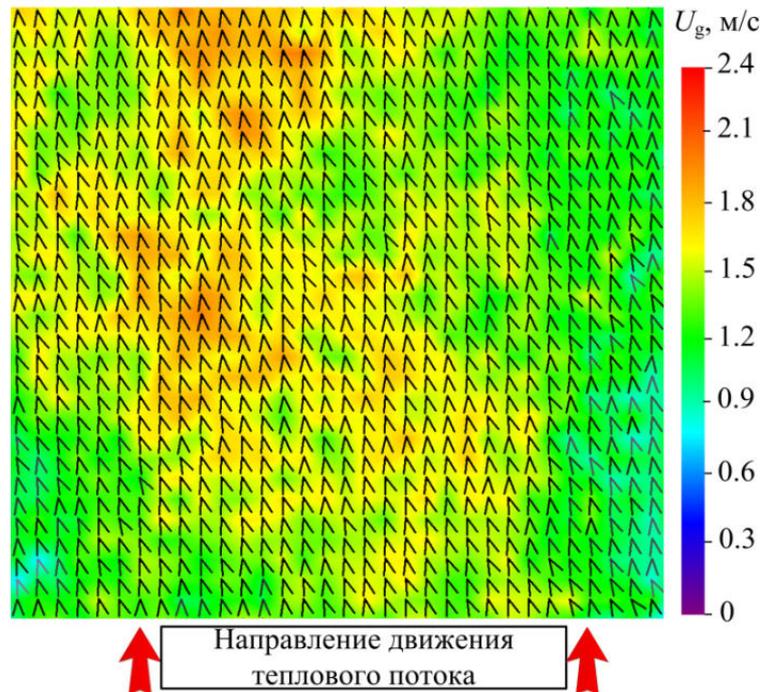


Рисунок 2.4.4. – Двухкомпонентное поле скоростей потока продуктов сгорания технического спирта

Механизированный ввод неоднородных капель жидкости в высокотемпературную газовую среду. Ввод капель обеспечивался за счет применения модулей линейного перемещения под управлением сервоприводов (моторизированные координатные устройства; см. рис. 2.2.1, 2.2.2 и 2.2.3). На исполнительной части (модуле линейного перемещения) устанавливалась металлическая направляющая для крепления керамического стержня, посредством которого в экспериментах в высокотемпературную область вводились неоднородные капли жидкости. В настройках программы, обеспечивающей работу координатного механизма, можно было задавать скорость перемещения подвижной части и расстояние продвижения капли. Перед проведением контрольных экспериментов параметры программы настраивались

таким образом, чтобы неоднородная капля могла переместиться точно в область фокусировки видеокамеры с заданной скоростью.

Термопарные измерения. Контроль (мониторинг и регистрация) температур газовой среды и жидкостей в составе неоднородных капель (перед опытами) проводился с применением термоэлектрических преобразователей (термопар). При контроле температур продуктов сгорания T_g (рис. 2.2.1) использовались три вольфрам-рениевые термопары (диапазон измеряемых температур 0–2473 К, максимальная допускаемая погрешность $\pm 0,005 \cdot |T_g|$), закрепленные на высоте 0,25 м, 0,5 м и 0,75 м, соответственно, относительно основания горелки. Чувствительные элементы термопар располагались на оси симметрии полого цилиндра. Для этого в стенке цилиндра были выполнены соответствующие отверстия (диаметром 0,015 м). Показания термопар записывались регистратором температуры (рис. 2.2.1). Обработка данных осуществлялась на ПК. Выходными данными регистратора температуры являлись таблицы, отражающие изменение температуры газовой среды за 1 с в заданном интервале времени.

При проведении экспериментов с использованием воздухонагревателя (рис. 2.2.2) температура разогретого воздуха T_g задавалась на регуляторе устройства (достижение заданной температуры потока отражалось на дисплее регулятора). Необходимо отметить, что место введения неоднородной капли жидкости в поток разогретого воздуха находилось на некотором расстоянии от выходного патрубка воздухонагревателя (рис. 2.2.2). Соответственно, имели место потери теплоты по длине канала с разогретым воздухом. По этой причине в отверстие, в которое вводилась неоднородная капля, устанавливалась хромель-алюмелевая термопара (тип К; диапазон измеряемых температур 223–1473 К, максимальная допускаемая погрешность $\pm 3,3$ К), показания которой записывались в регистраторе температур. Таким образом, проводился контроль температуры нагрева T_g неоднородных капель жидкости в потоке разогретого воздуха.

Во время проведения экспериментов начальная температура жидкости неоднородных капель поддерживалась на уровне около 298 К. Мониторинг этой

температуры осуществлялся хромель-алюмелевой термопарой (характеристики термопары см. выше).

Процедура проведения экспериментов включала следующие стадии:

- (1) Иницировалось зажигание горючего вещества в мультитопливной горелке с применением специализированной пьезоэлектрической зажигалки (в воздухонагревателе и муфельной печи устанавливался необходимый температурный режим).
- (2) Закрепленная на керамическом стержне капля жидкости объемом 5, 10 или 15 мкл с твердым включением подавалась в область взаимодействия с высокотемпературной газовой средой.
- (3) Первый оператор экспериментальной установки перед появлением системы «неоднородная капля – керамический стержень» в области видеосъемки активировал процесс высокоскоростной видеорегистрации. При появлении рассматриваемой системы в области видео захвата фиксировались времена τ_{e0} и τ_0 . После полного испарения воды твердое включение выводилось из высокотемпературной газовой среды.
- (4) Второй оператор экспериментальной установки между опытами выполнял охлаждение металлической частицы или закрепление нового графитового включения на керамическом стержне. Далее он проводил слияние капли жидкости необходимого объема и подготовленного включения. Затем сформированная неоднородная капля жидкости вводилась в газовую среду.
- (5) Для каждой конфигурации неоднородной капли жидкости проводилось как минимум три серии экспериментов по 5–10 опытов при идентичных условиях (размерах твердых включений, начальных массах капель жидкости, температурах газов и скоростях их движения). При необходимости полученные данные уточнялись проведением дополнительных серий экспериментов.
- (6) По зафиксированным τ_{e0} и с учетом установленных по записанному видеоматериалу продолжительностям процессов парообразования жидкости определялись соответствующие диапазоны изменения температуры газовой

среды T_g (для случая, когда неоднородная капля жидкости нагревалась в потоке продуктов сгорания горючих веществ).

- (7) После выполнения необходимого числа опытов проводилась обработка результатов экспериментов. Определялись времена τ_h , τ и τ_e , а также размеры R_d , h_v и R_{sd} .

Выводы по второй главе

1. Созданы три экспериментальных стенда для исследования закономерностей испарения и режимов кипения при нагреве капель жидкости с твердыми включениями в высокотемпературной газовой среде с применением высокоскоростной регистрирующей аппаратуры и оптического метода диагностики потоков Particle Image Velocimerty.
2. Разработан новый подход к анализу макроскопических закономерностей фазовых превращений неоднородных капель жидкости, отличающийся от известных в их стационарном положении (закреплении) в высокотемпературной газовой среде. Также уникальность подхода обусловлена использованием трех экспериментальных стендов, отличающихся от известных использованием различных вариантов нагрева субъектов исследования (продуктами сгорания типичных топлив, потоком разогретого воздуха и нагревательными элементами в муфельной печи), а также применением скоростной и кросскорреляционной камер, импульсного твердотельного лазера и средств автоматического линейного перемещения.
3. Эксперименты на разработанных стендах позволили установить зависимости основных характеристик теплопереноса и фазовых превращений в рассматриваемых гетерогенных (неоднородных) системах от группы основных параметров системы (температура и скорость потока газовой среды, вид горючего вещества и способ нагрева субъектов исследования, теплофизические свойства твердых включений, их форма, размер и концентрация, материал включений, размер неоднородных капель, состав и свойства жидкости в составе неоднородной капли).
4. Проведена оценка достоверности результатов экспериментальных исследований.

Глава 3. Результаты экспериментальных исследований фазовых превращений неоднородных капель водных суспензий

3.1. Взрывное разрушение неоднородной капли водной суспензии при интенсивном парообразовании

В результате экспериментов [3, 30, 133] установлено существенное влияние твердых включений (неметаллических частиц размерами от нескольких десятков до сотен микрометров) в каплях воды на интегральные характеристики их испарения при движении через высокотемпературные газы. В частности, в [133] на экспериментальном стенде с топливной горелкой в качестве устройства для генерации высокотемпературной газовой среды (рис. 2.2.1) с использованием оптических методов диагностики двухфазных газо- и парожидкостных потоков (Particle Image Velocimetry и Interferometric Particle Imaging) установлено, что ввод инородных твердых частиц в капли жидкости в несколько раз увеличивает скорости испарения последних в области высокотемпературных газов и приводит к их существенным деформациям в полете через высокотемпературную среду.

На рис. 3.1.1 и 3.1.2 приведены типичные кадры видеogramм серии экспериментов при варьировании значений основных параметров: начального размера капель, концентрации твердых включений, характерных размеров последних. В качестве функции цели экспериментальных исследований выбрана характеристика изменения условного радиуса капель – введен в рассмотрение параметр ΔR ($\Delta R = ((R_d^{\text{inp}} - R_d^{\text{out}}) / R_d^{\text{inp}}) 100$, где R_d^{inp} , R_d^{out} – условные радиусы капель на входе и выходе из канала 13 (рис. 2.2.1)).

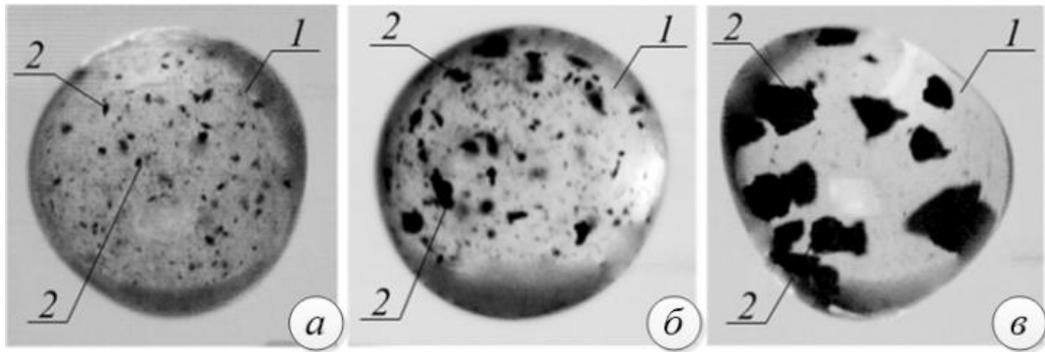


Рисунок 3.1.1. – Изображения капель ($R_d=3$ мм) с включениями углеродистых частиц разного размера ($a - L_m=50-70$ мкм; $б - L_m=250-300$ мкм; $в - L_m=450-500$ мкм) на входе в высокотемпературную газовую среду: 1 – капля, 2 – углеродистые частицы

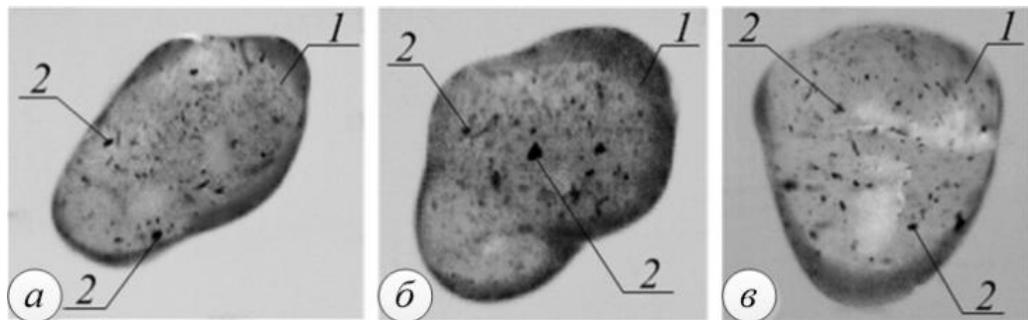


Рисунок 3.1.2. – Изображения капель ($R_d=3$ мм) с включениями углеродистых частиц ($L_m=50-70$ мкм) на выходе из высокотемпературной газовой среды

Анализ видеogramм (рис. 3.1.1 и 3.1.2) позволил сделать вывод о том, что в процессе движения через высокотемпературную газовую среду форма капель, содержащих твердые включения (частицы углерода), меняется существенно от эксперимента к эксперименту. При этом на входе в область высоких температур конфигурация капель почти не отличается (рис. 3.1.1). Но, несмотря на значительные изменения формы капель, отклонения по параметру ΔR не превышают 1,5 %. Можно сделать вывод о том, что форма капель не оказывает практически никакого влияния на интенсивность испарения воды. Скорее всего, конфигурация поверхности капли может оказывать существенное влияние на характеристики испарения при длительном (десятки секунд) нагреве. Полученный

результат имеет фундаментальное значение и позволяет при моделировании рассматриваемого процесса не учитывать возможную деформацию капель в полете.

Сравнение видеogramм опытов (рис. 3.1.1 и 3.1.2) с аналогичными кадрами для капель воды без твердых включений [4] позволяет сделать еще один вывод: присутствие твердых включений в жидкости приводит к значительным деформациям капель в полете через высокотемпературные газы (рис. 3.1.2). Изменение формы капель при этом происходит случайным образом. По результатам проведенных экспериментов можно выделить от 10 до 15 наиболее типичных конфигураций, установленных в нескольких десятках опытов (рис. 3.1.2). Можно предположить, что наличие твердых включений приводит к снижению эффективной вязкости системы «вода – частицы углерода», а также к уменьшению силы поверхностного натяжения жидкости на участках поверхности капель, включающих частицы углерода.

На рис. 3.1.3 приведена экспериментальная зависимость условного радиуса капель на выходе из области высоких температур от концентрации твердых включений. Хорошо видно, что изменение относительной массовой доли примесей от 0 до 0,01 приводит к росту скорости испарения воды в системе «жидкость – твердые включения» более чем в два раза.

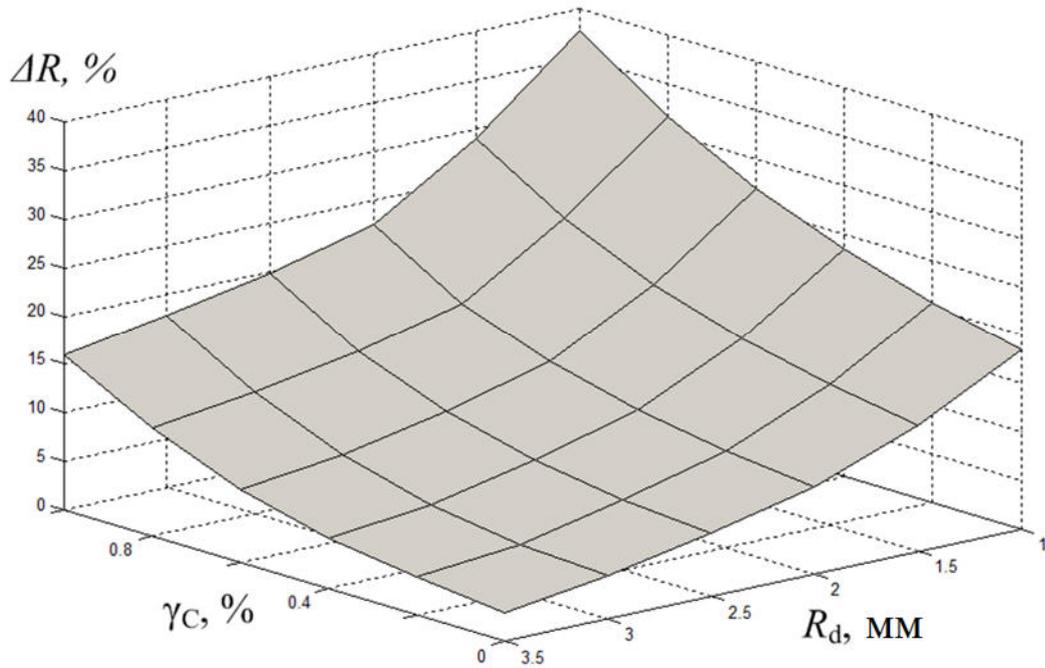


Рисунок 3.1.3. – Зависимость параметра ΔR от относительной массовой концентрации углеродистых частиц γ_c и начального радиуса капли R_d (средний размер углеродистых частиц $L_m=50-70$ мкм)

Такие масштабные изменения размеров капель не могут быть следствием только роста теплопроводности смеси воды с частицами углерода при малых концентрациях последних. Наиболее вероятным механизмом интенсификации процесса испарения в рассматриваемой системе является увеличение радиационного теплового потока к поверхности гетерогенной (неоднородной по своему составу) капли. Тепловой поток к находящимся в тонком приповерхностном слое нагреваемой капли частицам углерода существенно (в 5–6 раз) превышает аналогичный поток для воды. В результате, несмотря на малую концентрацию примесей, их температура может достичь существенно более высоких значений по сравнению с однородной каплей воды. Соответственно, в окрестности каждого включения происходит испарение воды со скоростью, кратно превышающей скорости испарения однородной жидкости.

Если углеродистые включения смещены от поверхности нагрева вглубь капли на малое по сравнению со своими характерными размерами расстояние, то

перегрев (относительно жидкости) до существенно более высоких температур будет приводить к образованию парового слоя вблизи поверхности твердых частиц и последующему диспергированию поверхности гетерогенной капли. Последнее и может приводить к зарегистрированным в экспериментах уменьшениям размеров гетерогенных капель по сравнению с однородными в идентичных условиях проведения опытов.

Установлено, что при увеличении размеров твердых включений в каплях жидкости влияние выделенных эффектов на интенсивность прогрева жидкости существенно возрастает. Так, на рис. 3.1.4 приведена зависимость параметра ΔR от характерного среднего размера углеродистых частиц L_m для одиночных капель с условным радиусом $R_d=3$ мм. Показано, что при средних размерах частиц $L_m=50-70$ мкм величина параметра ΔR составляет 0,076, при $L_m=250-300$ мкм – 0,091, при $L_m=450-500$ мкм – 0,129.

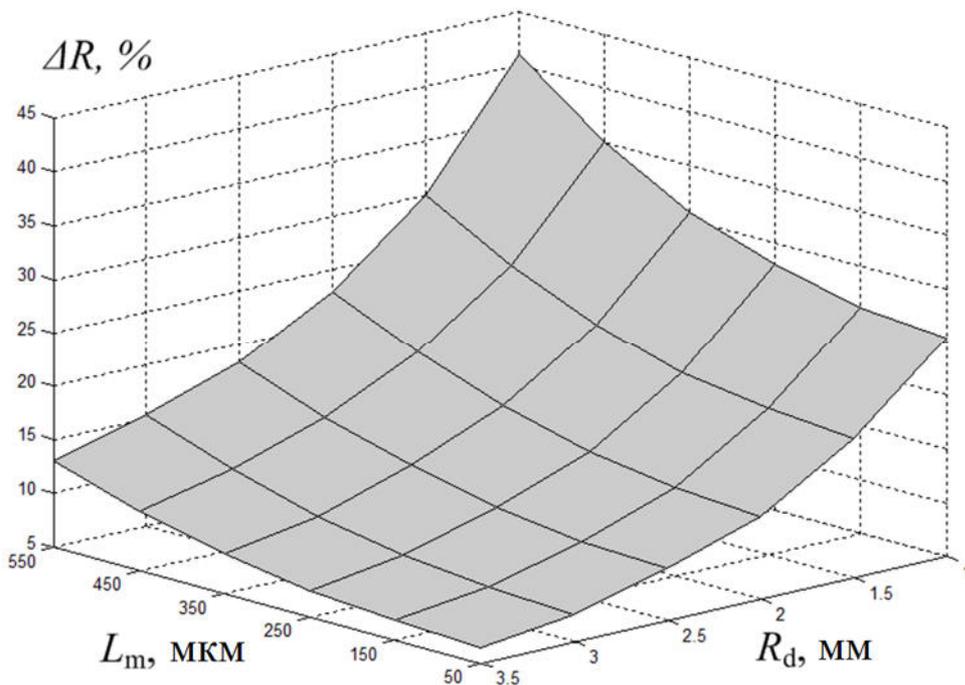


Рисунок 3.1.4. – Зависимость параметра ΔR от характерного среднего размера углеродистых частиц L_m и начального радиуса каплей R_d ($\gamma_c=0,8$ %)

Также проведены эксперименты для установления предельных значений размеров твердых включений в каплях жидкости, приводящих к разрушению

(разрыву) последних. Размеры капель жидкости выбирались адекватными технологиям [18,49,188–193] (от нескольких десятков до сотен микрометров), предполагающим использование «тонкораспыленной» воды. Выявлено, что, например, для капель с условными средними радиусами $R_d=0,1-0,15$ мм при прохождении высокотемпературного газового канала высотой 1 м предельные значения L_m составляют 60–70 мкм. Полученный результат показывает, что наличие в капле одного относительно крупного твердого включения ускоряет процессы ее прогрева, деформации и разрушения более существенно по сравнению с несколькими включениями меньших размеров. Результаты выполненных экспериментов позволяют заключить, что для достижения условий разрыва капель жидкости размеры входящих в их состав твердых частиц должны варьироваться в пределах 50–70 % от размеров капель.

Установленные особенности достаточно хорошо согласуются с основными представлениями, сформулированными по результатам исследований процессов формирования газопарокапельных потоков [18,49,188–193] и движения капель жидкости в потоке газов [17, 194–202].

Так, например, в [192] сделаны заключения об интенсивном испарении мелкодисперсной жидкости в газовой среде и существенно более умеренном протекании этих процессов для больших массивов нераспыленной жидкости. В [195, 196] представлены видеogramмы с изображениями капель жидкости при свободном падении. Показано [195, 196], что, несмотря на начальную сферическую форму капель, последние принимают форму эллипсоидов при падении. Изображения капель [195, 196] согласуются с полученными при проведении экспериментов видеogramмами капель (как с включениями, так и без них) на входе в газовую среду (рис. 3.1.1). При этом в экспериментах [195, 196] установлено, что, несмотря на деформацию поверхности капель, ее площадь изменяется незначительно (до 2 %). Аналогичные заключения можно сделать на основании рис. 3.1.1. На выходе из высокотемпературной области для капель без твердых включений [138] можно говорить также о достаточно умеренном (до 5–7 % относительно начального значения) изменении площади поверхности, как

вследствие некоторой деформации, так и испарения. Капли с твердыми включениями существенно деформируются при движении через канал с высокотемпературными газами (рис. 3.1.2).

Также получено хорошее согласие с результатами численных исследований [197–202] условий разрушения капель жидкости, соотношения между действующими на каплю силами, влияния несферичности движущихся тел на условия испарения, роли нестационарного характера их перемещения, эффекта испарения. Так, например, выделенные в результате экспериментов механизмы торможения капель при реализации фазовых превращений хорошо соответствуют теоретическим заключениям [200, 201]. Установлен нелинейный характер изменения параметра ΔR при движении в высокотемпературном канале, что обусловлено как нелинейностью фазового превращения, так и нестационарностью непосредственно процесса перемещения [197, 198].

После серий экспериментов с движущимися через высокотемпературную газовую область неоднородными каплями было принято решение закрепить неоднородные (с одним твердым включением) капли воды согласно методике, представленной в п. 2.3 диссертации.

Проведенные эксперименты [203] позволили установить разные режимы и временные характеристики взрывного распада неоднородной капли жидкости в рассматриваемых условиях ее нагрева в высокотемпературной газовой среде. На рис. 3.1.5 приведены типичные кадры с изображением распадающихся («взрывающихся») капель после интенсивного нагрева и парообразования на внешней и внутренней границах раздела сред. Можно сделать вывод о том, что в зависимости от интенсивности нагрева капель, их структуры и размеров они могут распадаться на большую группу малых капель или достаточно большие агломераты неправильной формы. Возможны и некоторые смешанные варианты с практически одновременным формированием малых капель и крупных агломератов (рис. 3.1.5).

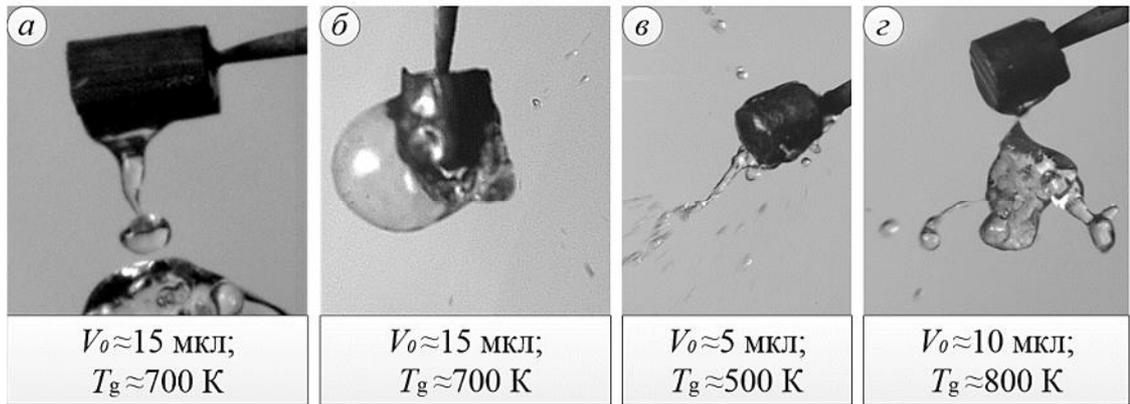


Рисунок 3.1.5. – Типичные кадры с изображением распадающихся («взрывающихся») капель с разным начальным объемом V , при разных температурах газов T_g , а также изменении структуры гетерогенной капли (положения включения)

При этом установлено [203], что перед полным распадом (рис. 3.1.5) неоднородной капли жидкости в условиях интенсивного нагрева возможны отрывы небольших масс жидкости с соответствующими пузырьками (рис. 3.1.6).

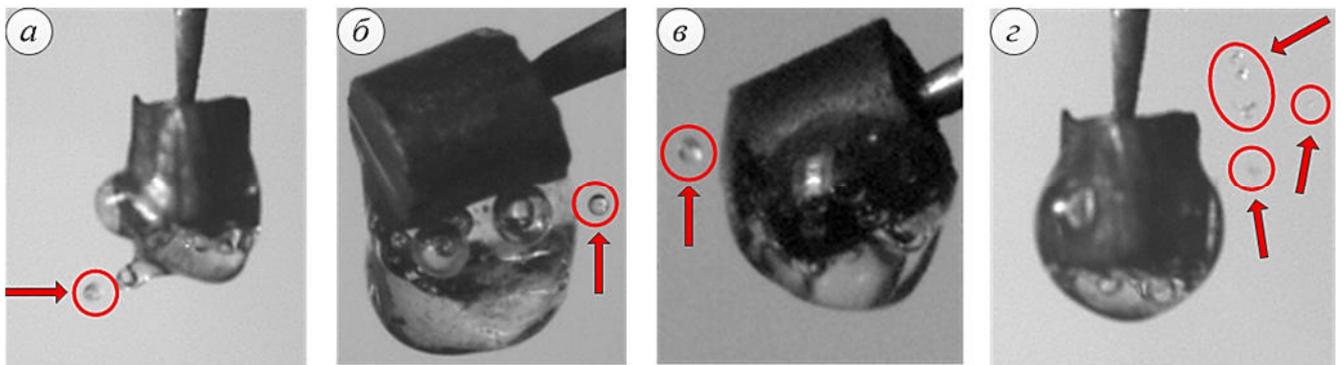


Рисунок 3.1.6. – Кадры с отрывами небольших капелек жидкости перед взрывным распадом: *а, б, в* – отрыв одиночной капли; *г* – отрыв группы капель

Установлено [203], что такие частичные «выбросы» жидкости (отрывы капелек) с поверхности нагреваемой гетерогенной капли возможны как при температурах газов около 500 К, так и максимальных для данных экспериментов около 1100 К. Однако, при малых температурах они зарегистрированы неоднократно практически во всех проведенных опытах, а при больших (более

1000 К) их количество не превышало семи в более чем 20 сериях (не менее 10 опытов в каждой серии) экспериментов. Это можно объяснить тем, что при температурах газов около 500 К характерные времена прогрева жидкости и включения могут достигать даже 10 с и выше. В течение этого времени на поверхности твердого непрозрачного включения зарождаются десятки пузырьков. При этом процесс их роста сопровождается достаточно часто коагуляцией. В таких условиях неизбежен характерный выход с парами небольшой массы жидкости. При высоких (более 1000 К) температурах времена прогрева жидкости и включения кратно уменьшаются по сравнению с аналогичными параметрами при 500 К. Как следствие, плотность теплового потока, подведенного к поверхности капли в единицу времени, значительно увеличивается. Это приводит к резкому росту давления паров между пленкой жидкости и включением. Через довольно короткий интервал времени (как правило, менее 5 с) это давление превышает давление, оказываемое жидкостью и газовой средой на пары внутри капли. Как следствие, достигаются условия взрывного распада капли (рис. 3.1.5).

В экспериментах [3,4,30] установлено, что чем больше концентрация и размеры твердых непрозрачных включений в каплях, тем значительнее последние деформируются в условиях интенсивного теплообмена с газовой средой (рис. 3.1.2). Это, в первую очередь, обусловлено значительной аккумуляцией энергии газовой среды у поверхности непрозрачных включений, ускорением прогрева пленки жидкости и ее испарения. На рис. 3.1.7 представлены графические зависимости [3,4,30] влияния концентрации и размеров включений на интегральную характеристику испарения гетерогенной капли (начальный радиус 3 мм) воды при температуре газов около 1100 К.

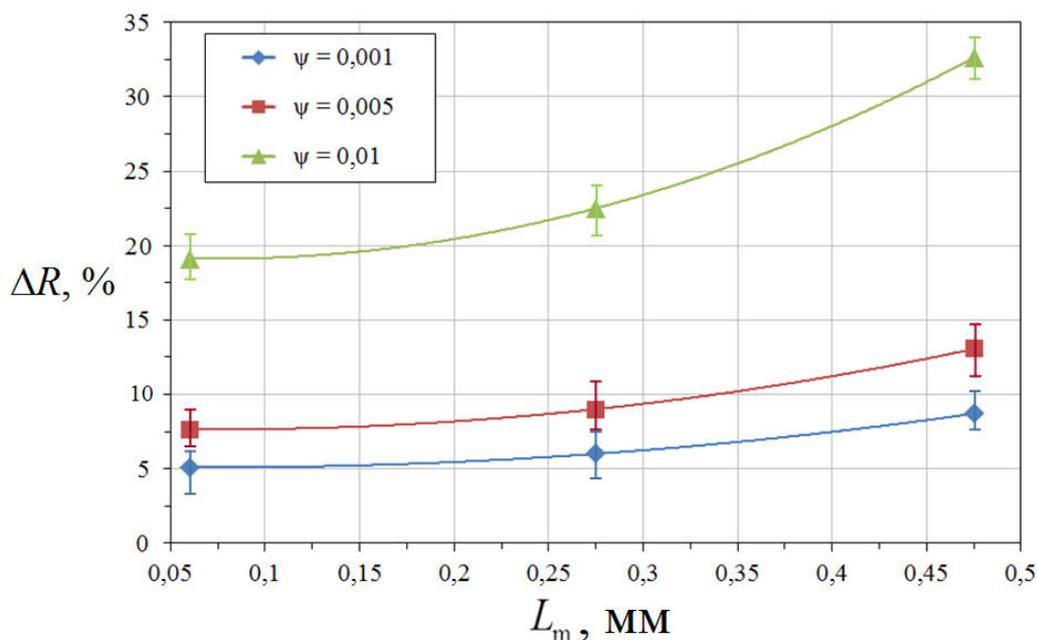


Рисунок 3.1.7. – Зависимость параметра ΔR от характерного размера углеродистых частиц L_m для капель с начальным радиусом $R_d = 3$ мм [3,4,30]

С использованием кривых, аналогичных представленным на рис. 3.1.7, установлено, что времена полного испарения (существования) гетерогенных капель могут на 25–35 % быть ниже, чем для однородных капель при идентичных условиях нагрева. Это обусловлено дополнительным аккумулярованием энергии газов в капле за счет непрозрачности включений – частиц.

3.2. Интенсивное испарение неоднородных капель суспензий на внутренних и внешних границах раздела сред с установлением типичных стадий реализации механизмов парообразования

Применение высокоскоростных (до 10^5 кадров в секунду) средств видеорегистрации «Phantom» и программного комплекса «Тема Automotive» позволило выполнить экспериментальное исследование закономерностей интенсивного парообразования с взрывным распадом неоднородной (с единичным твердым непрозрачным включением) капли жидкости (на примере

воды) в высокотемпературной (500–800 К) газовой среде (продуктах сгорания технического спирта). Определены [204–207] типичные стадии рассматриваемых процессов.

Установлено [204–207], что парообразование неоднородных капель жидкости в рассматриваемых условиях может происходить по одной из трех схем. Реализация каждой из этих схем зависит от температуры газов и характеристик процесса обволакивания включения жидкостью. Эксперименты [204, 206] (в них при постоянном размере и идентичной форме включения с использованием дозатора (рис. 2.2.1–2.2.3) изменялась масса испускаемой им капли от 5 мг до 20 мг) показали, что при массе жидкости до 7 мг она обволакивает (рис. 3.2.1, *a*) включение полностью и достаточно равномерно (максимальные отклонения характерных толщин пленок жидкости на разных участках поверхности включения не превышали 0,2 мм относительно среднего значения). При повышении генерируемой массы жидкости относительно 7 мг возможно формирование капли в виде парашюта (рис. 3.2.1, *б*) с выступом включения с ее поверхности (при сохранении полного обволакивания включения).

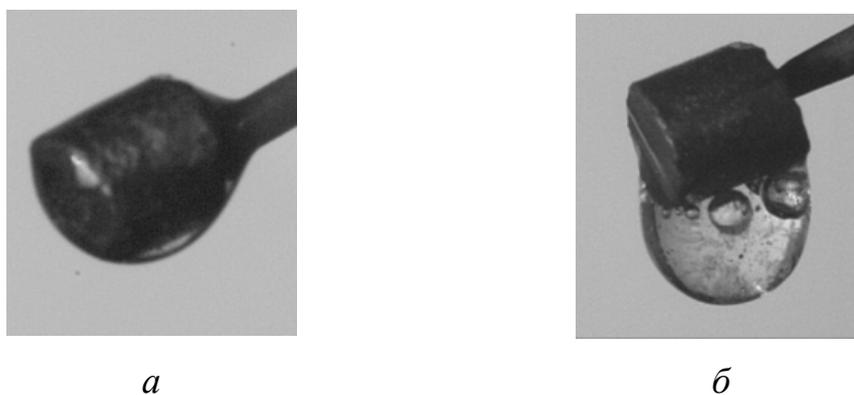


Рисунок 3.2.1. – Типичные изображения капли при полном погружении включения (*a*) и выступлении последнего с ее поверхности (*б*)

Первая установленная схема парообразования соответствует испарению жидкости только со свободной поверхности капли. Для этой схемы характерны температуры до 650 К. На рис. 3.2.2 приведены типичные видеок кадры с

неоднородной каплей при характерной температуре газов около 500 К в разные моменты времени.

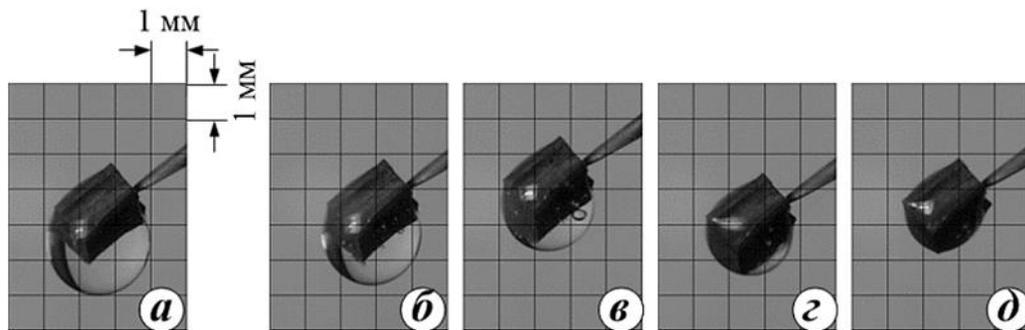


Рисунок 3.2.2. – Типичные изображения капли воды (начальный объем жидкости 15 мкл) с включением при парообразовании по первой схеме (механизм без формирования паровых пузырьков на внутренней границе раздела сред) в разные моменты времени при температуре газов T_g около 500 К:

$a - 1$ с, $б - 3$ с, $в - 5$ с, $г - 7$ с, $д - 9$ с

Можно отметить существенно неравномерное уменьшение толщины пленки жидкости, как во времени, так и по поверхности включения. Этот эффект обусловлен существенно нелинейной зависимостью скорости испарения жидкости от температуры.

При реализации первой схемы условия интенсивного парообразования на внутренних границах раздела сред не достигались. Однако, в единичных экспериментах зарегистрированы случаи зарождения нескольких пузырьков на этих границах. Указанные случаи (рис. 3.2.3) необходимо выделить как один из возможных вариантов (механизмов) реализации первой установленной схемы.

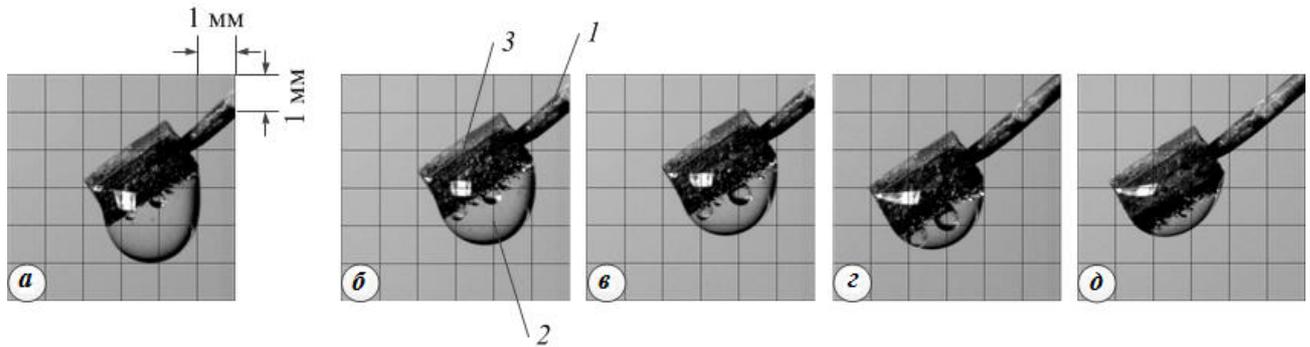


Рисунок 3.2.3. – Типичные видеокадры испарения капли воды с твердым включением (механизм с формированием паровых пузырьков на внутренней границе раздела сред) при температуре газовой среды T_g около 500 К:
a – 0,001 с, *б* – 1,638 с, *в* – 3,628 с, *г* – 5,883 с, *д* – 8,102 с; *1* – керамический стержень; *2* – капля воды; *3* – твердое включение

Реализация двух указанных механизмов испарения имеет вероятностный характер (оба режима зарегистрированы в одинаковых условиях экспериментов). Возникновение паровых пузырьков на внутренней границе раздела сред, возможно, объясняется неравномерным прогревом твердого включения со стороны контакта с газовой средой в проведенных экспериментах. Процессы образования продуктов сгорания при горении практически любых жидких топлив характеризуются нестационарными условиями (скорости движения продуктов сгорания и их температуры могут изменяться в пределах 10–15 % при идентичных внешних условиях). Это приводит к тому, что несколько отличаются условия прогрева как жидкости, так и включения. Так как теплопроводность материала включения выше, чем воды, то вклад процесса прогрева включения в реализацию испарения жидкости является определяющим. К тому же, выполненные численные оценки [30] показали, что твердая частица разогревается интенсивнее, чем вода за счет аккумуляции подведенной через жидкость энергии излучения. Выделенные условия довольно типичны для газопарокапельных гетерогенных потоков [1, 210], соответствующих рассматриваемым в работе

технологиям. Поэтому целесообразно учитывать возможность реализации двух режимов протекания выделенных процессов.

Вторая схема (рис. 3.2.4) установлена для капель воды с полностью погруженными в них единичными включениями. Реализация этой схемы зависела от характерной толщины пленки жидкости вокруг включения. При толщине пленки жидкости вокруг включения менее 0,2 мм, независимо от температуры газов (в пределах выбранного диапазона), происходило только испарение со свободной поверхности капли. При этом пузырьки на внутренних границах раздела сред зарождались в довольно умеренном режиме – без резкого роста их числа и размеров. Как следствие, давление паров внутри капли не успевало превысить соответствующее давление жидкости и газовой среды. При толщине пленки жидкости более 0,2 мм условия интенсивного испарения на внешней поверхности и внутренних границах раздела сред определяла температура газов. В случае, когда температура газов была более 700 К парообразование происходило в соответствии со второй схемой (рис. 3.2.4).

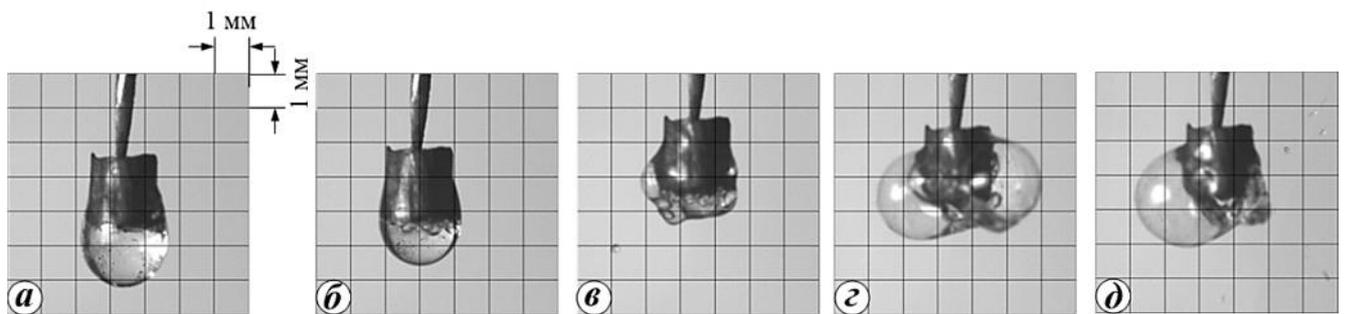


Рисунок 3.2.4. – Типичные изображения капли воды (начальный объем жидкости 15 мкл) с включением при парообразовании по второй схеме в разные моменты времени при температуре газов T_g около 700 К:

$a - 0,001$ с, $b - 7,151$ с, $в - 11,992$ с, $г - 12,172$ с, $д - 12,179$ с

Вторая схема включала несколько стадий. Первая из них представляет инерционный прогрев капли за счет энергии внешней газовой среды. Довольно большая длительность этой стадии по сравнению с другими обусловлена высокой

теплотой фазового перехода жидкости (для воды около 2 МДж/кг). Далее, вблизи границ раздела сред «твердое включение – жидкость» формируются пузырьки (рис. 3.2.4, б). Это можно объяснить поглощением энергии прозрачной жидкостью и аккумулярованием ее большей части у поверхности непрозрачного твердого включения. Однако, этот процесс нельзя назвать высокоскоростным или характеризующимся резким нарастанием числа и размеров пузырьков. Последние формируются даже не по всей поверхности включения. Однако, за довольно короткий интервал времени пленка жидкости вокруг включения прогревается, и интенсифицируется парообразование на внутренних границах раздела сред. Важно отметить, что первоначально сформировавшиеся пузырьки практически не отрываются от границ раздела сред. После накопления определенного количества энергии у границ раздела сред пузырьки начинают отрываться. Отрыв от поверхности включения пузырьков приводит к их сближению и слиянию. Как следствие, в таких условиях формируются более крупные пузырьки (рис. 3.2.4, в). Рост размеров пузырей внутри капли приводит к уменьшению характерной толщины пленки жидкости. Интенсифицируются прогрев капли и соответствующие фазовые переходы. Рост размеров пузырьков и формирование новых приводит к наполнению капли паром (рис. 3.2.4, г). При превышении давления паров соответствующих значений давления, вызванного силами поверхностного натяжения жидкости и внешней среды, происходит взрывной распад капли. В целом весь процесс взрывного парообразования в соответствии со второй схемой при варьировании температуры газов от 700 К до 800 К занимал не более 10 с.

Третья схема (рис. 3.2.5) реализовывалась при температурах газов более 650 К и характеризовалась минимальными по сравнению с двумя другими длительностями.

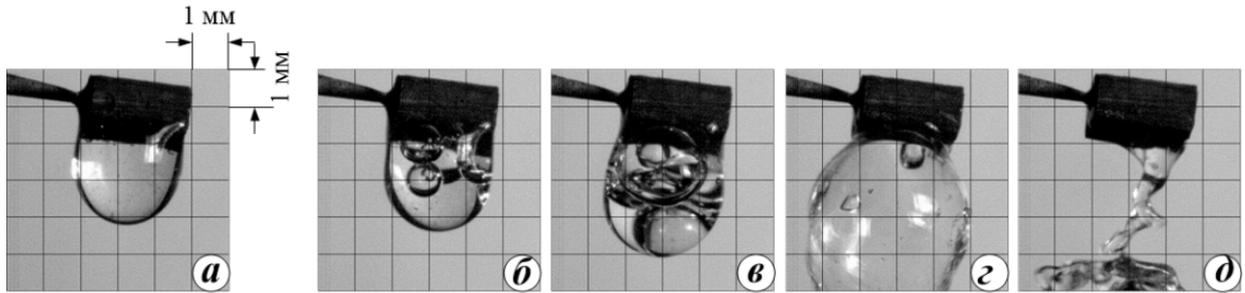


Рисунок 3.2.5. – Типичные изображения капли воды (начальный объем жидкости 15 мкл) с включением при парообразовании по третьей схеме в разные моменты времени при температуре газов T_g около 700 К:

$a - 0,852$ с, $б - 2,046$ с, $в - 2,254$ с, $г - 2,354$ с, $д - 2,524$ с

Третья схема (аналогично первым двум) включает процессы испарения воды со свободной поверхности неоднородной капли. В отличие от второй и первой схем, при реализации третьей доминирует процесс парообразования на внутренних границах раздела сред. Особенно важно отметить характерное увеличение размеров капли относительно начальных (нередко даже в несколько раз) за счет роста пузырьков (рис. 3.2.5). Такого при двух других схемах не зарегистрировано. Это обусловлено интенсивным подводом энергии к внутренним границам раздела сред через включение при его нагревании газами и через жидкость. При этом через жидкость в основном энергия проходит к границе включения и аккумулируется в тонком приповерхностном слое за счет лучистого переноса и прозрачности воды, а через включение за счет кондуктивного теплопереноса.

Только в рамках третьей схемы сформировавшиеся на границе раздела сред пузырьки интенсивно отрываются и сливаются с соседними. Именно этим можно объяснить существенное увеличение размеров капли и заполнения большей части ее объема парами жидкости. Как следствие, капли при таком динамичном изменении размеров становятся довольно неустойчивыми. К тому же, толщина пленки жидкости при резком росте размеров капли вследствие парообразования на внутренних границахкратно уменьшается. Это существенно снижает давление

жидкости по сравнению с давлением паров внутри капли. В результате, после роста размеров капли зарегистрированы ставшие типичными для рассматриваемых условий процессы ее взрывного разрушения (рис. 3.2.5).

Можно отметить, что «взрывы» капель в диапазоне изменения температур от 650 К до 800 К при указанных выше контролируемых условиях экспериментов регистрировались достаточно устойчиво. С ростом температуры газов установленный эффект проявлялся все более наглядно и отчетливо. Предельный для проведенных экспериментов уровень температуры газов (около 800 К) обусловлен тем, что переход на более калорийные топлива сопровождался образованием продуктов сгорания, часть которых создавала помехи при регистрации объектов исследования вследствие плохой или полной (сажа) непрозрачности. По этой причине расширение диапазона температур внешней по отношению к капле газовой среды было нецелесообразным. Но на основании анализа и обобщения результатов выполненных экспериментов [204–207] можно достаточно обоснованно предположить, что с ростом температуры газов, нагревающих неоднородную прозрачную каплю воды, характерные времена ее нагрева до взрывного распада будут немонотонно уменьшаться (при прочих адекватных условиях) в связи с ростом лучистого теплового потока к поверхности неоднородной капли.

Выделенные три схемы парообразования позволили обосновать, что уменьшение размеров капли за счет испарения можно проследить только в пределах первой схемы. Это обусловлено, главным образом, пузырьковым кипением во второй и третьей схемах. Формирование и рост пузырьков в любом случае приводит к некоторому «разбуханию» капли. В соответствии с третьей схемой это «разбухание» значительно, во второй схеме – умеренно, но, тем не менее, так же зарегистрировано.

Условия проведенных экспериментов [204–207] существенно отличаются от традиционного кипения жидкости на поверхности нагретого тела. В выполненных экспериментах на пузырьки, образующиеся на поверхности частицы, не действует подъемная сила, выталкивающая их к поверхности раздела «капля – горячий газ»

(сила Архимеда). В случае традиционных экспериментов (результаты приведены, например, в [208]) с нагретой поверхностью пузырьки пара отрываются от поверхности раздела сред, всплывают и лопаются или при всплытии, или при достижении внешней (свободной) поверхности капли. В проведенных опытах пузырьки пара не всплывают к свободной поверхности капли, а соединяются и заполняют каплю до ее разрушения (распада). Этот эффект иллюстрирует «недогрев» поверхности парообразования (частицы) до температур, соответствующих традиционному пониманию термина «кипение». В данном случае, скорее всего, регистрируемый процесс формирования пузырьков является кипением, но его механизм достаточно сложный и отличается от традиционных для нагретых поверхностей.

На поверхности твердого включения после взрывного распада капли остается довольно тонкий (как правило, менее 0,05 мм) слой жидкости. Его полное испарение происходит, как правило, в течение интервала времени 0,4–0,6 с. Если проанализировать результаты теоретических и экспериментальных исследований [3,6,8,30,209], то можно заметить, что капли с размерами от 150 мкм до 300 мкм полностью испаряются в высокотемпературных газовых средах в течение 1–3 с. На фрагменты таких размеров и распадались исследуемые неоднородные капли в проведенных экспериментах. Поэтому можно заключить, что характерные времена их полного испарения существенно превышают времена испарения оставшейся на включении жидкости (ею можно пренебречь при оценке общего времени испарения воды).

Выполненные серии экспериментов показали, что условия взрывного дробления реализуются в течение нескольких секунд с момента нагрева. Если учесть последующее испарение группы сформировавшихся мелких капель, то можно сказать, что общее время полного испарения жидкости в составе неоднородной капли с диаметром последней 3–4 мм при температурах внешней газовой среды не менее 650 К не превышает 5 с. Для однородных капель с такими размерами в идентичных условиях теплового воздействия установлены

[3,6,8,30,209] существенно большие времена полного испарения (как правило, не менее 20 с).

При анализе особенностей взрывного дробления неоднородных капель с различным расположением включения установлено, что характерные времена существования τ_h для условий, представленных на рис. 3.2.1, довольно близки. Этот неочевидный результат можно объяснить отличающимися условиями теплообмена включения и жидкости. Близкие времена установлены для капель в форме «парашюта» (с массой жидкости до 10 мг). Это обусловлено тем, что во втором случае вследствие выступа части одной грани включения с поверхности раздела «вода – высокотемпературные газы» оно прогревается быстрее, чем при полном погружении. Теплота к границе раздела сред внутри капли подводится от внешней газовой среды через жидкость и включение. Эти результаты позволяют сделать вывод о том, что условия взрывного дробления неоднородной капли могут реализовываться при разном расположении включения, но при довольно близких (относительно малых) временах.

Установленные особенности реализации трех схем парообразования неоднородных капель воды представляют интерес для двухфазных и гетерогенных систем (например, [1, 210, 211]). Анализ результатов [3,4,8,30] и настоящей работы показал, что при кратно меньших по сравнению с каплей размерах включений вероятность взрывного разрушения капель минимальна. При соразмерных (не менее 50 % от объема капли) включениях этот эффект наиболее вероятен в условиях высоких (более 650 К) температур. Как следствие, в зависимости от требуемого эффекта можно рекомендовать соответствующие размеры включений и неоднородных капель.

Важно отметить, что в данном исследовании реализовывался механизм фазовых превращений [204–207], при котором материал (графит) включения обладает большей теплопроводностью по сравнению с водой [176–180]. В таком случае через включение проходит и аккумулируется на внутренней границе раздела сред «жидкость – твердое включение» больше энергии. Это может объясняться тем, что суммарная энергия, аккумулирующаяся на границе раздела

сред, состоит из энергии, подведенной за счет теплопроводности, и энергии излучения, реализуемой за счет непрозрачности включения. Тогда как в случае большей теплопроводности у жидкости интенсификация фазовых превращений на внутренних границах раздела сред возможна только за счет аккумуляции лучистого теплового потока. Таким образом, высокая теплопроводность материала включения по сравнению с водой способствует увеличению вероятности взрывного парообразования, распада неоднородной капли жидкости.

На рис. 3.2.6 представлены результаты экспериментов по измерению температур поверхностей слоя воды неоднородной капли (T_{wd}) и включения (граница раздела «включение – слой воды») (T_{inc}). Кроме того, приводятся данные по измерению температуры внутри включения (на глубине 0,5 мм) (T_{ins}).

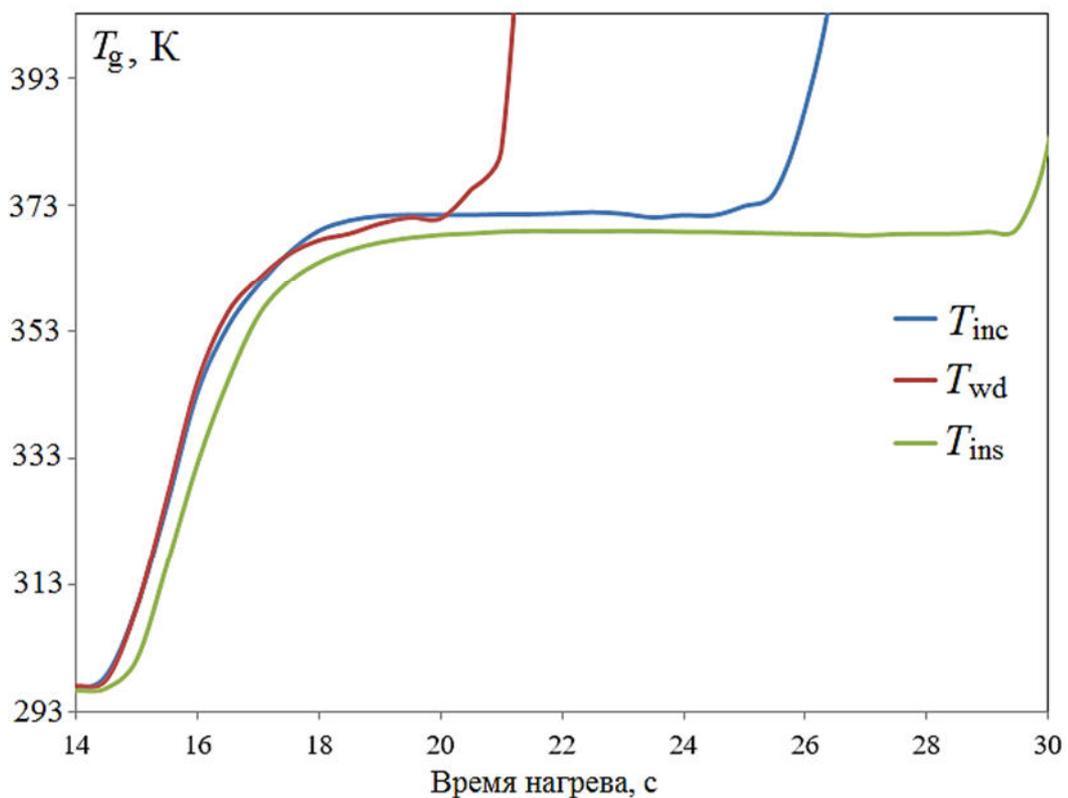


Рисунок 3.2.6. – Тренды температур T_{wd} , T_{inc} , T_{ins} для экспериментов по прогреву элементов неоднородной капли

Комментарий: представленные на рис. 3.2.6 кривые получены в результате усреднения экспериментальных данных (проводилось не менее 10 опытов). Максимальное среднеквадратичное отклонение серии измерений T_{wd} , T_{inc} , T_{ins} не превышало 2 К.

Из анализа представленных трендов температур (рис. 3.2.6) можно заключить, что при условии полного обволакивания твердого включения (см. п. 2.3) прогрев последнего осуществляется через тонкую пленку воды (поскольку основная масса жидкости под действием силы тяжести скапливается на нижних гранях, тонкая пленка покрывает большую часть поверхности включения). Важно также отметить тот факт, что в данных опытах (рис. 3.2.6) тонкая пленка воды существовала в течение 10 с (см. тренд температуры T_{inc}). После этого наблюдался резкий скачок температуры, характеризовавший начало непосредственного взаимодействия поверхности включения с высокотемпературной средой. Увеличение температуры T_{wd} выше температуры кипения воды означало, что спай термопары «освобождался» от жидкости вследствие ее испарения (т.е. уменьшения толщины пленки жидкости). Медленнее всего температура росла внутри включения T_{ins} (на глубине 0,5 мм). Эти результаты по существу доказывают, что прогрев включения неоднородной капли выполняется посредством прохождения теплового потока через пленку жидкости. Кроме того, они обосновывают несущественность влияния керамического стержня на характеристики нагрева неоднородной капли жидкости. Поскольку механическое закрепление включения выполнялось в отверстии глубиной около 0,3 мм, то в случае интенсивного стока тепла через заостренный наконечник стержня температура T_{ins} (термопара закреплена в отверстии, отличном от того, в котором закреплена стержень) увеличивалась бы гораздо быстрее.

3.3. Анализ временных характеристик фазовых превращений неоднородных капель суспензий при нагреве в высокотемпературной газовой среде

По видеограммам проведенных опытов выполнен анализ временных характеристик фазовых превращений неоднородных капель суспензий при нагреве в высокотемпературной газовой среде [203,204,206,212,213].

Установлены характерные времена нагрева неоднородных капель до условий взрывного распада и полного испарения с сохранением целостности.

На рис. 3.3.1 приведены зависимости времен полного испарения капель воды (без взрывного распада) с единичным включением от характерного размера последнего. Для детального изучения особенностей влияния размеров включения на условия полного испарения гетерогенной капли с сохранением ее целостности проводились серии экспериментов, в которых температура газов изменялась от 350 К до 850 К. Для обеспечения такой температуры варьировались параметры работы горелки и нагнетательной системы стенда (рис. 2.2.1).

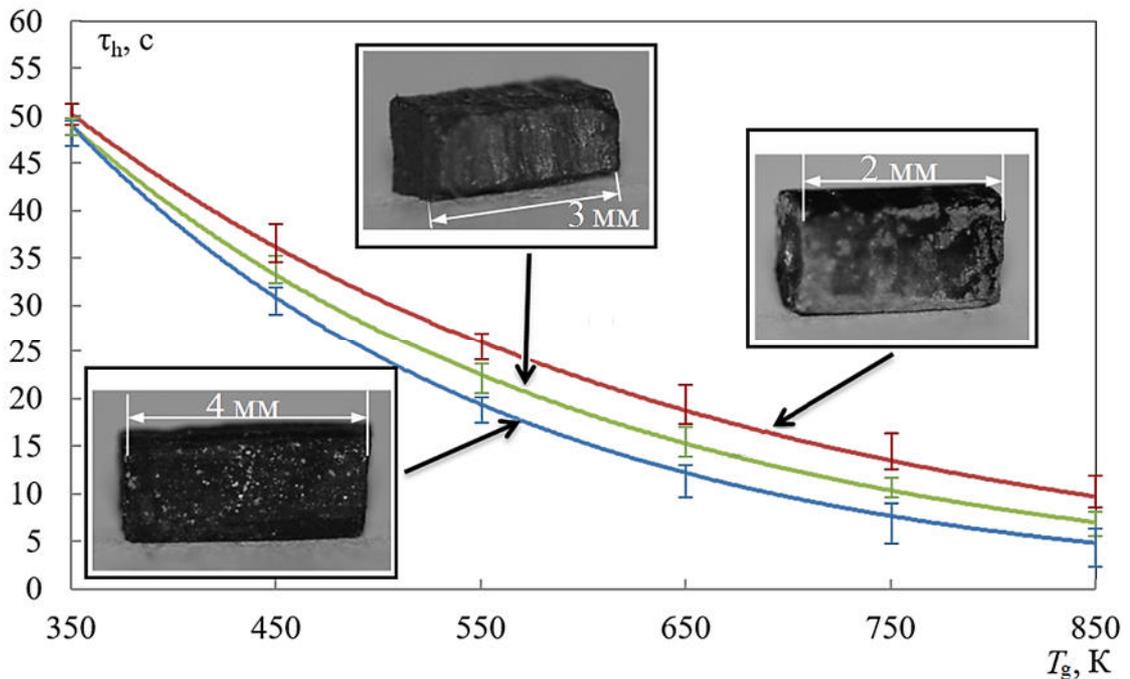


Рисунок 3.3.1. – Влияние характерного размера d_p единичного включения (на примере параллелепипеда) на времена полного испарения τ_h капли воды (объемом 10 мкл) с ее внешней поверхности в газовой среде с температурой T_g от 350 К до 850 К

В случае одного соразмерного (не менее 50 % от объема капли) включения характерные времена прогрева жидкости и ее испарения значительно меньше, чем при группе существенно меньших по размерам включений (после обработки данных опытов [3, 4, 30] в связи с ограничениями длины высокотемпературного

канала вычислены характерные значения ΔR и спрогнозированы времена полного испарения каплей). Это обусловлено тем, что при соразмерном включении условия прогрева капли довольно хорошо коррелируют с ее испарением на нагретой поверхности или подложке (массивном нагретом теле). В зависимости от теплофизических свойств материала включения могут быть интенсифицированы фазовые превращения на границе «жидкость – включение» при подводе энергии внешней газовой среды или через включение, или через жидкость. При повышении температуры газов влияние размеров включения на времена полного испарения усиливается (рис. 3.3.1). Это обусловлено ростом аккумулируемой у поверхности включения энергии.

На рис. 3.3.2 представлены характерные зависимости времен полного испарения жидкости (при варьировании ее начальной массы) с поверхности единичного включения при условии отсутствия взрывного распада (с сохранением целостности).

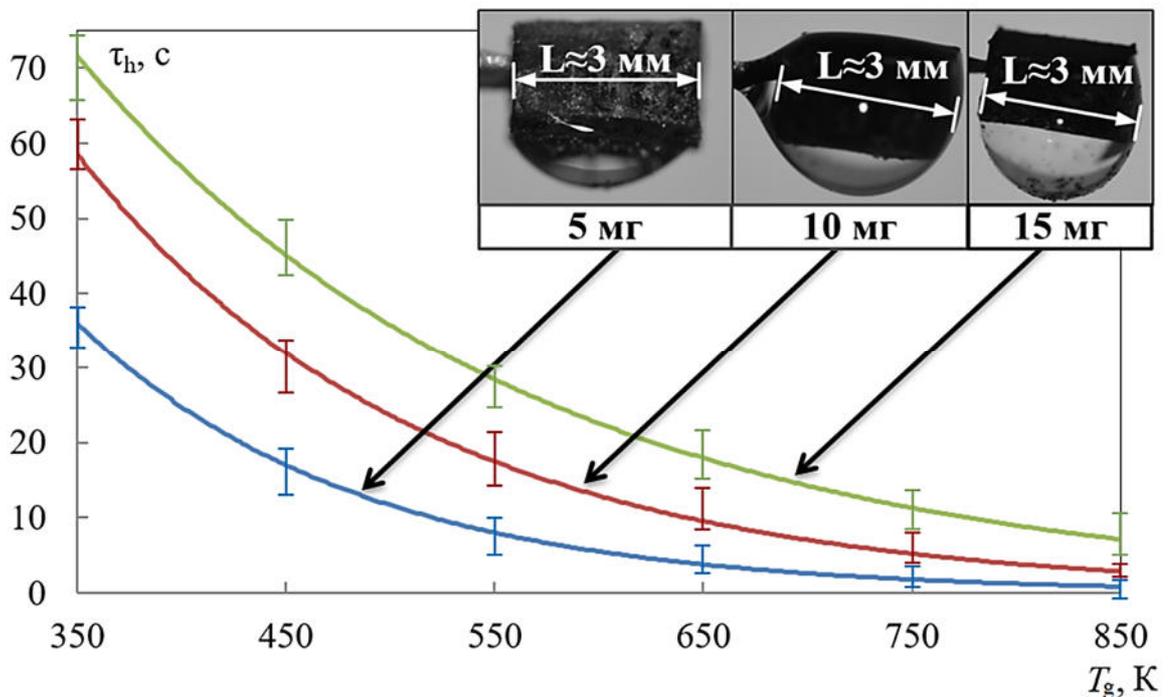


Рисунок 3.3.2. – Влияние температуры газовой среды T_g на времена полного испарения τ_h жидкости с поверхности единичного включения в форме параллелепипеда размером $d_p=3$ мм при разных исходных массах воды

Можно отметить существенную нелинейность приведенных на рис. 3.3.1 и 3.3.2 зависимостей, которая обусловлена нелинейной зависимостью скорости испарения жидкости от температуры [20] (особенно в условиях интенсивного теплообмена с внешней газовой средой [6]). Как следствие, рост начальных размеров капель или массы жидкости эту нелинейность только усиливает (рис. 3.3.1 и 3.3.2).

На рис. 3.3.3 представлены установленные зависимости характерных времен взрывного распада неоднородных капель от температуры газовой среды T_g для разных форм включения.

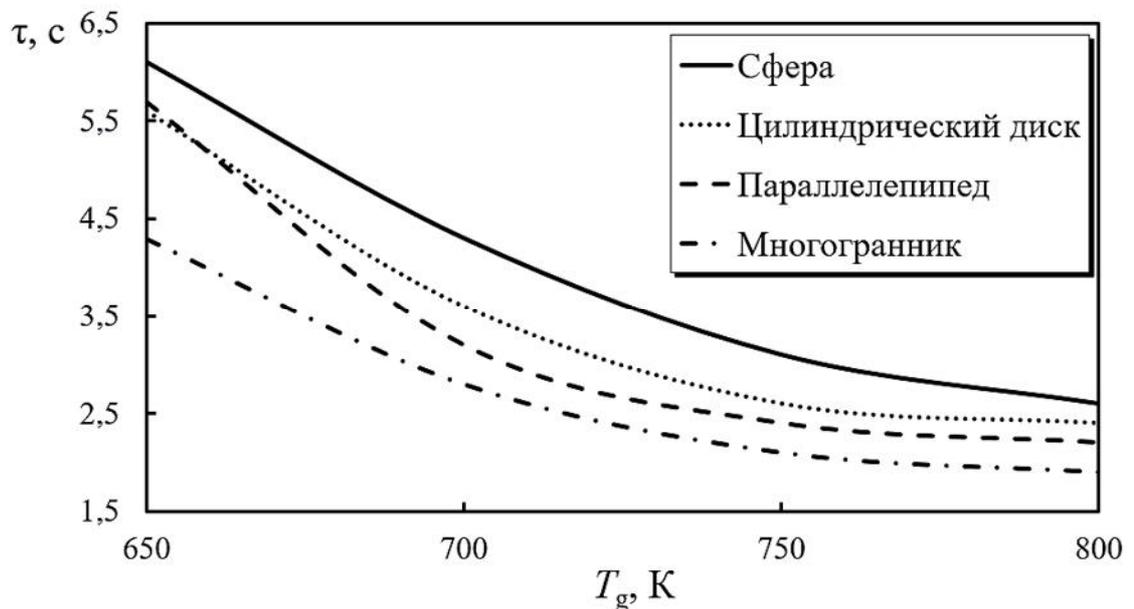


Рисунок 3.3.3. – Зависимости времен взрывного парообразования τ неоднородных капель воды от температуры газов T_g при разных формах включения (характерный размер $d_p=2$ мм)

Комментарий: размах значений времен взрывного парообразования τ капель, содержащих включения различных форм, составляет не более 0,25 с.

Нелинейность приведенных на рис. 3.3.3 зависимостей хорошо соответствует зависимостям на рис. 3.3.1 и 3.3.2. Однако, следует выделить кратно меньшие времена взрывного распада по сравнению с временами полного испарения неоднородных капель с сохранением их целостности. Этот эффект является одним из характерных условий реализации взрывного распада капель. Также можно выделить второе установленное условие – предельно высокие

температуры газов. При температурах газовой среды более 650 К условия взрывного распада реализовывались довольно стабильно (в условиях нагрева в потоке продуктов сгорания топлив). При этом с ростом температуры относительно 650 К устойчивость рассматриваемых взрывных распадов прослеживалась все более отчетливо.

На рис. 3.3.3 видно, что характерные времена взрывного распада капли изменяются при увеличении числа граней включения, контактирующих и с жидкостью, и с внешней газовой средой (типичные условия, соответствующие рис. 2.3.6). Для многогранников неправильной формы характерные времена взрывного разрушения гетерогенных капель минимальны по сравнению с другими формами (рис. 3.3.3). Следует отметить, что в отдельных экспериментах для включений в форме конуса или параллелепипеда были зарегистрированы времена взрывного разрушения меньше, чем для многогранника. Как следствие, можно сделать вывод о том, что при подводе энергии к границе раздела через включение и жидкость времена «взрывов» снижаются по сравнению с условиями, при которых включение полностью обволакивается жидкостью или лишь малая его часть выступает за поверхность капли (например, в опытах со сферическими частицами).

Установленные особенности иллюстрируют возможность усиления эффекта взрывного парообразования за счет повышения числа граней включения. При этом из анализа выделенных стадий исследуемого процесса можно сделать вывод о том, что на условия взрывного парообразования будут существенно влиять оптические и теплофизические свойства жидкости и, особенно, материала включения. В частности, при теплопроводности инородной частицы выше, чем жидкости времена взрывного распада могут быть снижены при большем выступлении включения за поверхность капли. Вследствие этого, включения в форме многогранников и других соответствующих конфигураций могут существенно интенсифицировать процесс парообразования. В случае большей теплопроводности жидкости по сравнению с включением целесообразно использовать сферические частицы (характеризуются меньшей площадью

контакта с внешней газовой средой), так как подведенная через воду энергия будет аккумулироваться в малом приповерхностном слое у внутренних границ раздела сред и практически не расходоваться на прогрев включения.

В проведенных экспериментах при варьировании температуры внешней газовой среды и начальных характерных толщин пленки воды установлены условия, при которых возможна реализация процесса испарения неоднородной капли без «взрыва» и с «взрывом» (интенсивным дроблением). Так, в частности, выявлено, что взрывное парообразование возможно при температурах продуктов сгорания более 650 К (таблица 3.3.1). При меньших температурах независимо от размера капли зарегистрировано только интенсивное испарение воды с ее свободной поверхности.

Таблица 3.3.1. – Времена существования неоднородных капель воды в высокотемпературной газовой среде при разных схемах парообразования (1 – без «взрыва», 2 – с «взрывом»)

Температура газов / Средний размер капли	600 К	650 К	700 К	750 К	800 К
3 мм	Схема 1 $\tau_h=12,9$ с	Схема 2 $\tau_h=6,9$ с	Схема 2 $\tau_h=3,7$ с	Схема 2 $\tau_h=2,6$ с	Схема 2 $\tau_h=2,2$ с
4 мм	Схема 1 $\tau_h=22,3$ с	Схема 2 $\tau_h=8,1$ с	Схема 2 $\tau_h=5,6$ с	Схема 2 $\tau_h=4,8$ с	Схема 2 $\tau_h=3,1$ с

Можно отметить, что «взрывы» капель в диапазоне изменения температур от 650 К до 800 К (таблица 3.3.1) при указанных выше начальных объемах воды и контролируемых условиях экспериментов регистрировались достаточно устойчиво. Однако, результаты дополнительных экспериментов констатируют (рис. 3.3.4 и 3.3.5), что существует диапазон температур газовой среды (далее, переходный диапазон), при котором времена выполнения фазовых превращений жидкости в составе неоднородной капли характеризуются реализацией или

механизма испарения со свободной поверхности неоднородной капли, или интенсивного парообразования на внутренней границе раздела сред с взрывным разрушением.

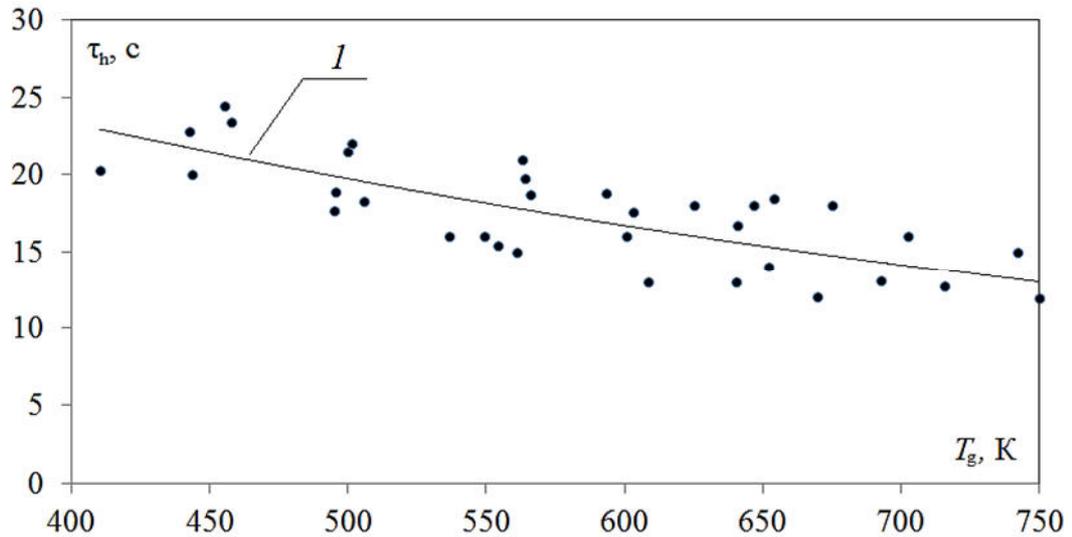


Рисунок 3.3.4. – Времена существования (полного испарения) τ_h неоднородных капель жидкости (начальный объем воды 15 мкл) от температуры газовой среды T_g при испарении с внешней поверхности капли: I – аппроксимация экспериментальных значений

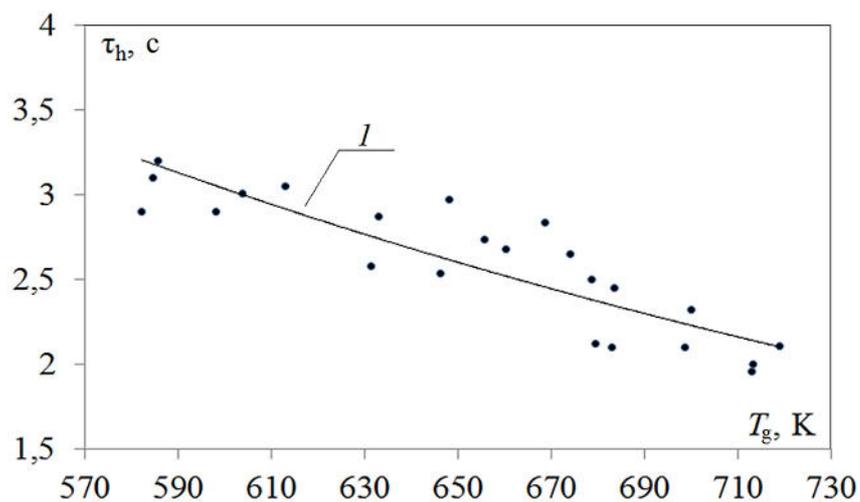


Рисунок 3.3.5. – Времена существования τ_h неоднородных капель жидкости (начальный объем воды 15 мкл) от температуры газовой среды T_g при взрывном парообразовании на внутренних границах раздела сред: I – аппроксимация экспериментальных значений

Как видно из рис. 3.3.4 и 3.3.5 в переходном диапазоне температур газовой среды от 590 К до 750 К реализация фазовых превращений имеет достаточно вероятностный характер: механизм интенсивного парообразования жидкости с ее взрывным разрушением реализуется довольно нестабильно, и нередко выполняется только лишь процесс испарения со свободной поверхности капель.

3.4. Влияние искусственных неровностей поверхностей включений в каплях воды на интенсификацию теплообмена

Такие элементы искусственных неровностей как шероховатости и поры выполнены [214] на твердых включениях для увеличения поверхности теплообмена со слоем обволакивающей их жидкости. Проведен [214] сравнительный анализ времен существования τ_h неоднородных капель, содержащих твердые включения с гладкой и модифицированной (с искусственными неровностями) поверхностями.

Изготовлены твердые включения из графита в форме куба (со стороной 2 мм). На этих включениях выполнены следующие типы искусственных неровностей:

- (1) Шероховатости (линии на каждой стороне включения глубиной 0,15 мм; форма профиля линий – цилиндрическая; случайное распределение линий по поверхности с их взаимным пересечением; количество линий в 1 мм^2 – не менее 12).
- (2) Поры в форме отверстий (глубиной до 0,75 мм, диаметром 1 мм; количество на одной стороне включения – 1).

С использованием модели [207] и экспериментальных результатов диссертационных исследований установлено, что добавление твердых единичных включений в капли воды позволяет в значительной мере (до 60 % – в случае добавления включений с гладкой поверхностью, до 70 % – с искусственными

неровностями) снизить времена их существования (полного испарения) τ_h в высокотемпературной газовой среде (рис. 3.4.1 и 3.4.2).

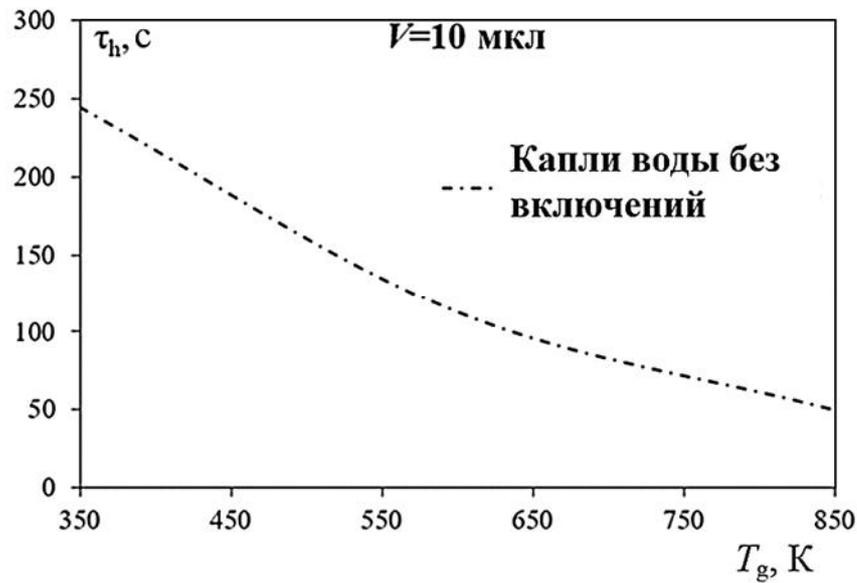


Рисунок 3.4.1. – Времена существования τ_h капель воды объемом 10 мкл без примесей при нагреве (моделирование [207])

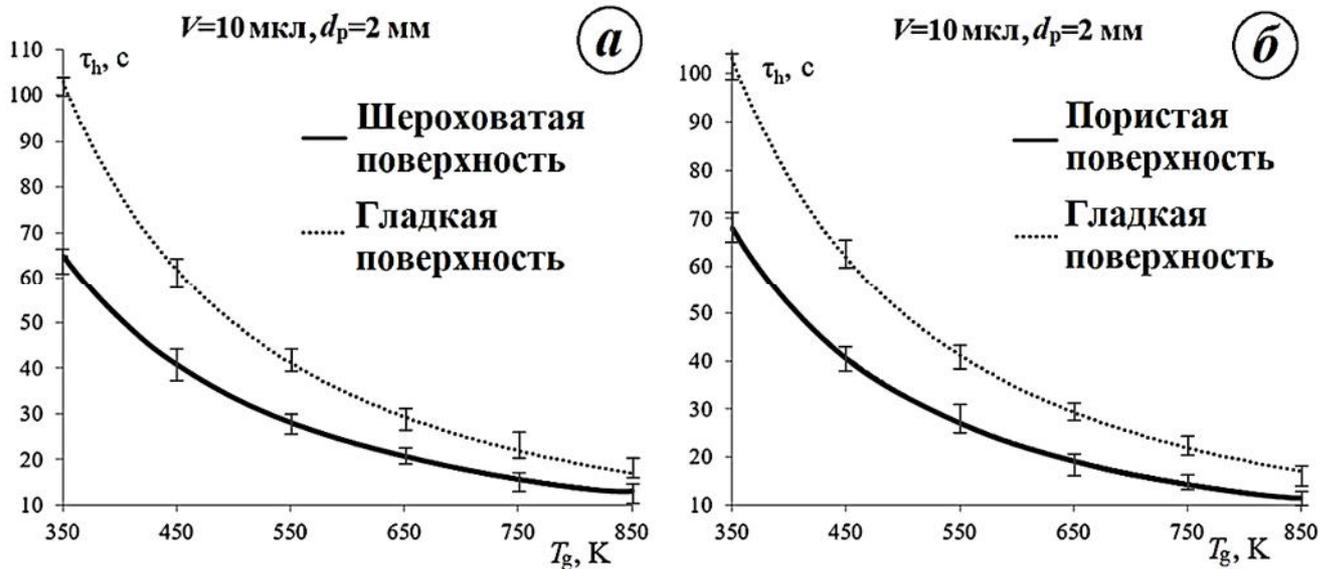


Рисунок 3.4.2. – Времена существования τ_h капель воды объемом 10 мкл с единичными твердыми включениями ($d_p=2$ мм) с гладкой поверхностью и с искусственными неровностями на поверхности

На рис. 3.4.2 представлены результаты исследования, которые отражают влияние наличия искусственных неровностей поверхности твердых включений на времена существования (полного испарения) τ_h гетерогенных капель.

Установлено (рис. 3.4.2), что благодаря наличию искусственных неровностей на поверхности твердых включений времена существования τ_h неоднородных капель значительно (до 40 %) снижаются.

Отметим, что влияние наличия неглубоких, но многочисленных шероховатостей (рис. 3.4.2, *a*), а также единичных пор (рис. 3.4.2, *б*) на интенсификацию теплообмена сопоставимо.

В исследованиях [203] довольно подробно описан механизм фазовых превращений в рассматриваемых неоднородных каплях при нагреве в высокотемпературной газовой среде. Установлено [203], что добавление твердого включения существенно интенсифицирует процесс теплообмена в системе «высокотемпературные газы – неоднородная капля жидкости». Такой эффект, в основном, обусловлен значительным оттоком тепловой энергии от включения в слой воды. В уравнении теплопередачи $Q=kF\Delta T$ (k – коэффициент теплопередачи, Вт/м²К, F – площадь поверхности теплообмена, м², ΔT – движущая сила теплопередачи, К) тепловой поток Q (от включения к слою воды) при прочих равных условиях увеличивается только за счет роста площади поверхности теплообмена F . В свою очередь, интенсификация оттока тепловой энергии в слой воды количественно отражается на временах существования неоднородных капель жидкости (рис. 3.4.2).

Необходимо отметить, что в проведенных экспериментах регистрировалось в основном испарение жидкости с поверхности неоднородной капли. На внутренних границах раздела сред зарождение пузырьков пара не зафиксировано. Из вышесказанного следует, что создание искусственных неровностей на твердых включениях, т.е. увеличение площади поверхности теплообмена внутри неоднородной капли, способствует значительному увеличению скорости испарения жидкости при нагреве. Однако, примененный подход не обеспечивает

необходимых условий для интенсивного парообразования на внутренних границах раздела сред.

Установленная особенность процесса испарения неоднородных капель жидкости может служить теоретической основой для разработки рекомендаций по повышению эффективности термической очистки сточных вод.

3.5. Влияние добавления примесей в неоднородные капли на временные характеристики процесса испарения

Эксперименты [215, 216] показали, что добавление мелких графитовых включений в неоднородную каплю жидкости может уменьшить времена существования τ_h последних на 50 % по сравнению с τ_h для капель воды, содержащих только одно крупное графитовое включение. Сформулирована гипотеза [215, 216] о формировании буферной паровой прослойки в приповерхностном слое неоднородных капель жидкости (с относительно большими начальными объемами воды) с добавлением мелких графитовых включений при температуре газовой среды 850 К. Установлены [215, 216] масштабы влияния такого парового слоя на τ_h для неоднородных капель жидкости и замедление процессов испарения в целом.

В целях достижения возможной интенсификации процессов теплообмена в системе «капля жидкости – графитовое включение» мелкие графитовые частицы были добавлены в неоднородные капли воды. Капли полученных водных суспензий (рис. 2.3.3) нагревались в высокотемпературной газовой среде.

На рис. 3.5.1 приведены диаграммы, позволяющие сравнить времена существования (полного испарения) неоднородных капель жидкости τ_h объемом 5, 10 и 15 мкл с добавлением (No. 3 и 4) и без добавления (No. 5) мелких графитовых частиц при низких (350 К), средних (600 К) и высоких (850 К) температурах газовой среды.

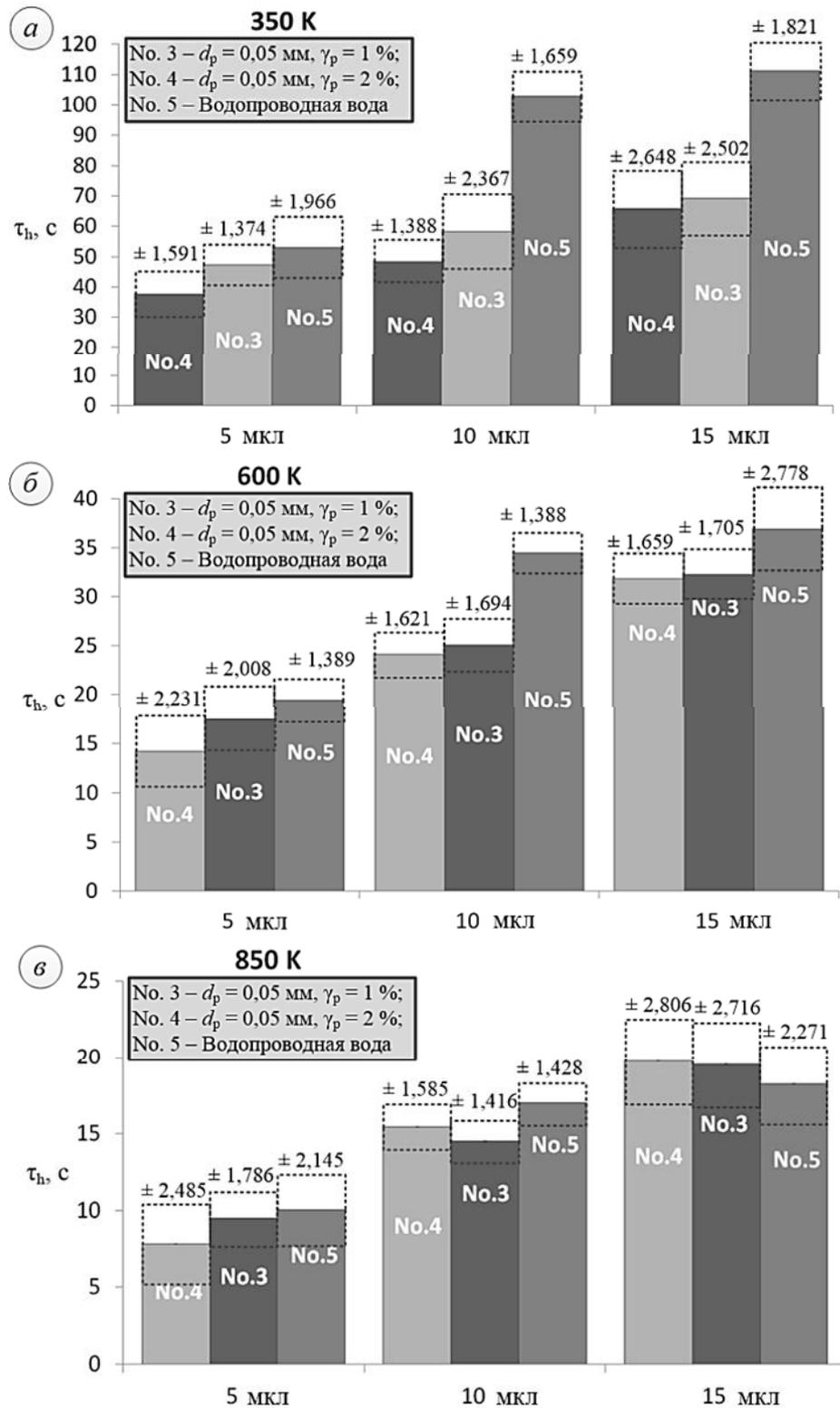


Рисунок 3.5.1. – Сравнение времен существования (полного испарения) τ_h неоднородных капель жидкости объемом 5, 10 и 15 мкл с добавлением мелких графитовых частиц (No. 3 и 4) и без добавления (No. 5):
 а – при $T_g=350$ К; б – при $T_g=600$ К; в – при $T_g=850$ К

Необходимо отметить, что при размере 0,05 мм мелкие графитовые включения обладают достаточно низкой плотностью и, соответственно, обладают удовлетворительной плавучестью в воде. Это позволяет графитовой суспензии долгое время оставаться во взвешенном состоянии без периодического перемешивания. Более того, водная графитовая суспензия No. 4 с массовой концентрацией мелких графитовых частиц 2 % практически не прозрачна, чего нельзя сказать про суспензию No. 3 с концентрацией 1 %.

Анализ данных гистограммы на рис. 3.5.1, *a* показывает, что добавление мелких графитовых частиц в объем воды снижает времена существования τ_h неоднородных капель жидкости при нагреве в условиях относительно низких температур (350 К). Кроме того, заметна существенная разница во временах полного испарения неоднородных капель жидкости объемом 10 и 15 мкл с добавлением и без добавления мелких графитовых частиц. В частности, процесс испарения капли суспензии объемом 10 мкл с концентрацией мелких включений графита 2 % реализуется в два раза быстрее, чем аналогичный процесс для капли воды с одним крупным графитовым включением при идентичных условиях проведения эксперимента (рис. 3.5.1, *a*). При сравнении времен полного испарения τ_h капель жидкости объемом 15 мкл наблюдается несущественно меньшая разница между значениями (рис. 3.5.1, *a*). Также об интенсификации процесса испарения можно судить по сопоставлению времен существования капель суспензий при увеличении массовой концентрации мелких включений в два раза. Анализ экспериментальных данных, представленных на рис. 3.5.1, *a*, позволяет заключить, что увеличение массовой концентрации мелких графитовых включений в объеме воды в два раза способствует снижению времен полного испарения капель суспензий τ_h на 5–20 %.

В области средних температур (600 К; рис. 3.5.1, *b*), как и следовало ожидать, общее время существования неоднородных капель жидкости для всех трех рассматриваемых объемов существенно снижается. Тенденция уменьшения времени полного испарения капель воды τ_h за счет добавления мелких

графитовых включений сохраняется. В данном случае (рис. 3.5.1, б) зарегистрировано снижение значений на 14–30 % в зависимости от объема капли. Кроме того, для среднего (10 мкл) и большого (15 мкл) объемов капель увеличение массовой концентрации мелких включений в два раза способствует снижению времен существования τ_h несущественно (на 1,5–4 %).

Можно отметить незначительную разницу (менее 15 %) во временах испарения неоднородных капель жидкости объемом 15 мкл с добавлением и без добавления мелких графитовых включений при температуре газа 600 К (рис. 3.5.1, б). Выявленная тенденция усиливается при высокой температуре (850 К, рис. 3.5.1, в). Более того, подобное явление наблюдается и для капель жидкости объемом 10 мкл. Таким образом, из анализа представленных на рис. 3.5.1, в результатов экспериментального исследования испарения неоднородных капель жидкостей следует, что при больших объемах жидкости (15 мкл) интенсификация испарения не только не регистрируется, а, наоборот, времена существования капель воды τ_h с добавлением мелких графитовых частиц растут. К тому же, капля суспензии (объемом 15 мкл) с концентрацией графитовых включений 2 % имеет наибольшее время полного испарения τ_h . Общий прирост по времени по сравнению с неоднородной каплей, не содержащей мелкие графитовые включения, составляет около 8 %.

Для объяснения изменений в представленных на рис. 3.5.1, в распределениях времен существования неоднородных капель жидкости объемом 10 и 15 мкл сформулировано предположение о формировании буферного теплоизоляционного парового слоя на границе раздела сред «капля суспензии – газовая среда» вследствие активации процесса парообразования на внутренних границах «мелкие графитовые частицы – вода» при высоких температурах нагрева (850 К). Поскольку водяной пар обладает низкой (в несколько раз) теплопроводностью по сравнению с водой в жидком фазовом состоянии, прогрев неоднородной капли занимает больше времени, вследствие этого растет и ее время существования τ_h .

Анализ влияния концентрации и размеров включений в составе суспензии на времена существования τ_h капель позволяет сделать предположение о существенной роли лучистого (радиационного) теплообмена на поверхности капли в высокотемпературной газовой среде. Пары воды являются одним из основных генераторов излучения в системе «продукты сгорания – пары воды – капля». Капли аккумулируют теплоту за счет теплоемкости до температур интенсивного испарения. За короткий интервал времени с начала нагрева формируется температурное поле капли, соответствующее парообразованию с большой скоростью и созданию слоя пара вблизи поверхности фазовых превращений. Этот слой играет роль изолятора (буфера) и препятствует интенсификации прогрева капли при высоких температурах газов. Интенсивный вдув паров в пристенную область капли блокирует в некоторой степени воздействие высокой температуры газов на каплю. Поэтому в экспериментах регистрировались тенденции снижения влияния роста концентрации или размеров включений при достижении максимальных значений. Важнейшим направлением дальнейшего развития сформулированного экспериментального подхода является изучение оптических свойств материалов включений и их влияния на условия и характеристики прогрева жидкости.

Необходимо отметить, что в рассматриваемых условиях проведения экспериментов (см. Главу 2) использование дистиллированной воды вместо водопроводной питьевой в составе неоднородных капель жидкости влияло незначительно на интегральные характеристики фазовых превращений. Установлено, что существующие отличия в значительной степени укладываются в рамки погрешностей измерений, характерных данному исследованию.

На рис. 3.5.2 и 3.5.3 представлены результаты исследований влияния добавления поверхностно-активного вещества (ПАВ; характеристики смачивающего агента – см. таблицу 2.3.4) и соли (NaCl) на времена существования (полного испарения) τ_h неоднородных капель жидкости.

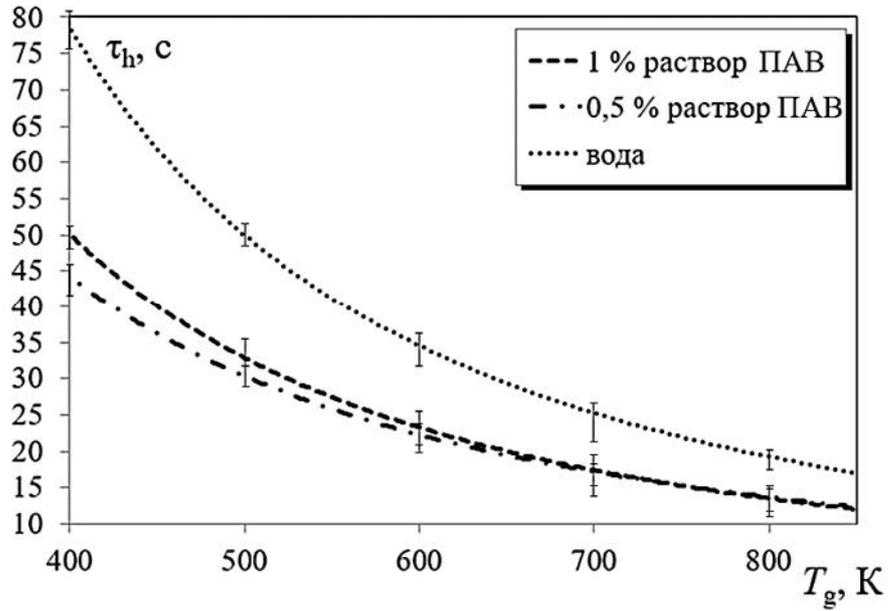


Рисунок 3.5.2. – Времена существования (полного испарения) τ_h каплеь воды и растворов ПАВ объемом 10 мкл с внутренним единичным включением размером $d_p=2$ мм

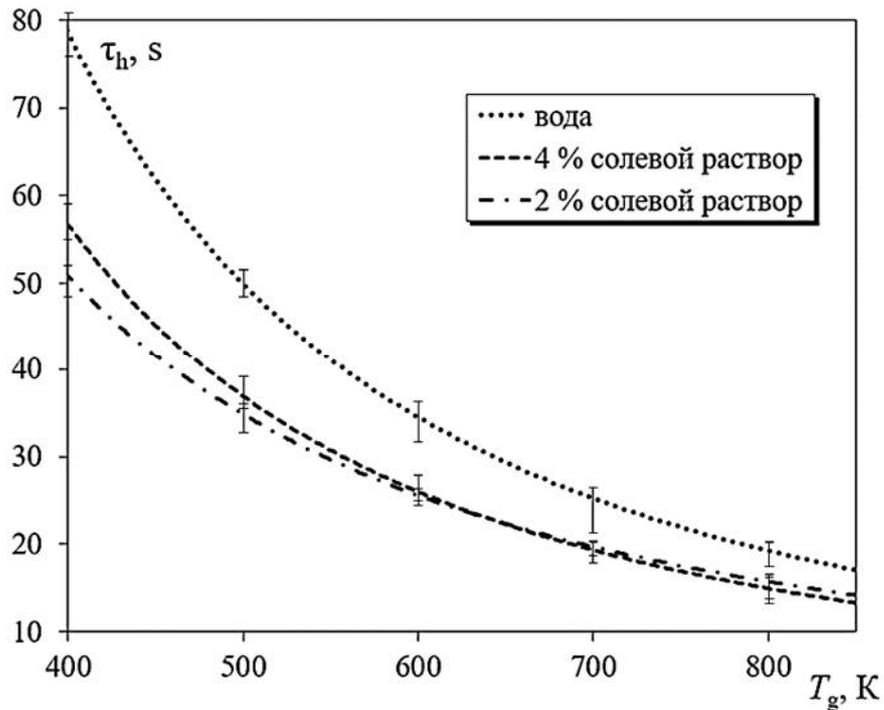


Рисунок 3.5.3. – Времена существования (полного испарения) τ_h каплеь воды и солевых растворов объемом 10 мкл с внутренним единичным включением размером $d_p=2$ мм

В обоих случаях (рис. 3.5.2 и 3.5.3) зарегистрировано существенное (до 45 % в случае растворов ПАВ и до 35 % в случае солевых растворов) снижение τ_h неоднородных капель. Можно отметить довольно незначительные отличия в τ_h растворов ПАВ при росте массовой концентрации смачивающего агента и соли. Более того, при температурах нагрева T_g более 600 К отличия τ_h неоднородных капель при изменении концентраций добавок становятся пренебрежимо малыми (при сравнении с величинами размаха экспериментальных точек). При этом с ростом T_g заметно уменьшаются и различия между τ_h для капель воды и растворов. Интересным с практической точки зрения является тот факт, что увеличение концентрации добавок в воду в обоих случаях (рис. 3.5.2 и 3.5.3) не приводит к усилению тенденции снижения τ_h . Полученный результат позволяет утверждать, что применение растворов соли или ПАВ в составе неоднородных капель способствует интенсификации испарения жидкости при нагреве в достаточно широком диапазоне температур. Определение предельных концентраций рассматриваемых добавок, после превышения которых времена τ_h существенно не изменяются, является целесообразным направлением развития полученных данных. Следует отметить, что при интенсивном парообразовании жидкости на внутренней границе раздела сред «включение – раствор ПАВ» при температуре нагрева T_g более 650 К (формирование газовой среды за счет сжигания топлив) реализовывался механизм взрывного дробления.

3.6. Распад существенно неоднородных капель воды в высокотемпературной газовой среде. Повышение эффективности использования воды за счет взрывного дробления капель суспензий

Исследованы [217] процессы дробления капель с характерными размерами одиночных графитовых включений $2 \times 2 \times 1$ мм, $2 \times 2 \times 2$ мм, $2 \times 2 \times 3$ мм и объёмом обволакивающей включение жидкости 5–15 мкл. По результатам проведённых исследований установлены масштабы увеличения суммарной площади испарения вследствие распада слоя жидкости на мелкие фрагменты, а также зависимость

этой площади от начальных характеристик гетерогенной капли (соотношения начального объёма плёнки жидкости и объёма твёрдой частицы). Кроме того, установлено, что применение неоднородных капельных потоков воды способствует более существенному снижению температуры в зоне горения (это, в свою очередь, приводило к тушению очагов возгорания за меньшие времена и при использовании меньших объемов воды). Выполнен сравнительный анализ количественных характеристик процессов дробления неоднородных (с единичным твердым включением) капель воды с добавлением частиц порошка графита и без последних.

На предварительной стадии исследования определены минимальные температуры нагрева T_g (эксперименты проведены в муфельной печи), при которых интенсивное парообразование капель воды объемом 5, 10 и 15 мкл с твердыми включениями размером $2 \times 2 \times 2$ мм реализуется с взрывным разрушением (для размеров включений $2 \times 2 \times 1$ мм и $2 \times 2 \times 3$ мм минимальные T_g для реализации условий «взрыва» отличались несущественно). На рис. 3.6.1 представлено схематичное изображение диапазона рабочих температур с указанием температур начала интенсивного парообразования гетерогенных капель с их взрывным дроблением. T_{ex5} , T_{ex10} и T_{ex15} – это температуры начала интенсивного парообразования гетерогенных капель с начальным объемом жидкости 5, 10 и 15 мкл, соответственно. Необходимо отметить, что для указанных объемов воды эти температуры являются достаточно близкими.



Рисунок 3.6.1. – Температуры начала интенсивного парообразования T_{ex5} , T_{ex10} , T_{ex15} гетерогенных капле с их взрывным разрушением

При проведении экспериментов (нагрев неоднородных капле выполнялся в муфельной печи) установлены два режима интенсивного парообразования неоднородной капли с взрывным дроблением слоя жидкости. Разрушение капле в первом режиме сопровождалось образованием большого количества мелких капле жидкости. Второй режим распада характеризовался отделением одного крупного фрагмента жидкости и группы мелких капле. Необходимо отметить, что второй режим реализовывался в условиях неравномерного обволакивания твёрдого включения жидкостью (при начальном объеме капли воды 10 или 15 мкл большой объем жидкости скапливался в нижней части включения).

На рис. 3.6.2 представлены иллюстрации основных стадий взрывного дробления слоя жидкости неоднородной капли вследствие интенсивного парообразования, характерные второму режиму. Видно (рис. 3.6.2), что основная масса воды сосредоточена в области нижней грани частицы графита. На первой стадии нагрева формируются мелкие паровые пузырьки на границе раздела «твёрдая частица – жидкость». Затем мелкие пузырьки объединяются в один крупный, который увеличивается в объёме до тех пор, пока силы давления пара

внутри не превысят силы поверхностного натяжения плёнки пузыря. Разрыв парового пузыря сопровождается отделением относительно крупного фрагмента жидкости и нескольких более мелких капель (рис. 3.6.2, *д*). При этом на нижней грани твёрдого включения остаётся часть объёма жидкости, которая затем также образует крупный паровой пузырь и разрушается с формированием одного крупного и нескольких более мелких фрагментов (рис. 3.6.2, *е–и*).

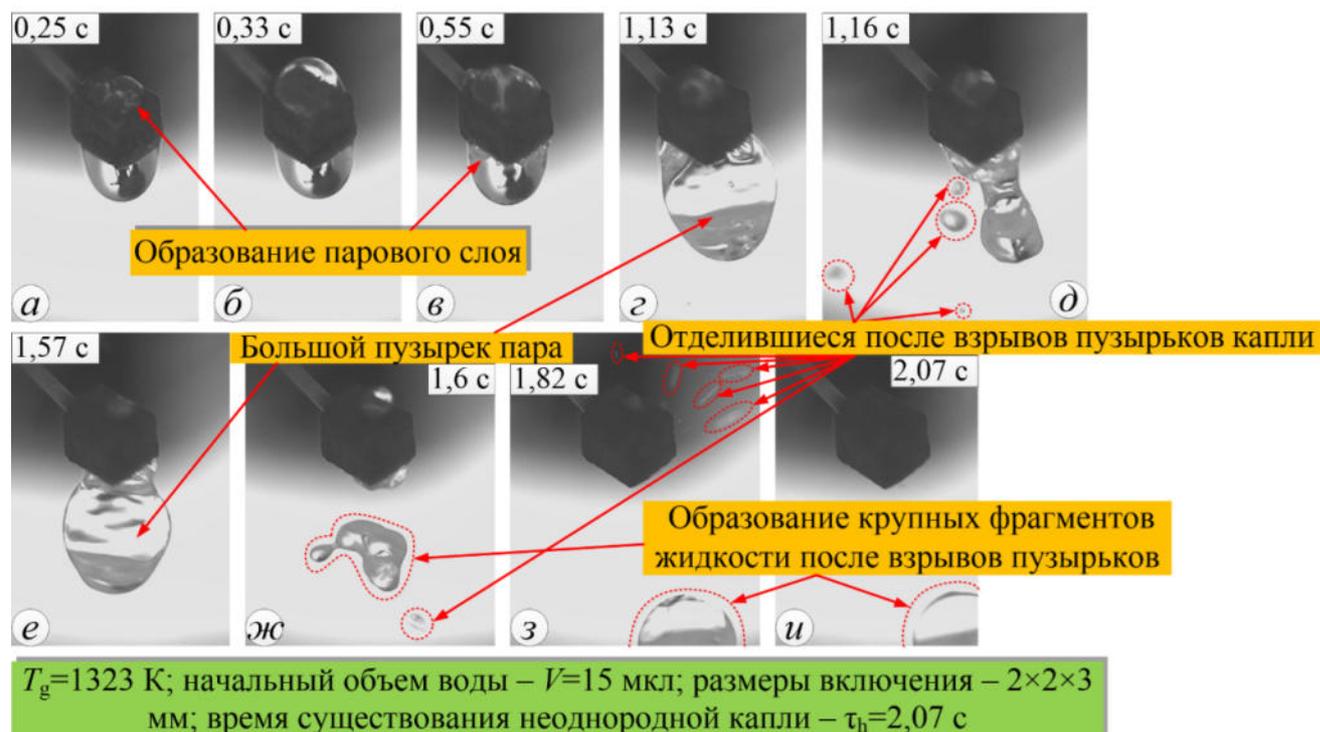


Рисунок 3.6.2. – Кадры интенсивного парообразования воды на внутренней границе «жидкость – включение» с взрывным отделением крупных капель и мелких фрагментов

Необходимо отметить, что одной из причин интенсивного парообразования неоднородной капли с взрывным дроблением слоя жидкости является неравномерность прогрева капли. Наличие в капле графитового включения позволяет аккумулировать энергию газовой среды, а также энергию излучения, передающуюся от внешних границ капли к её центру. Следует сказать, что основными источниками радиационного теплового потока в рассматриваемой системе (рис. 2.2.3) являются керамические стенки трубки муфельной печи 3.

Окружающий гетерогенную каплю разогретый воздух можно считать диатермической средой, которая свободно пропускает энергию излучения к поверхности капли. Обволакивающий твёрдую частицу слой воды пропускает довольно ограниченную долю радиационного потока излучения (коэффициент пропускания излучения составляет от $\eta \approx 0,35-0,47$ [218]). Однако, видеокадры показали, что этой энергии достаточно для разогрева графита и достижения на внутренней границе раздела сред условий интенсивного парообразования. Образующиеся пузырьки пара изменяют локальные теплофизические характеристики неоднородной капли, а также становятся дополнительными источниками теплового излучения. Таким образом, неравномерность прогрева и температурное напряжение внутри капли усиливаются, что в конечном итоге приводит к взрывному дроблению слоя жидкости неоднородной капли вследствие интенсивного парообразования.

При проведении экспериментов с использованием системы высокоскоростной видеорегистрации установлены характерные размеры (радиусы), а также количество формирующихся в результате интенсивного парообразования фрагментов жидкости. Эксперименты проводились для трёх начальных объёмов жидкости: 5, 10 и 15 мкл. Начальная температура газовой среды (воздуха в муфельной печи) варьировалась в диапазоне $T_g=1073-1373$ К. Результаты измерений для капель с графитовым включением в виде параллелограмма размером $2 \times 2 \times 1$ мм представлены в таблице 3.6.1.

Таблица 3.6.1. – Распределение по размерам капель, отделившихся после взрывов пузырьков пара в процессе интенсивного кипения воды вокруг графитового включения размером $2 \times 2 \times 1$ мм

$V=5$ мкл				
№ опыта	T_g, К	Количество отделившихся капель	Распределение отделившихся капель по размерам	
			$0,05 \text{ мм} < R_{sd} < 0,5 \text{ мм}$	$0,5 \text{ мм} < R_{sd} < 1 \text{ мм}$
1	1073	47	43	4

2	1123	81	81	-
3	1173	94	91	3
4	1223	183	180	3
5	1273	402	400	2
6	1323	401	400	1
7	1373	253	253	-
Общее количество		1461	1448	13
$V=10$ мкл				
1	1073	10	10	-
2	1123	108	107	1
3	1173	186	184	2
4	1223	69	67	1
5	1273	113	112	1
6	1323	200	198	-
7	1373	43	42	-
Общее количество		729	721	8
$V=15$ мкл				
1	1073	84	84	-
2	1123	116	115	1
3	1173	57	55	3
4	1223	47	46	-
5	1273	116	115	-
6	1323	36	35	-
7	1373	68	67	-
Общее количество		526	517	9

На основании данных таблицы 3.6.1 можно сформулировать заключение о том, что характерные размеры подавляющего большинства образующихся в результате взрывного дробления слоя жидкости фрагментов соответствуют диапазону $R_{sd}=0,05-0,5$ мм. Формирование фрагментов размерами $0,5 \text{ мм} < R_{sd} < 1$ мм зарегистрировано только в случаях реализации второго режима распада (количество этих случаев можно оценить с помощью данных таблицы 3.6.1).

Наибольшее число сформировавшихся в результате интенсивного парообразования неоднородной капли фрагментов жидкости наблюдалось в экспериментах с минимальным соотношением объёма воды V к объёму твёрдого

включения V_{inc} . При уменьшении соотношения V/V_{inc} и толщины плёнки воды вокруг включения прогрев капли происходил более равномерно, и фрагменты жидкости отрывались практически от всех граней включения.

Дробление начального объёма воды на капли с малыми характерными размерами позволяет значительно интенсифицировать процесс испарения и сократить время их существования. Такой эффект в значительной степени обусловлен увеличением суммарной площади поверхности образующихся капель по отношению к начальной площади поверхности капли с твёрдым включением. Увеличение суммарной площади поверхности теплообмена ускоряет отвод энергии от внешней газовой среды для осуществления фазового перехода.

На рис. 3.6.3 и 3.6.4 приведены зависимости, иллюстрирующие влияние соотношения начальных объёмов воды и включения для разных размеров последнего на увеличение результирующей площади поверхности испарения вследствие интенсивного парообразования неоднородной капли с взрывным дроблением слоя жидкости. Видно, что максимальное количество формирующихся в результате интенсивного парообразования фрагментов жидкости (мелких капель) соответствует минимальному соотношению начального объёма воды к объёму включения. Наиболее явно этот эффект проявляется для капель с размерами до 0,5 мм (рис. 3.6.4). Для реализации условий полного испарения таких капель могут быть использованы компактные камеры нагрева (в системах термической очистки существенно неоднородных жидкостей), при этом длительность процесса испарения составит не более 3 с. Исходя из представленных на рис. 3.6.3 и 3.6.4 экспериментальных данных можно сделать вывод, что максимальные отношения S_{out}/S_{in} будут достигаться при условии $V \sim V_{inc}$ или даже $V < V_{inc}$. В тех случаях, когда введение в капли дополнительного объёма твёрдых частиц затруднительно и нецелесообразно, возможно осуществлять подбор оптимальных соотношений V и V_{inc} для увеличения результирующей площади поверхности испарения с использованием экспериментальных данных на рис. 3.6.3 и 3.6.4.

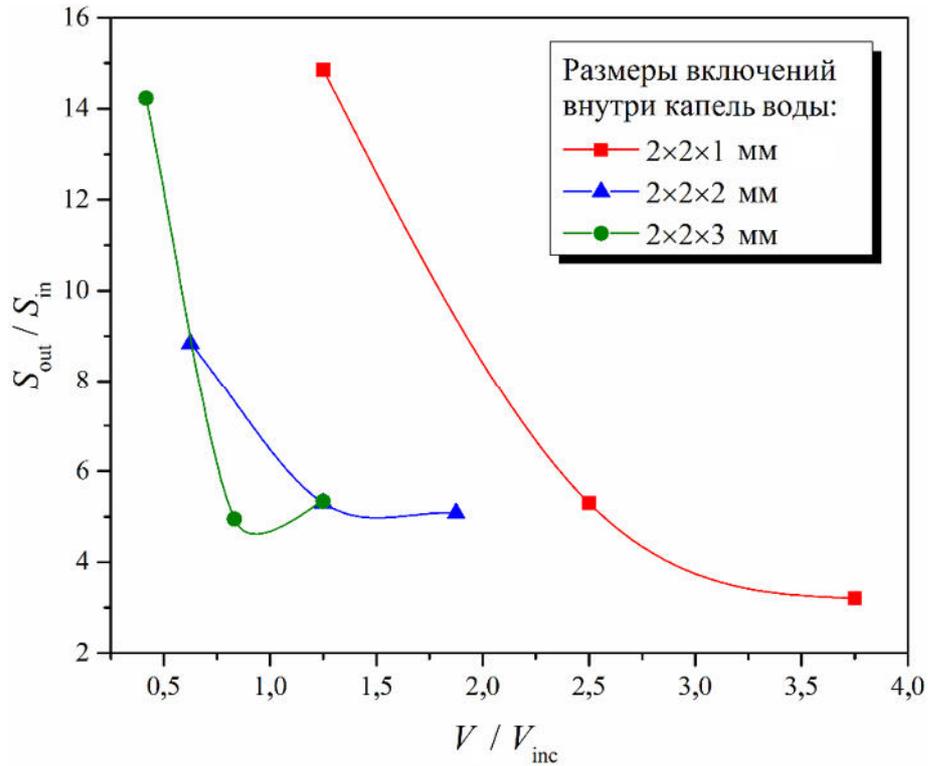
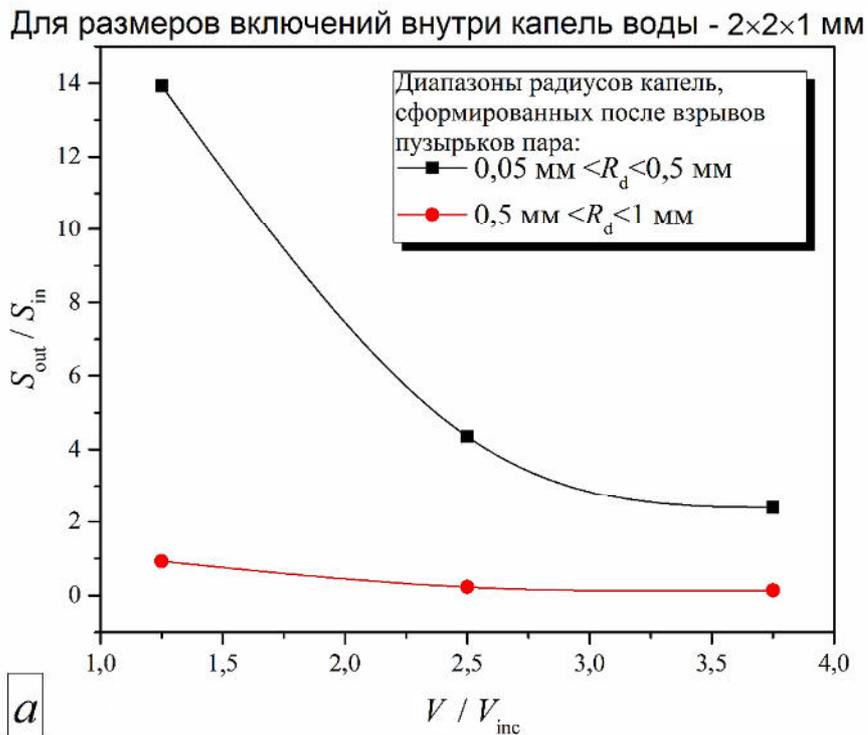
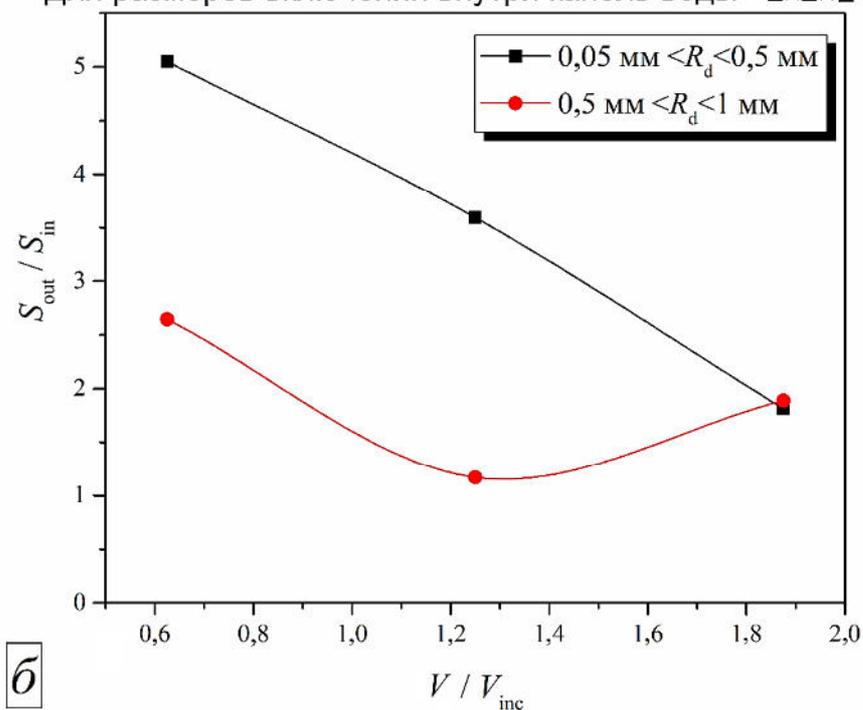


Рисунок 3.6.3. – Зависимости отношения площади поверхности испарения воды после взрывного дробления (S_{out}) к начальной площади поверхности (S_{in}) капли (объемом 5, 10 и 15 мкл) от отношения объемов воды V и включения V_{inc} в неоднородной капле жидкости

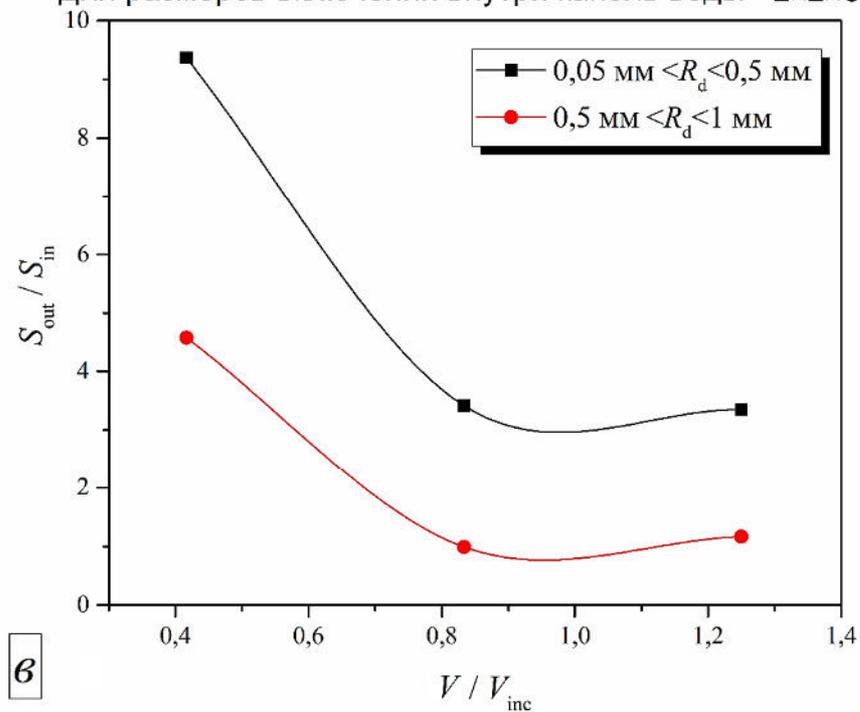


Для размеров включений внутри капель воды - $2 \times 2 \times 2$ мм



6

Для размеров включений внутри капель воды - $2 \times 2 \times 3$ мм



6

Рисунок 3.6.4. – Зависимости параметра S_{out} / S_{in} (объемом 5, 10 и 15 мкл) от отношения объемов воды V и включения V_{inc} в неоднородной капле жидкости с учетом распределения по размерам отделившихся капелек

Закономерности, установленные по результатам проведённых экспериментов, расширяют известные [4, 204, 219] представления об особенностях интенсивного парообразования неоднородной капли с взрывным дроблением слоя жидкости. Важно отметить, что оценка увеличения площади поверхности испарения вследствие дробления неоднородной капли на мелкие фрагменты была выполнена впервые.

После выполнения анализа масштабов увеличения суммарной площади испарения вследствие интенсивного парообразования слоя жидкости с его взрывным дроблением на мелкие фрагменты и выделения характерных диапазонов размеров R_{sd} отделяющихся мелких капель (таблица 3.6.1) режимы распада неоднородных капель воды были уточнены, а также выделены условия их реализации.

На рис. 3.6.5 приведены типичные кадры с изображением неоднородной капли при взрывном распаде. Показано, что дробление неоднородных капель может протекать по-разному. Выделены три характерных режима дробления, которые отличаются количеством и размерами отрывающихся фрагментов в процессе взрывного распада исходной большой капли воды.

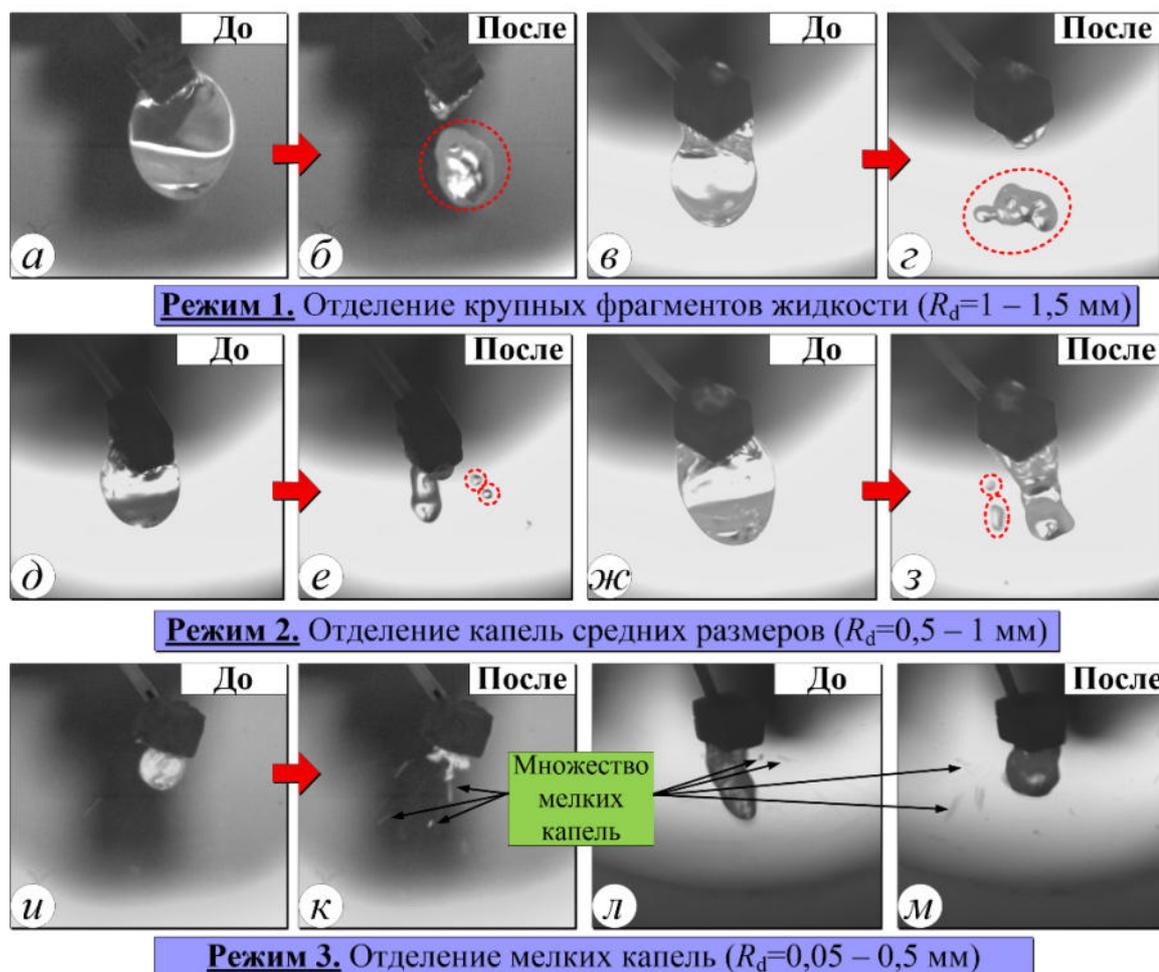


Рисунок 3.6.5. – Характерные режимы дробления неоднородных капель воды

Реализация того или иного режима дробления неоднородной капли воды зависит от группы параметров. В частности, установлено, что при максимальных температурах газов чаще (80–90 % экспериментов) реализовывался третий режим с формированием большой группы малых капель. Это обусловлено значительной интенсификацией теплообмена и парообразования по всей поверхности включения. В 30–40 % от общего числа экспериментов в случае снижения температуры происходило формирование группы капель воды с разными размерами (от мелких до достаточно крупных). Такой эффект можно объяснить неравномерным прогревом включения с разных сторон и, как следствие, разными скоростями парообразования. Размеры пузырьков изменяются с существенно отличающейся скоростью. Также распад гетерогенной капли с образованием крупных жидкостных фрагментов происходил в экспериментах с явно

выраженным свисанием воды с включения (т.е. при начальных объемах капель воды 10 и 15 мкл).

В проведенных экспериментах при варьировании температуры внешней газовой среды T_g и начальных толщин пленки воды установлены условия, при которых возможна реализация первого и второго режимов испарения гетерогенной капли. Так, в частности, выявлено, что взрывное дробление возможно при температурах газов T_g более 800 К. При меньших температурах независимо от размера капли зарегистрировано только интенсивное испарение воды с ее свободной поверхности. При температурах T_g выше 800 К возможность распада (дробления) капли определяется толщиной пленки воды. Так, в частности, при средней толщине менее 0,15 мм в экспериментах зарегистрировано испарение только со свободной поверхности. При увеличении этой толщины во всем диапазоне варьирования реализовывался взрывной вариант развития процесса.

Важно отметить, что взрывное дробление неоднородных капель в экспериментах происходило через короткие интервалы времени их прогрева (2–3 с). Такое время соответствует полету капель воды, например, через пламена высотой 7–10 м. Этот эффект следует учитывать при прогнозе координаты очага горения (высоты), соответствующей взрывному дроблению капель. Важно выполнить оценки времени подавления горения и затраченного объема воды в условиях взрывного дробления неоднородных капель. С этой целью проведены экспериментальные исследования в полевых условиях (на специализированном полигоне по тушению пожаров).

Эксперименты с тушением стендовых очагов проводились в соответствии с методикой [8]. Выполнены опыты с тушением типичных верховых очагов горения лесных горючих материалов (из брусков сечением 50 мм).

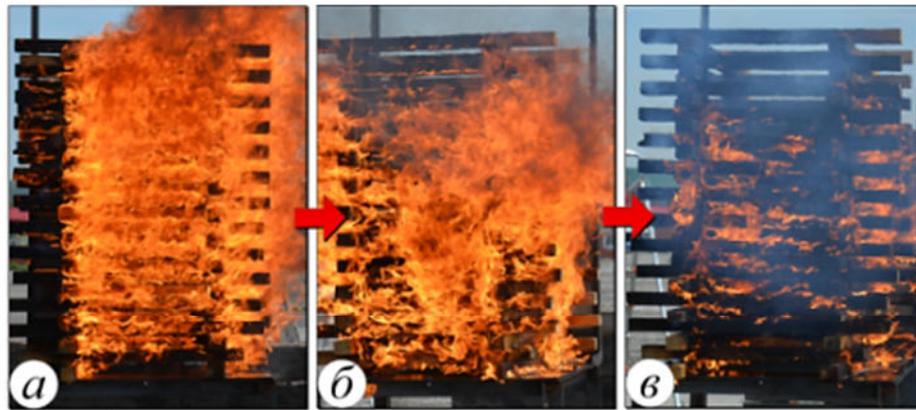
Методика приготовления суспензии воды с твердыми непрозрачными включениями – графитовыми частицами включала следующую последовательность действий. Посредством вибрационной микромельницы «Vibratory Micro Mill Pulverisette» (путем измельчения и последующего просева)

приготавливался графитовый порошок с размерами частиц 10–50 мкм. Далее полученный состав смешивался с водой в массовой концентрации 1 %. Полученная суспензия заливалась в специализированный баллон, в котором проводилось ее перемешивание с применением двух пар лопастей (с целью предотвращения оседания частиц углерода в суспензии).

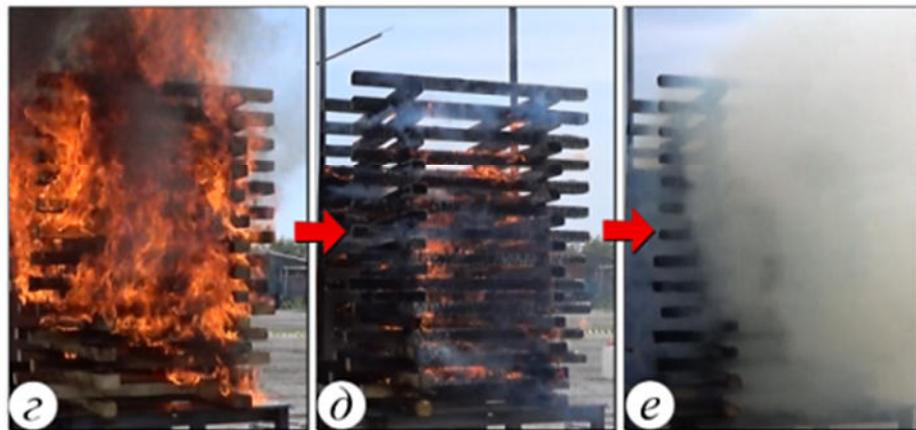
Методика впрыска в стендовый очаг горения воды и суспензии на ее основе включала следующую последовательность стадий. Вода или суспензия заливалась в баллон (со встроенным механизмом непрерывного перемешивания), в котором посредством воздушного компрессора создавалось избыточное давление $P \approx 2 \cdot 10^5$ Па. Баллон посредством термостойкого шланга соединялся с тремя распылительными форсунками, установленными на вертикальной оси симметрии стендового очага на один метр выше верхней его кромки. После разгорания стендового очага начинался распыл аэрозоля, который продолжался до момента полного подавления горения. Размеры (радиусы) капель в аэрозольном потоке составляли $R = 150\text{--}350$ мкм.

Регистрировались времена тушения стендового очага и задействованные объемы воды.

На рис. 3.6.6 и 3.6.7 приведены типичные результаты проведенных экспериментов с тушением очагов горения (видеокадры опытов, а также зависимости времен тушения и израсходованных объемов жидкостей для воды и суспензий на основе твердых непрозрачных графитовых частиц от размеров капель в аэрозольном потоке).



Случай 1. Пожаротушение потоками воды



Случай 2. Пожаротушение потоками графитовой суспензии

Рисунок 3.6.6. – Видеокадры процесса тушения стендового очага водой без примесей (а–в) и суспензией с частицами графита (г–е): а, г – пламенное горение; б, д – начало тушения; в, е – заключительный этап тушения

Зависимости на рис. 3.6.7 иллюстрируют наименьшие времена тушения и объемы израсходованной воды при использовании суспензии с графитовыми частицами. Это обусловлено тем, что при использовании суспензий воды интенсивно реализуются три механизма тушения. При этом наличие включений в каплях приводит к существенной интенсификации парообразования. Основной акцент делается на дроблении неоднородной капли воды и значительном росте площади поверхности жидкости в пламени.

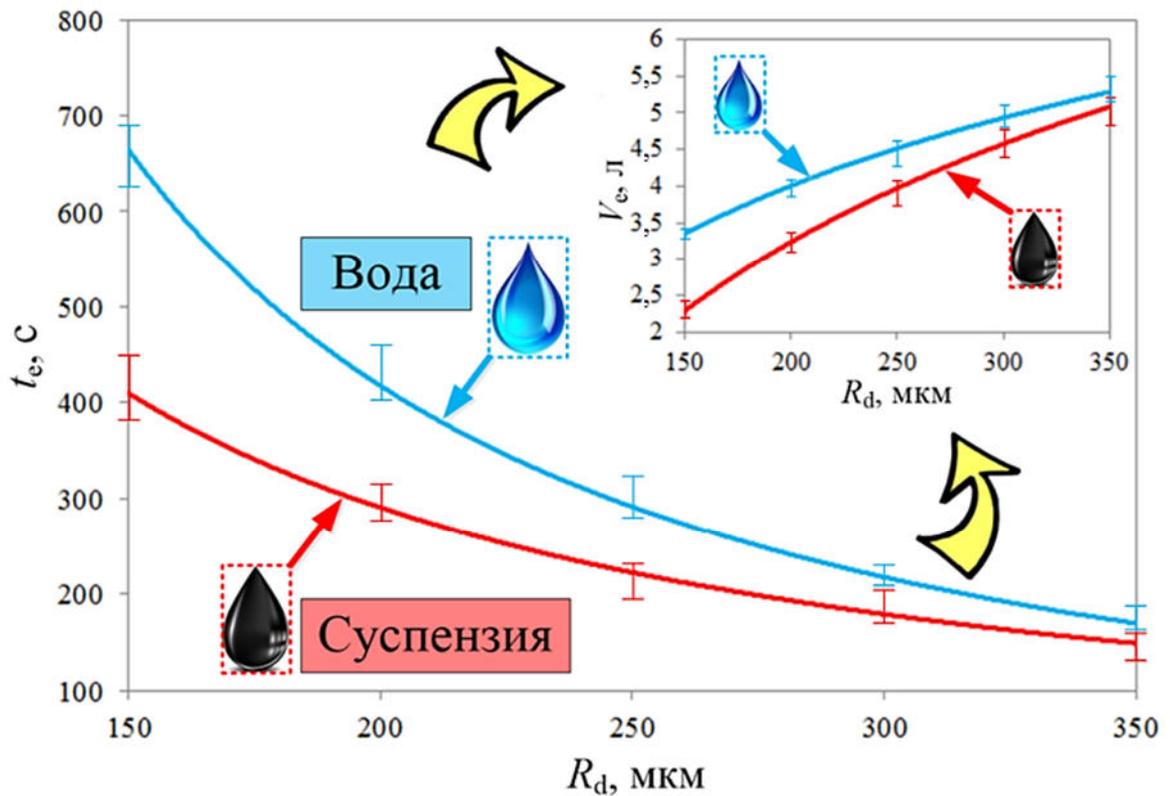


Рисунок 3.6.7. – Зависимости времен тушения t_e и затраченных объемов воды V_e от среднего размера каплей R_d в аэрозольном потоке (при тушении водой без примесей и суспензией с графитовыми частицами)

Первый из трех реализуемых механизмов подразумевает значительное снижение температуры в зоне горения при испарении – эндотермическом фазовом превращении с теплотой парообразования 2 МДж/кг. Второй механизм основан на вытеснении формирующимися парами воды продуктов сгорания и окислителя из зоны горения (т.е. пары воды выступают в качестве буферной зоны между окислителем и горючими газами, соответственно, препятствуют смешиванию последних). Третий механизм подразумевает охлаждение зоны горения парокapельным потоком, т.е. за счет теплообмена жидкости и паров воды с продуктами сгорания. Этот механизм подразумевает также теплообмен горящих конструкций с тушащей водой – капельным аэрозолем. Масштабы влияния того или иного механизма на процесс тушения зависят от условий и скоростей парообразования. Как показали проведенные эксперименты, в неоднородных

каплях воды парообразование протекает более интенсивно вследствие того, что площадь поверхности испарения больше (испарение происходит на внутренней границе раздела «включение – вода» и на свободной поверхности капли воды). Взрывное дробление неоднородных капель дополнительно интенсифицирует процессы испарения.

Следует отметить, что в случае суспензий расход воды, задействованной при тушении, меньше (рис. 3.6.7), чем в экспериментах с водой без примесей не только потому, что определенную долю (очень малую – массовая концентрация варьировалась до 1 %) в объеме занимают включения. Основной вклад оказывают меньшие времена тушения, т.е. меньшая (по сравнению с водой без примесей) длительность подачи суспензий в зону пламени (рис. 3.6.6).

Теоретические исследования [203] показали, что инертные включения могут аккумулировать тепло после падения на поверхность горячей конструкции (например, горящего элемента стендового очага), т.е. аккумулировать энергию из зоны горения или термического разложения древесины. Это еще одно дополнительное преимущество суспензий при тушении пожаров по сравнению с водой без добавок. При этом за счет выбора материала включения, соотношения объемов «вода – включение» в неоднородных каплях можно обеспечить требуемые параметры в зоне пожара, т.е. температуру, концентрацию паров воды, продуктов сгорания и окислителя.

Важно отметить, что также сформулирована гипотеза о причинах формирования ультрадисперсного пароводяного потока (облака) с твердыми частицами. Демонстрационный скетч на рис. 3.6.8 отражает основную концепцию технологии пожаротушения с применением суспензий на основе воды.

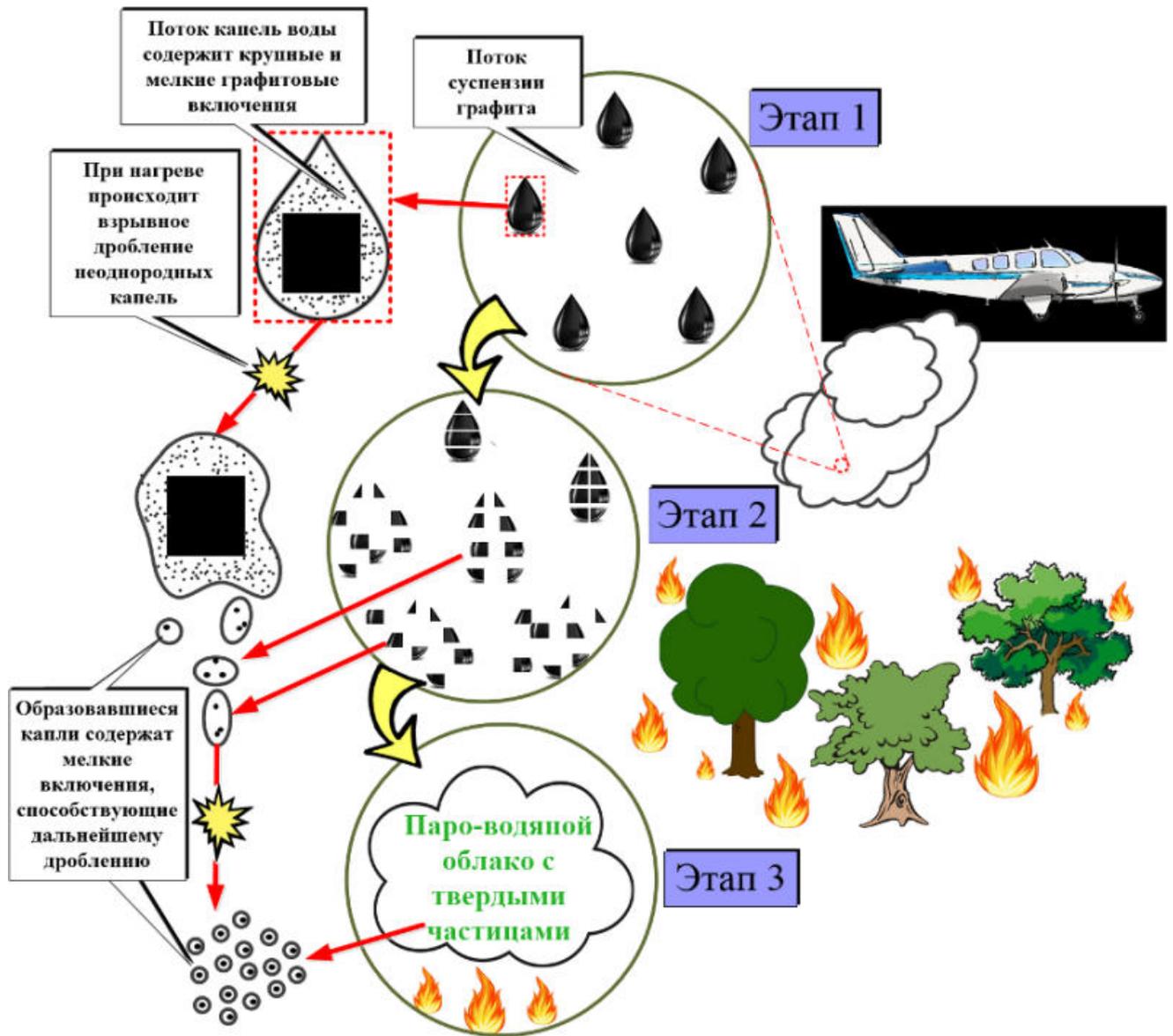


Рисунок 3.6.8. – Скетч, иллюстрирующий применение капельного потока графитовой суспензии в качестве тушащего агента при борьбе с лесным пожаром

Капли воды, содержащие и единичные крупные твердые включения, и частицы в виде порошка дробятся вследствие интенсивного парообразования на внутренних границах в несколько этапов. После достаточного для реализации механизма разрушения прогрева (первый этап) происходит отделение (отлет) капель жидкости различных размеров (таблица 3.6.1) от крупного графитового включения (рис. 3.6.8). Отделившиеся капельки жидкости содержат мелкие частицы порошка графита, которые могут, как и крупные включения, интенсифицировать процессы прогрева, испарения и возможного дробления (рис.

3.6.8). Как результат, может быть сформировано облако из паров и мелких (до нескольких десятков микрон) капель воды, а также частиц графита. Такой подход определенно может способствовать более эффективной реализации трех выделенных механизмов тушения пожаров.

На рис. 3.6.9 представлены кадры типичных стадий реализации механизма интенсивного парообразования неоднородных (с крупным твердым включением и мелкими частицами порошка графита) капель воды с взрывным дроблением слоя суспензии, обволакивающего единичное графитовое включение, при высокотемпературном нагреве.

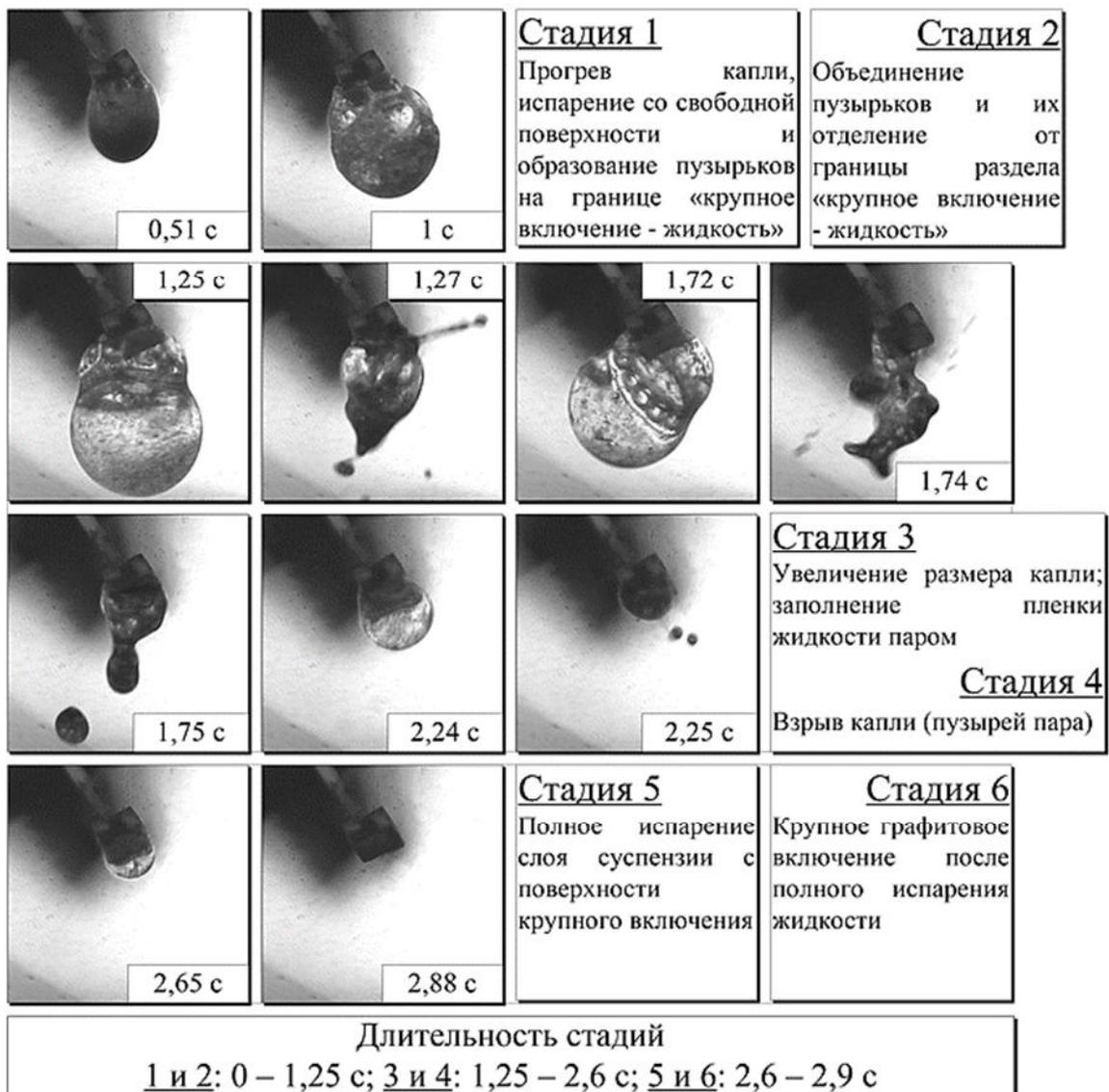


Рисунок 3.6.9. – Типичные стадии реализации механизма интенсивного парообразования графитовой суспензии при температуре нагрева около 1300 К

По существу, выделенные стадии аналогичны тем, которые обсуждались в п. 3.2 (рис. 3.2.4) и являлись характерными для процесса взрывного дробления капель воды только с единичными соразмерными твердыми включениями.

Для установления режимов взрывного дробления неоднородных капель жидкости при наличии в их составе частиц порошка графита и сравнения полученных данных о количестве и размерах отделяющихся капель с уже обсужденными (таблица 3.6.1) проведены эксперименты, результаты которых представлены на рис. 3.6.10.

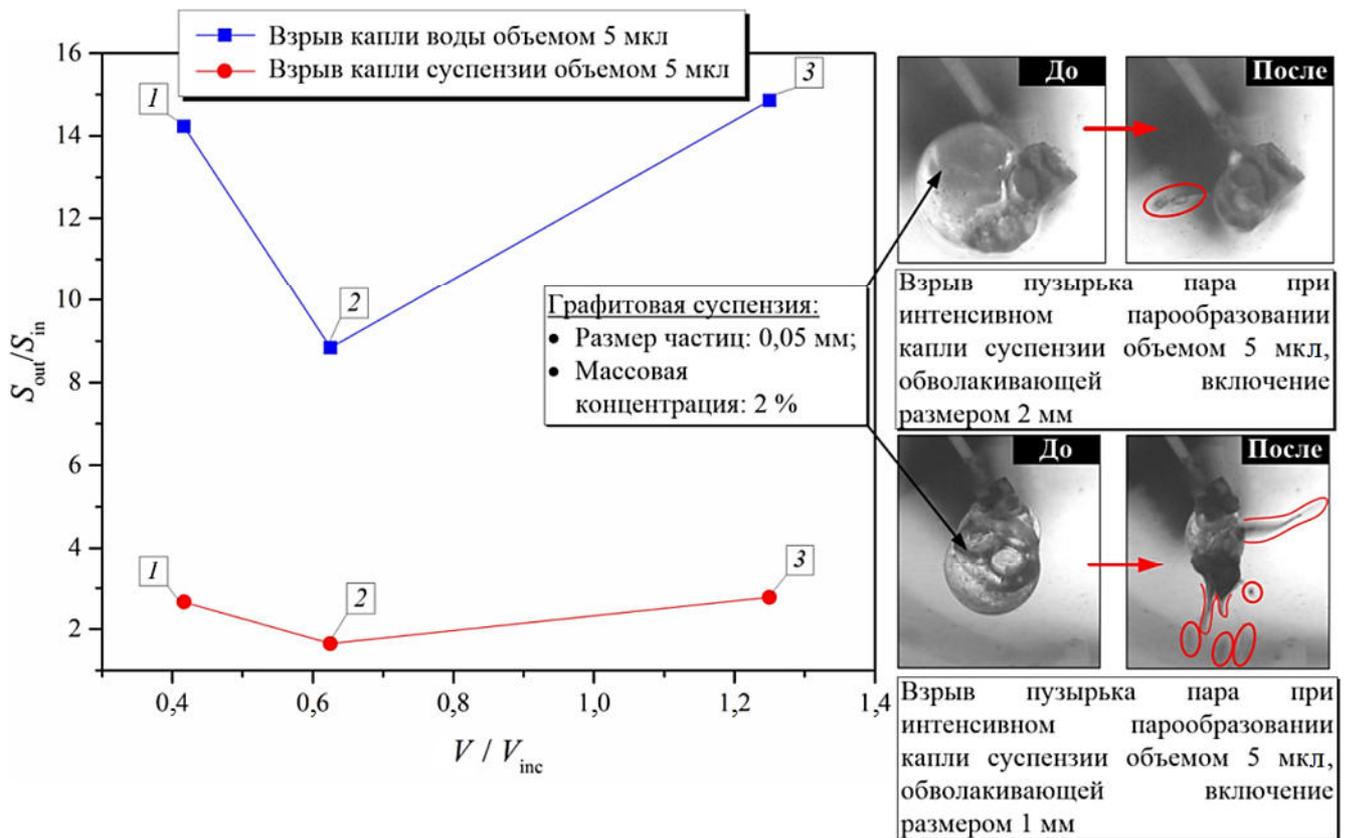


Рисунок 3.6.10. – Зависимости параметра S_{out} / S_{in} (объемом 5 мкл) от отношения объемов жидкости (воды или графитовой суспензии) V и включения V_{inc} в неоднородной капле: 1 – параметр V / V_{inc} при размере включения $2 \times 2 \times 3$ мм; 2 – V / V_{inc} при размере включения $2 \times 2 \times 2$ мм; 3 – V / V_{inc} при размере включения $2 \times 2 \times 1$

На рис. 3.6.10 хорошо видно, что минимальные значения отношения S_{out}/S_{in} соответствуют условиям использования включения в форме куба с размерами $2 \times 2 \times 2$ мм. Такой результат можно объяснить меньшим числом отрывающихся капель в процессе взрывного дробления основной капли при таких размерах включения. Наблюдения в проведенных опытах показали, что при использовании включения в форме куба происходит довольно равномерное его обволакивание водой. Как следствие, приток энергии внешней газовой среды к поверхности включения со всех сторон проходит с примерно равной скоростью. В случае включения в форме параллелепипеда с размерами $2 \times 2 \times 1$ мм и $2 \times 2 \times 3$ мм во всех экспериментах толщина пленки на всех гранях была отличной. Это приводило к неравномерному прогреву неоднородной капли. Со стороны грани включения с минимальной пленкой воды происходило зарождение пузырьков и интенсивное дробление. Поэтому в экспериментах с включениями в форме параллелепипеда дробление начиналось раньше и характеризовалось отрывом большего числа капель – фрагментов воды. Как следствие, и отношения S_{out}/S_{in} в этом случае выше.

Также на рис. 3.6.10 видно, что взрывное дробление капель суспензий характеризуется меньшими значениями S_{out}/S_{in} по сравнению с водой. Это обусловлено меньшим числом формирующихся капель суспензии при дроблении основной капли. В случае воды – это число в несколько раз больше. Видеogramмы экспериментов показали, что эта закономерность обусловлена тем, что частицы суспензии при формировании пузырьков пара на поверхности основного включения «сбиваются» в группы. В основном за счет большей плотности по сравнению с водой и паром эти частички скапливаются более всего в нижней части неоднородной капли. При росте пузырьков пара в неоднородной капле происходит интенсификация конвективных течений внутри, и эти частички в капле хаотично начинают перемещаться. При превышении давления паров в капле давления, которое обусловлено силами поверхностного натяжения жидкости, происходило дробление капли. Формировались жидкостные фрагменты со скопившимися твердыми частичками. Чем крупнее были области с

такими скопившимися фрагментами, тем крупнее были отрывающиеся капли. Как следствие, в экспериментах с суспензиями формирующиеся при дроблении капли были больших размеров, чем в опытах с водой. Но число таких отрывающихся капель было существенно меньше, чем в экспериментах с водяными неоднородными каплями. Как следствие, отношения S_{out}/S_{in} для суспензии были меньше.

Также из видеogramм проведенных экспериментов можно отметить важную закономерность, которая заключается в том, что в экспериментах с суспензиями процесс нагрева сопровождался существенным разбуханием капли, т.е. продольные и поперечные размеры капли увеличивались при заполнении пузырьками пара в 4–5 раз относительно начального состояния. В экспериментах с каплями воды такого не наблюдалось (при заполнении капель парами их размеры увеличивались в 1,5–2 раза). Интенсификация роста размеров капель суспензий при нагревании еще раз подтверждает гипотезу о том, что неоднородности в каплях существенно ускоряют их прогрев и испарение, соответственно.

Установленные отличия процессов взрывного дробления капель суспензий и воды без дополнительных включений показывают, что эффект взрывного дробления можно обеспечить при одном довольно большом включении. При этом за счет соотношения его объема и объема воды можно в широких диапазонах варьировать характеристики дробления: число и размеры формирующихся капель.

Считаю необходимым привести кратко методику обработки результатов, представленных на рис. 3.6.10, а также обсудить, как определялись основные параметры (S_{out} / S_{in} , V / V_{inc}) рассматриваемых на рис. 3.6.3, 3.6.4 и 3.6.10 процессов.

Расчетные точки на рис. 3.6.10 получены следующим образом. Синие точки и кривая характеризуют процесс интенсивного парообразования с взрывным дроблением слоя водопроводной воды, обволакивающего графитовое включение известных размеров. Количественно каждая точка синей кривой показывает

насколько увеличилась полезная площадь поверхности испарения в процессе дробления S_{out} по отношению к начальной площади поверхности капли водопроводной воды S_{in} при варьировании параметра V / V_{inc} . Последний является отношением начального объема капли водопроводной воды V к объему твердого включения V_{inc} . При оценке данного параметра объем воды V не изменялся и составлял 5 мкл (результаты на рис. 3.6.3 и 3.6.4 представлены при варьировании начальных объемов жидкости в составе неоднородных капель и составляли 5, 10 и 15 мкл), а при расчете объема включения ($V_{inc}=a \cdot b \cdot c$, где a , b , c – длины сторон параллелограмма) варьировалась длина одной стороны. Размеры включений были следующими: позиция 1 (см. рис. 3.6.10) – $2 \times 2 \times 3$ мм; 2 – $2 \times 2 \times 2$ мм; 3 – $2 \times 2 \times 1$ мм.

Значение S_{out} является усредненным значением по результатам семи экспериментов, проведенных при варьировании температуры среды от ~ 1073 К до ~ 1373 К. При проведении каждого последующего эксперимента температура увеличивалась на 50 градусов. Расчет значения S_{out} проводился с использованием выражения (3.6.1):

$$S_{out} = ((\Sigma n_1 \cdot S_1) + (\Sigma n_2 \cdot S_2) + (\Sigma n_3 \cdot S_3)) / 7, \quad (3.6.1.)$$

где Σn_1 – общее количество отделившихся в процессе дробления капель жидкости размером в диапазоне $0,05 \text{ мм} < R_{sd} < 0,5 \text{ мм}$ (R_{sd} – радиус отделившихся капель); Σn_2 – то же самое, но в диапазоне $0,5 \text{ мм} < R_{sd} < 1 \text{ мм}$; Σn_3 – то же самое, но в диапазоне $1 \text{ мм} < R_{sd} < 1,5 \text{ мм}$; S_1 – средняя площадь поверхности отделившейся капли для диапазона размеров $0,05 \text{ мм} < R_{sd} < 0,5 \text{ мм}$; S_2 – то же самое, но для диапазона размеров $0,5 \text{ мм} < R_{sd} < 1 \text{ мм}$, S_3 – то же самое, но для диапазона размеров $1 \text{ мм} < R_{sd} < 1,5 \text{ мм}$. Для определения S_n использовалась формула (3.6.2.) для вычисления площади поверхности сферы:

$$S_n = 4\pi R_{d \text{ av}}^2, \quad (3.6.2.)$$

где $R_{d \text{ av}}$ – средние радиусы отделившихся капель жидкости для указанных выше диапазонов (рассчитывался как среднеарифметическое значение для диапазона).

Значение S_{in} является постоянным и выражает начальную площадь поверхности капли жидкости объемом 5 мкл (на рис. 3.6.3 и 3.6.4 S_{in} приводится для капель жидкости объемом 5, 10 и 15 мкл).

Красные точки и кривая характеризуют процесс интенсивного парообразования с взрывным дроблением слоя графитовой суспензии с контролируемыми характеристиками (см. рис. 3.6.10), обволакивающей включение известных размеров.

При выполнении анализа влияния добавления мелких графитовых включений (т.е. при использовании суспензии) на процесс интенсивного парообразования неоднородных капель жидкости с их взрывным разрушением введен коэффициент γ , отражающий изменение параметра S_{out}/S_{in} относительно процесса дробления капли водопроводной воды при аналогичных условиях проведения экспериментов. Методика определения коэффициента γ носила оценочный характер и заключалась в следующем: по результатам экспериментов, соответствующих синей кривой (т.е. исследование процесса дробления слоя водопроводной воды), выделены случаи, которым удовлетворяет условие максимального количества отделившихся капель в процессе интенсивного парообразования с дроблением; в экспериментальных условиях, аналогичных выделенным случаям, проведены эксперименты по исследованию процесса дробления слоя графитовой суспензии; установлено, что количество отделившихся капель жидкости в этих оценочных экспериментах, в среднем, примерно в пять раз меньше относительно значений, полученных при дроблении слоя водопроводной воды; при этом, соответственно, и площади поверхности испарения S_{out} , и параметр S_{out}/S_{in} уменьшатся в такое же количество раз (коэффициент γ принят равным 5,4).

3.7. Испарение капель воды с металлическими включениями при нагреве в высокотемпературной среде

Экспериментально установлены [214, 220] характеристики испарения капель воды с внутренними одиночными металлическими включениями (при нагреве в высокотемпературной газовой среде). Сведения о марках металлов и их свойствах, а также массах включений приведены в п. 2.3. С применением

высокоскоростной видеорегистрации определены [220] времена полного испарения τ_h каплей воды при контролируемом росте температуры газовой среды до 900 К. Для установления закономерностей испарения неоднородных каплей воды рассмотрены несколько гипотез, которые объясняют диапазоны изменения времен τ_h . Выделены [220] условия, способствующие максимально эффективному охлаждению включений.

На рис. 3.7.1 показаны типичные кадры гетерогенных каплей жидкости в процессе испарения в высокотемпературном газовом потоке.

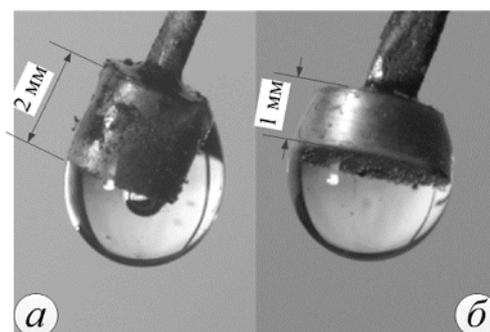


Рисунок 3.7.1. – Изображения каплей воды (объемом 15 мкл (а) и 10 мкл (б) с включениями 2 мм из стали (а) и 1 мм из алюминия (б) в процессе испарения в высокотемпературной газовой среде

Важно отметить, что при соблюдении условия полного обволакивания включений каплями воды (рис. 3.7.1) наиболее интенсивно реализовывался процесс испарения жидкости с внешней или свободной поверхности капли. Регистрировалось монотонное уменьшение размеров (соответственно и объема) каплей. На границе раздела сред процесс формирования парового слоя являлся нерегулярным и характеризовался умеренным ростом пузырьков пара (рис. 3.7.2). В течение 11,5 с от начала нагрева толщина внутреннего парового слоя в капле увеличилась до 0,5 мм. Единоновременно с парообразованием на границе «включение – пленка воды» происходило испарение с поверхности капли воды, и в течение тех же 11,5 с капля объемом 10 мкл почти полностью испарилась. В связи с этим, можно утверждать, что испарение с приповерхностного слоя капли воды является преобладающим механизмом фазовых превращений в

рассматриваемой системе «металлическое включение – капля воды». В отличие от результатов экспериментов [203] в проведенных опытах пленка жидкости вокруг включения не разрушалась при интенсивном росте пузырьков пара на внутренней границе раздела сред. Происходило практически монотонное уменьшение размеров капли.

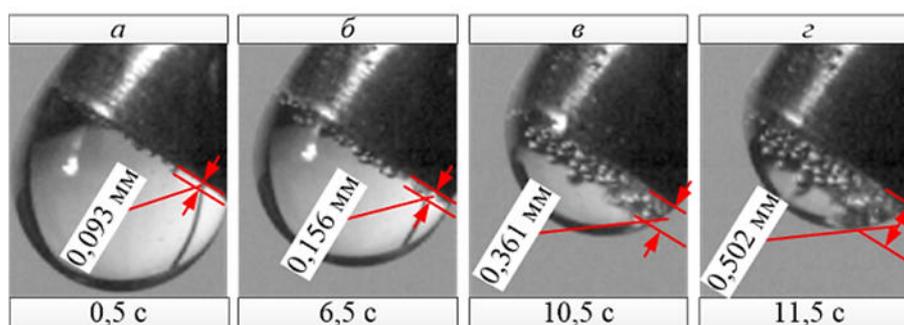


Рисунок 3.7.2. – Рост парового слоя на внутренней границе раздела сред «титан – вода» при температуре газовой среды $T_g=700$ К

На рис. 3.7.3 представлены экспериментальные значения времен существования капель воды, содержащих одиночные включения из разных металлов размером 2 мм, при температуре газовой среды 350 К. Необходимо отметить, что значения на гистограммах представлены в порядке увеличения. Проведены эксперименты для разных объемов капель воды – 5 мкл (рис. 3.7.3, а), 10 мкл (рис. 3.7.3, б) и 15 мкл (рис. 3.7.3, в). С учетом случайных погрешностей измерений времен полного испарения τ_h выявить какую-либо общую закономерность изменения рассматриваемых величин (времен существования пленки) при увеличении объема жидкости достаточно сложно. Кроме того, подобная тенденция регистрировалась при средних (600 К) и высоких (850 К) температурах газовой среды (см. рис. 3.7.4 и 3.7.5).

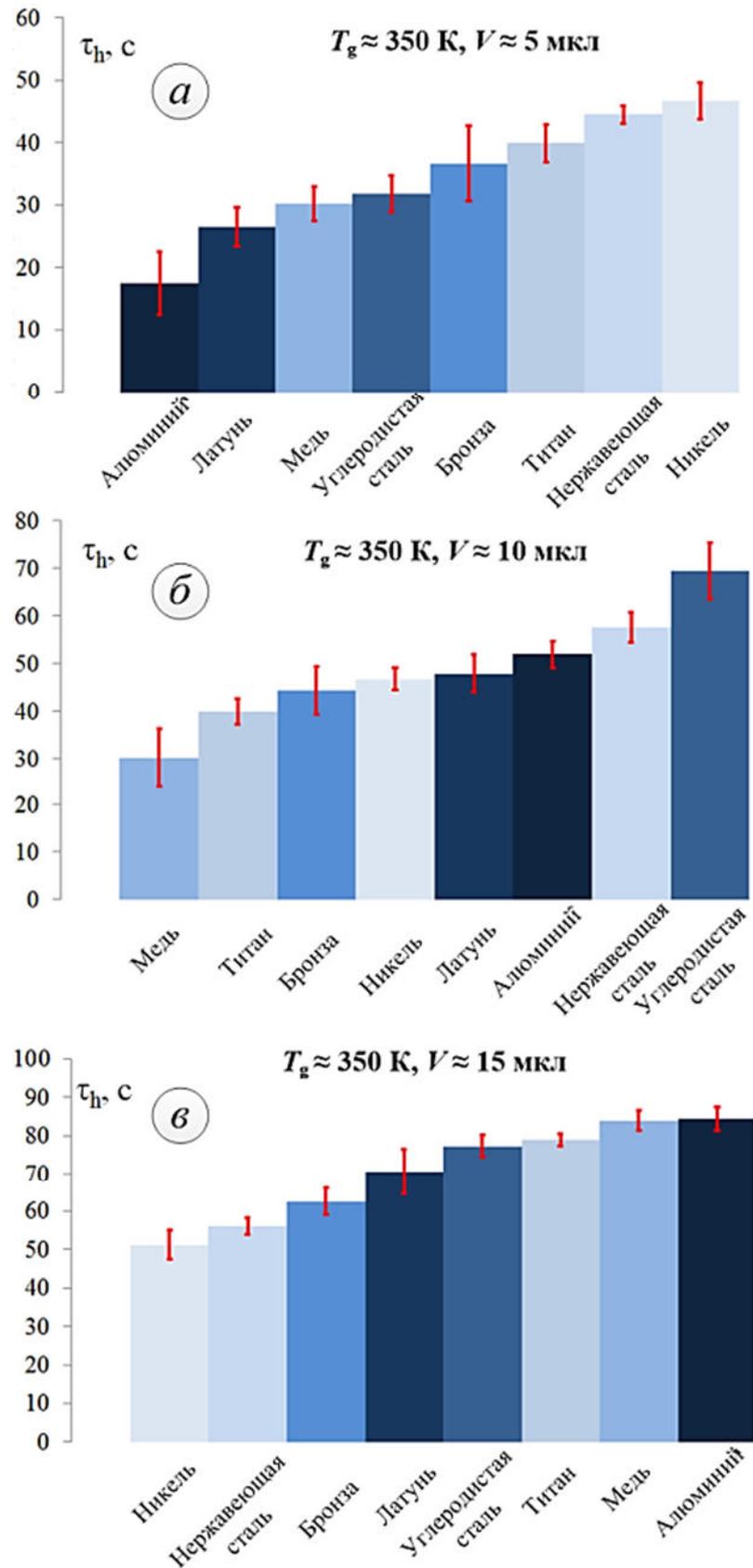


Рисунок 3.7.3. – Времена существования (полного испарения) τ_h капель воды объемом 5 мкл (а), 10 мкл (б) и 15 мкл (в), содержащих различные металлические включения размером 2 мм, при температуре газовой среды $T_g=350 \text{ K}$

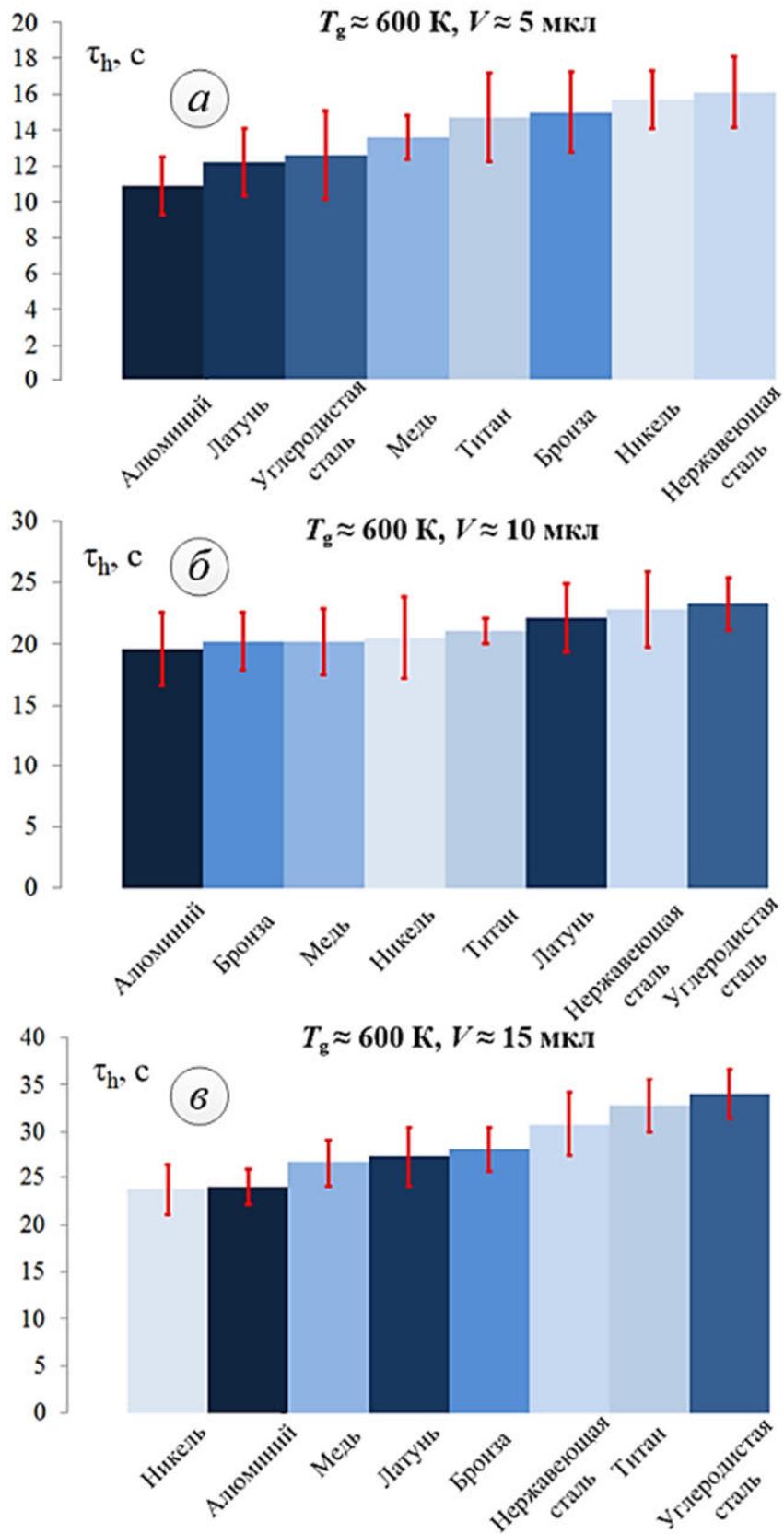


Рисунок 3.7.4. – Времена существования (полного испарения) τ_h капель воды объемом 5 мкл (а), 10 мкл (б) и 15 мкл (в), содержащих различные металлические включения размером 2 мм, при температуре газовой среды $T_g=600 \text{ К}$

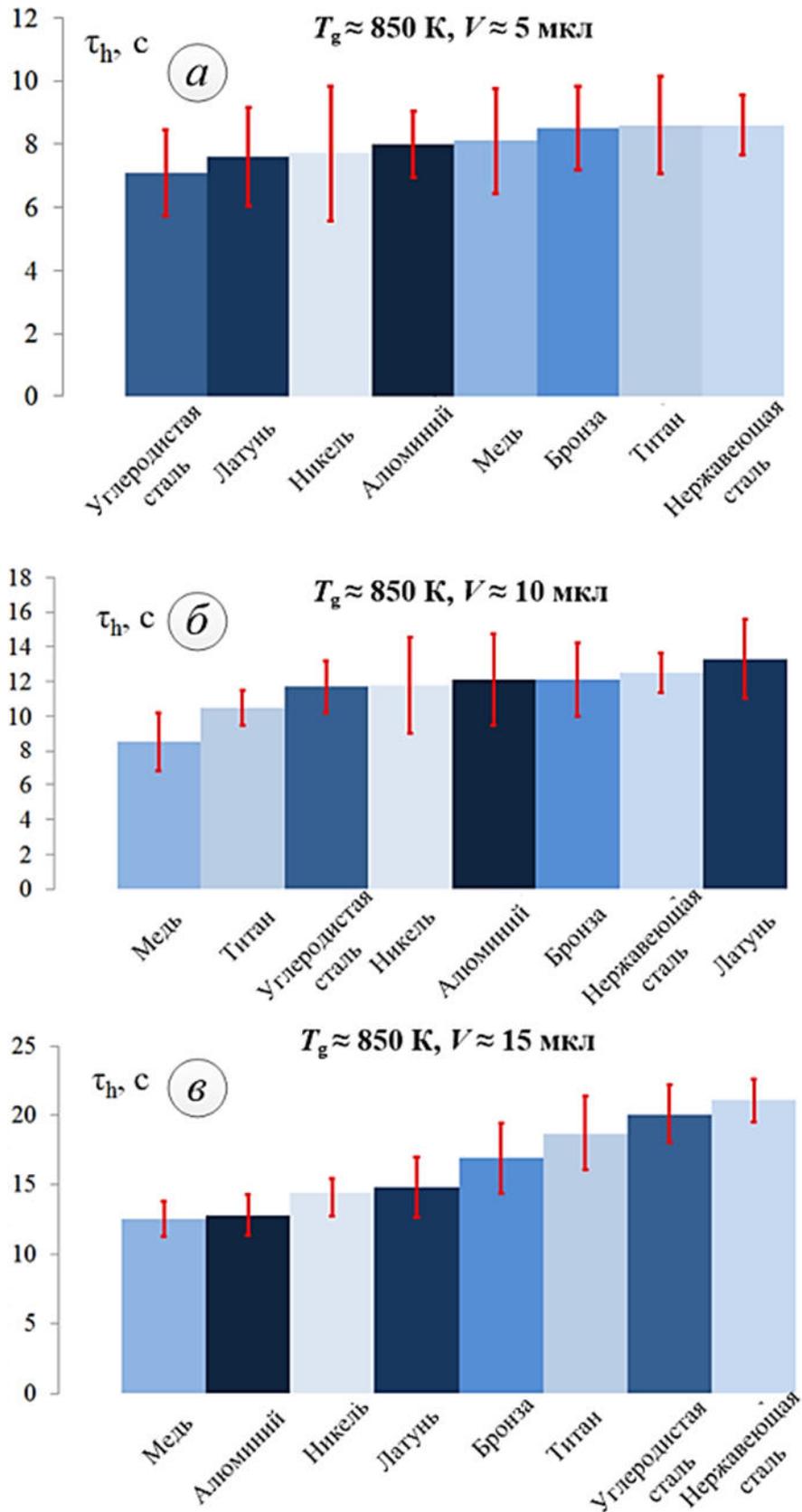


Рисунок 3.7.5. – Времена существования (полного испарения) τ_h капель воды объемом 5 мкл (а), 10 мкл (б) и 15 мкл (в), содержащих различные металлические включения размером 2 мм, при температуре газовой среды $T_g=850 \text{ K}$

Анализ результатов проведенных экспериментов с каплями воды, содержащими включения из разных металлов размером 1 мм, также не внес существенных разъяснений. В связи с этим, проведены оценки времен прогрева воды и материалов включений. Таблицы 3.7.1 и 3.7.2 представляют полученные значения времен прогрева металлических включений и слоев воды при комнатной температуре и 850 К.

Таблица 3.7.1. – Времена прогрева металлических включений τ_{Me} при температурах 293 К и 850 К

№	Металл	a_{Me} (см ² /с) при 293 К [181]	a_{Me} (см ² /с) при 850 К [181]	Радиус металлического включения r_{Me} (см)	Время прогрева τ_{Me} (с) при 293 К	Время прогрева τ_{Me} (с) при 850 К
1	Углеродистая сталь (AISI 1080)	0,124	0,067	0,200	0,323	0,597
2	Нержавеющая сталь (316L)	0,040	0,044	0,200	1	0,909
3	Никель (без примесей)	0,149	0,126	0,200	0,268	0,317
4	Титан (Ti6Al4V)	0,029	0,040	0,200	1,379	1
5	Медь (без примесей, бескислородная)	1,136	0,900	0,200	0,035	0,044
6	Алюминий (6000)	0,823	0,710	0,200	0,049	0,056

	Series)					
7	Коммерческая бронза (90% медь и 10% цинк)	0,571	0,277	0,200	0,070	0,144
8	Гильзовая латунь (70% медь и 30% цинк)	0,375	0,271	0,200	0,107	0,148

Таблица 3.7.2. – Времена прогрева слоя воды τ_w при температурах 293 К и 850 К

При T_g 293 К		При T_g 850 К	
Температуропроводность воды $a_w \cdot 10^{-6}$ (m^2/c) при 293 К [182]	0,144	Температуропроводность воды $a_w \cdot 10^{-6}$ (m^2/c) при 373 К [182]	0,155
Капля воды объемом 5 мкл		Капля воды объемом 5 мкл	
Минимальная толщина слоя воды $r_{11} \cdot 10^{-5}$ (м)	2	Минимальная толщина слоя воды $r_{11} \cdot 10^{-5}$ (м)	2
Максимальная толщина слоя воды $r_{12} \cdot 10^{-5}$ (м)	100	Максимальная толщина слоя воды $r_{12} \cdot 10^{-5}$ (м)	100
Капля воды объемом 10 мкл		Капля воды объемом 10 мкл	
Минимальная толщина слоя воды $r_{21} \cdot 10^{-5}$ (м)	2	Минимальная толщина слоя воды $r_{21} \cdot 10^{-5}$ (м)	2
Максимальная толщина слоя воды $r_{22} \cdot 10^{-5}$ (м)	130	Максимальная толщина слоя воды $r_{22} \cdot 10^{-5}$ (м)	130
Капля воды объемом 15 мкл		Капля воды объемом 15 мкл	
Минимальная толщина слоя воды $r_{31} \cdot 10^{-5}$ (м)	2	Минимальная толщина слоя воды $r_{31} \cdot 10^{-5}$ (м)	2
Максимальная толщина слоя	162	Максимальная толщина слоя	162

воды $r_{32} \cdot 10^{-5}$ (м)		воды $r_{32} \cdot 10^{-5}$ (м)	
Капля воды объемом 5 мкл		Капля воды объемом 5 мкл	
Время прогрева τ_{w11} слоя r_{11} (с)	0,0028	Время прогрева τ_{w11} слоя r_{11} (с)	0,0026
Время прогрева τ_{w12} слоя r_{12} (с)	6,944	Время прогрева τ_{w12} слоя r_{12} (с)	6,452
Капля воды объемом 10 мкл		Капля воды объемом 10 мкл	
Время прогрева τ_{w21} слоя r_{21} (с)	0,0028	Время прогрева τ_{w21} слоя r_{21} (с)	0,0026
Время прогрева τ_{w22} слоя r_{22} (с)	11,736	Время прогрева τ_{w22} слоя r_{22} (с)	10,903
Капля воды объемом 15 мкл		Капля воды объемом 15 мкл	
Время прогрева τ_{w31} слоя r_{31} (с)	0,0028	Время прогрева τ_{w31} слоя r_{31} (с)	0,0026
Время прогрева τ_{w32} слоя r_{32} (с)	18,225	Время прогрева τ_{w32} слоя r_{32} (с)	16,932

На основе данных таблиц 3.7.1 и 3.7.2 можно заключить, что металлические включениягреваются значительно быстрее воды ($\tau_{Me} \ll \tau_w$). Предполагалось, что времена существования неоднородных капель τ_h должны быть распределены в соответствии с временами прогрева металлических включений τ_{Me} . При сопоставлении времен прогрева металлических включений при температуре газовой среды 850 К с представленным на рис. 3.7.5 распределением времен существования неоднородных капель жидкости при той же температуре однозначную зависимость выделить не представилось возможным. Далее, для установления закономерностей испарения рассматриваемых неоднородных капель воды приведены несколько гипотез, которые объясняют распределение времен τ_h в проведенных опытах.

Во-первых, на основе расчета теплоты, подводимой к системе «металлическое включение – вода», предполагалось, что количество

аккумулированного металлическим включением тепла является незначительным по сравнению с количеством теплоты, требуемым для парообразования воды (теплота испарения 2 МДж/кг). На рис. 3.7.6 представлены результаты расчета общего количества теплоты, подведенной к рассматриваемым неоднородным каплям воды в зависимости от используемого материала включения. Теплота парообразования воды при 373 К заметно превышает энергию, расходуемую на прогрев воды и металла, и является практически постоянной величиной. Более того, среди трех составляющих общей подведенной теплоты только количество теплоты, аккумулированной металлическим включением, изменяется в зависимости от свойств материала включения. Как следует из выражения $Q=c_p m_{in} \Delta T$ для расчета теплоты, аккумулированной металлическим включением, переменными являются удельные теплоемкости (c_p) и массы металлов (m_{in}). Таким образом, на примере испарения капель воды объемом 5 мкл и 15 мкл, содержащих различные металлические включения, при температуре газовой среды $T_g=600$ К (рис. 3.7.6) показано, что изменение времен существования неоднородных капель жидкости τ_h (рис. 3.7.3–3.7.5) обусловлено количеством теплоты, поглощенной металлическими включениями. Иными словами, в рамках данного предположения говорится о зависимости времен существования рассматриваемых капель воды от удельных теплоемкостей и масс включений.

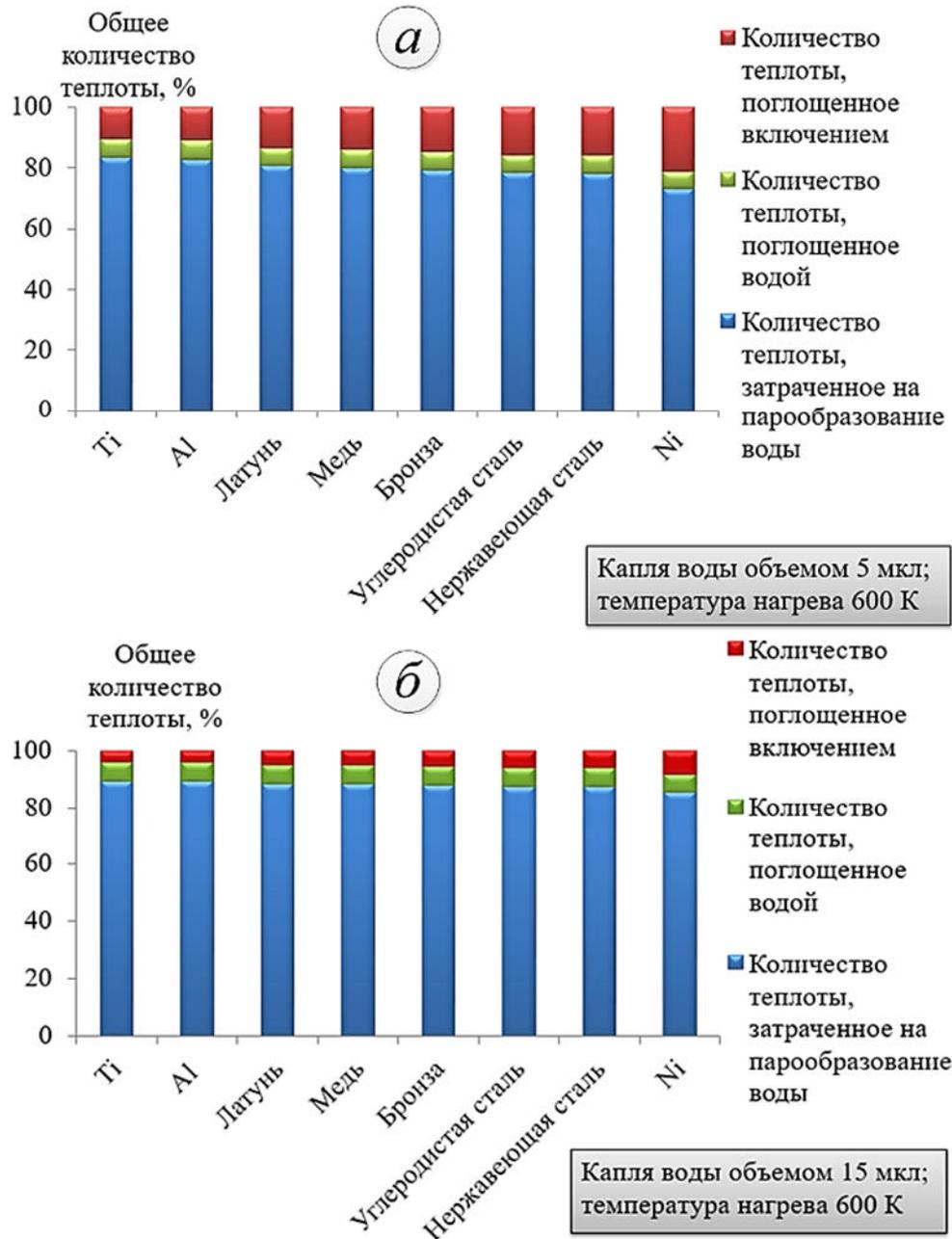


Рисунок 3.7.6. – Теплота, подводимая к системе «металлическое включение – вода», при температуре газовой среды $T_g=600$ К: капли воды объемом 5 мкл (а) и 15 мкл (б)

Следуя данному предположению, также необходимо сказать и о несущественной разнице во временах существования неоднородных капель в рассматриваемых условиях, учитывая, что теплота, аккумулированная металлом, является столь малой по сравнению с теплотой парообразования воды (рис. 3.7.6). Выделим случай с довольно большим объемом воды (рис. 3.7.6, б), где теплота,

аккумулированная металлом, несравненно мала по отношению к общему количеству теплоты, подводимому к рассматриваемой системе. Проанализировав рис. 3.7.4 и 3.7.5, подчеркивается, что разница во временах полного испарения неоднородных капель воды при средних (600 К) и высоких (850 К) температурах не является значительной и во многих случаях близка к значениям доверительных интервалов. При низких (350 К) температурах газовой среды изменения между крайними значениями времен существования неоднородных капель жидкости на гистограммах, изображенных на рис. 3.7.3, являются существенными даже при учете погрешностей измерений. Несмотря на это, о точном распределении времен τ_h при низких (350 К) температурах газовой среды речь не идет, так как этим температурам соответствуют высокие значения доверительных интервалов.

Вторым предположением относительно распределения времен существования неоднородных капель жидкости с рассмотренными металлическими включениями является довольно сложный механизм реализации фазовых превращений. Экспериментально установлено, что при нагреве гетерогенной капли воды возможны два режима теплообмена в системе «включение – пленка воды». Первый режим характеризовался полным обволакиванием металлического включения каплей воды в течение всего процесса испарения (времени τ_h). Как показано на рис. 3.7.7, б, целостность пленки жидкости вокруг металлического включения сохранялась практически до ее полного испарения. Фронт испаряющейся пленки жидкости чаще всего продвигался сверху вниз по высоте включения (рис. 3.7.7, в). Как показали видеogramмы экспериментов, время существования фронта испарения на включении в таких случаях составляло около 1–1,5 с. Рассматриваемый механизм предусматривает нагрев включения посредством теплообмена через очень тонкий слой воды, обволакивающий металл. Предполагается, что в конечном итоге нагретое включение передает теплоту обратно в слой воды, но количества этой энергии недостаточно для парообразования на границе раздела сред «металл – вода». Поэтому при реализации первого режима наблюдалось только испарение воды с приповерхностного слоя.

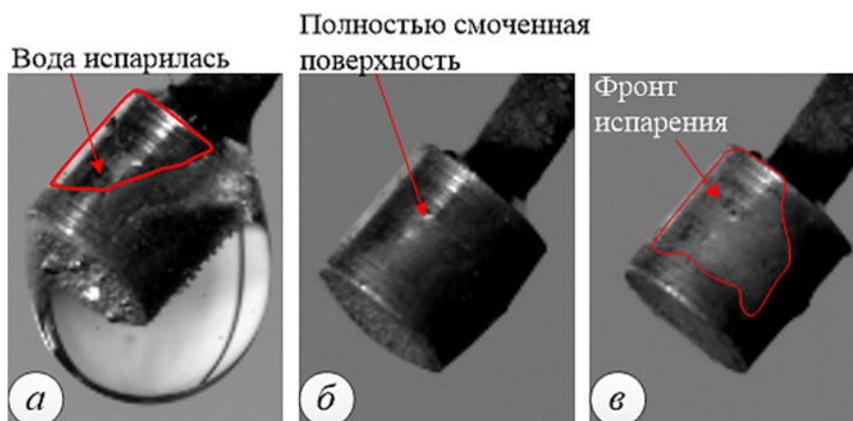


Рисунок 3.7.7. – Изображения рассматриваемой системы в случае частичного испарения пленки жидкости на включении (*а*) и полного обволакивания металлического включения каплями воды в течение всего процесса испарения (*б*); распространение фронта испарения на конечной стадии процесса (*в*)

Второй режим теплообмена в системе «металлическое включение – слой воды» характеризовался испарением пленки жидкости на поверхности включения (т.е. внутренней границе раздела сред) на начальной стадии нагрева гетерогенной капли жидкости (рис. 3.7.7, *а*). В этом случае в процессе нагрева энергия аккумулировалась не только слоем воды, но и включением. Общее количество теплоты, аккумулированное включением и слоем воды, приводило к умеренному парообразованию на границе раздела сред «металл – вода». Это иллюстрирует рис. 3.7.7, *а*. Можно отметить, что рассматриваемый режим теплообмена в некоторой степени является предпосылкой для обоснования первого предположения о неупорядоченности (отсутствии прямой связи времен τ_h только со свойствами материалов включений) распределения времен τ_h , в котором подразумевалось одновременное поглощение тепла включением и слоем воды (рис. 3.7.6).

При исследовании второго предложенного режима теплообмена важно выделить необходимость учета изменения теплофизических свойств изучаемых металлов. В частности, отмечаются два общих случая, характеризующие исследуемый режим передачи тепла:

(1) При возрастании температуры некоторых металлических образцов наблюдается снижение величины теплоемкости и увеличение коэффициента теплопроводности. Учитывая вышеизложенное, можно говорить о существенном оттоке тепла от включения в пленку воды. В таких условиях времена полного испарения неоднородных капель жидкости уменьшаются (подвод тепла к пленке происходит от газовой среды и через металлическое включение).

(2) При возрастании температуры некоторых металлических образцов наблюдается обратное – металлическое включение с меньшей теплопроводностью накапливает тепло, но при этом отток тепла в слой воды не столь интенсивен. Таким образом, времена τ_h растут.

Кроме того, передача значительной части тепловой энергии осуществляется через металлическое включение. Это отчетливо наблюдается на термограмме капли воды, содержащей металлическое включение (рис. 3.7.8). Часть поверхности металлического включения, на которой испарилась пленка жидкости, аккумулирует, очевидно, большее количество тепловой энергии по сравнению со слоем воды.

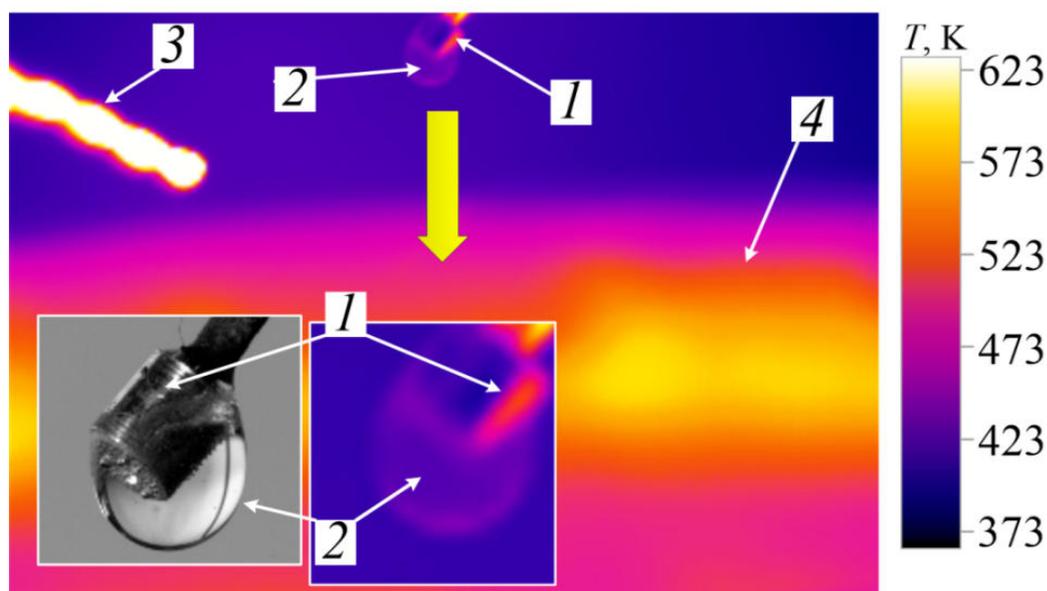


Рисунок 3.7.8. – Термограмма капли воды (2), содержащей металлическое включение (1); расположение термопары (3) относительно неоднородной капли воды и высокотемпературной газовой среды (4)

Из вышеописанного следует, что отток тепла от включения к пленке воды в какой-то мере является определяющим свойством рассматриваемой системы. Как уже отмечалось, чем выше коэффициент теплопроводности металлов, тем интенсивнее происходит отток тепла к слою воды и интенсификация испарения неоднородной капли в целом. Анализ справочных данных [177, 183–185] по изменению теплопроводности металлов с ростом их температуры частично объясняет распределение времен существования неоднородных капель τ_h при повышении температуры нагрева и объема обволакивающей включения воды. В частности, характер изменения коэффициентов теплопроводности рассматриваемых металлов при их нагреве является нерегулярным или немонотонным (для некоторых металлов этот коэффициент снижается или повышается, для других – растет, затем снижается и, наоборот).

Необходимо отметить, что дополнительно выполнен аналогичный цикл экспериментов для капель воды, содержащих металлические включения размером 1 мм. Результаты хорошо коррелируют с приведенными выше. Можно говорить об общности сформулированных заключений и выдвинутых гипотез.

На основании анализа результатов проведенных экспериментальных исследований целесообразно, во-первых, учитывать экономическую обоснованность применения того или иного металла. Напомним, что разница во временах полного испарения капель воды, содержащих различные металлические включения, например, при средних (600 К) и высоких (850 К) температурах газовой среды не являлась существенной. Таким образом, если условия эксплуатации позволяют применять широкую группу металлов и их сплавов, то рациональным решением будет – использовать наиболее доступный металл, например, алюминий. Во-вторых, при выборе и использовании определенной марки металла в химическом и нефтехимическом производствах, теплоэнергетике, атомной энергетике необходимо руководствоваться, прежде всего, рабочими и предельными или критическими (аварийными) температурами процессов, при которых будет эксплуатироваться металлическая конструкция.

Проведены дополнительные опыты при использовании медной и латунной подложек. Подложка из меди – тонкая пластинка с размерами: ширина 8 мм, толщина 1,5 мм, длина 26 мм. Подложка из латуни имеет следующие размеры: ширина 22 мм, толщина 10 мм, длина 29 мм. Одиночная капля (начальный объем: 5, 10, 15 мкл) помещалась на подложку (рис. 3.7.9) дозатором. Во всех экспериментах характерный размер пятна капли не превышал половины ширины подложки. Перед проведением каждого эксперимента подложка переворачивалась (рис. 3.7.10) для приближения условий опыта к основным экспериментам. С использованием передвижного механизма подложка с каплей перемещалась в область высокотемпературных продуктов сгорания. Для генерации последних использовался технический спирт. Исследования проведены при температурах продуктов сгорания около 600 К (соответствуют основным опытам – диапазон 350–850 К). Определялись характерные условия, механизм и времена полного испарения капли с подложки.

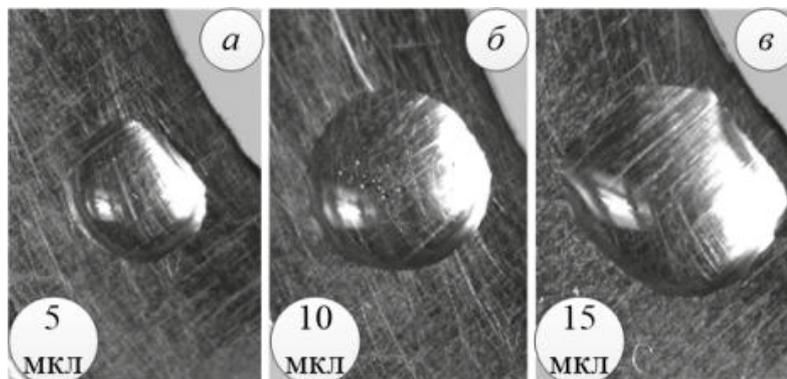


Рисунок 3.7.9. – Капли воды (начальный объем: *a* – 5 мкл, *б* – 10 мкл, *в* – 15 мкл) на медной подложке

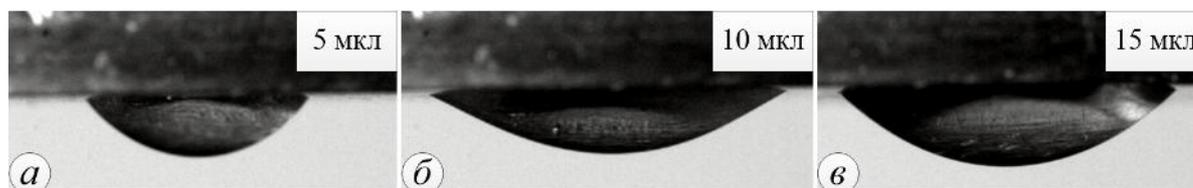


Рисунок 3.7.10. – Капли воды (начальный объем: *a* – 5 мкл, *б* – 10 мкл, *в* – 15 мкл) на медной подложке после переворота последней и введения в поток высокотемпературных газов

Времена существования капель воды на подложке и стадии реализации процесса их испарения представлены на рис. 3.7.11 и 3.7.12. На рис. 3.7.11, *a* в целом показан положительный эффект введения включений из латуни в капли воды на процесс интенсификации их прогрева и парообразования. При испарении капли воды на латунной подложке наблюдалось достаточно длительное и практически равномерное (по всей поверхности капли) испарение жидкости с внешней поверхности без образования видимой паровой прослойки на границе «подложка – пленка воды». Такое наблюдение может указывать на следующее: прогрев латунной подложки до условий, при которых достигается интенсивный отток энергии в пленку жидкости, длится достаточно долго; за это время капля воды успевает испариться в основном за счет подведенной энергии от газовой среды. Длительный прогрев обусловлен теплофизическими свойствами и размерами рассматриваемой подложки. Однако, для сравнения выполнены эксперименты с медной подложкой с существенно меньшими размерами по сравнению с латунной. Наблюдался обратный результат. Испарение капли воды на подложке (см. рис. 3.7.11, *б*) выполнялось значительно быстрее и сопровождалось образованием пузырей пара на границе «подложка – пленка воды» (см. рис. 3.7.12, *б–г*) с их дальнейшей эволюцией (рис. 3.7.12, *д–ж*). В отличие от латунной подложки, прогрев медной подложки до условий интенсивного оттока энергии в пленку жидкости реализуется гораздо быстрее (рис. 3.7.11, *б*). Отсюда и следует уменьшение времен τ_h капель воды на медной подложке по сравнению с временами τ_h капель воды на включении из меди (рис. 3.7.11, *б*), а также выполнение механизма интенсивного парообразования на внутренней границе раздела сред (рис. 3.7.12, *б–д*). Таким образом, в идентичных условиях нагрева (равенство температур газовой среды) механизмы испарения и скорости парообразования капель воды на подложке и включения существенно отличаются.

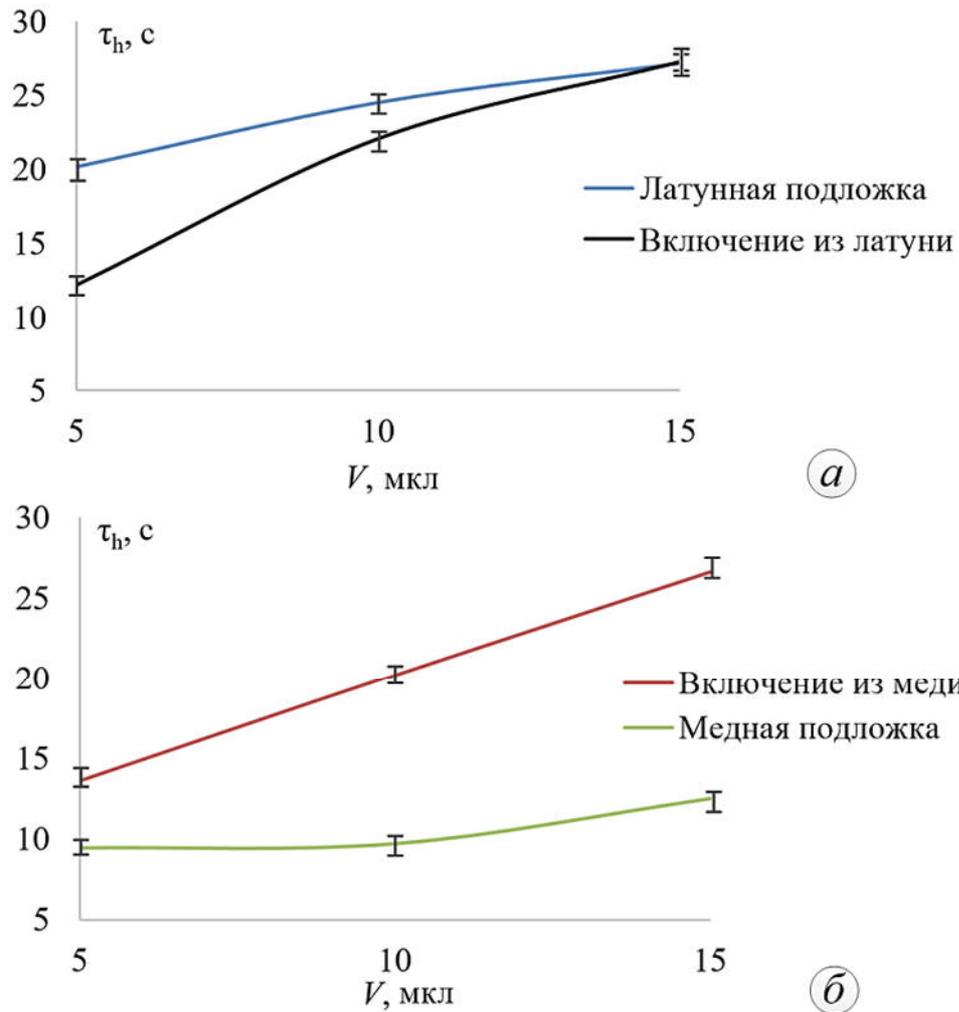


Рисунок 3.7.11. – Времена существования τ_h каплей воды на латунных подложке и включении (а), а также на медных подложке и включении (б) при температуре продуктов сгорания технического спирта T_g около 600 К

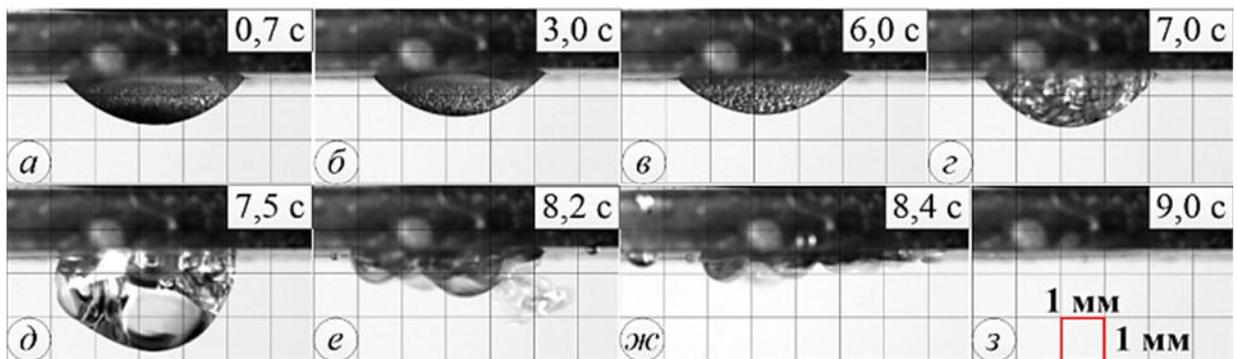


Рисунок 3.7.12. – Кадры с изображением капли в процессе ее испарения и вскипания на медной подложке

На рис. 3.7.12 представлены стадии исследуемого процесса:

- (1) прогрев капли и зарождение пузырьков на границе с подложкой (рис. 3.7.12, *a–в*);
- (2) рост пузырьков (рис. 3.7.12, *в* и *г*);
- (3) заполнение практически всей пленки паром, существенная деформация пузырей (рис. 3.7.12, *д*);
- (4) разрушение пузырей с частичным отрывом капелек (рис. 3.7.12, *е*);
- (5) завершение испарения пленки на поверхности подложки (рис. 3.7.12, *ж* и *з*).

Полученные результаты в экспериментах с относительно массивными (существенно больших размеров капель) подложками и малыми включениями иллюстрируют, что металлические включения могут быть катализаторами (ускорителями) интенсивного испарения воды. При их малых размерах можно обеспечивать условия, при которых они будут интенсивно разогреваться и интенсифицировать испарение в приповерхностном слое своих граней. Вследствие высокой теплоты парообразования воды (около 2 МДж/кг) интенсификация данного процесса приводит к значительному оттоку энергии от греющей среды. Таковой могут выступать типичные теплонагруженные поверхности энергетического оборудования. Чем больше площадь поверхности испарения воды или другой охлаждающей жидкости, тем значительнее отведенная теплота от разогретой поверхности. При этом меньшие времена полного испарения воды на включениях показывают возможность реализации кратковременного процесса охлаждения.

Выполненные по методике [203] эксперименты с неметаллической (графитовой) подложкой и включениями [203, 222] показали, что для массивных тел (на примере подложки) не характерны условия интенсивного парообразования, приводящие к взрывному разрушению капель воды, как в опытах с включениями. Можно сделать общее заключение о том, что взрывное разрушение капли, содержащей включение, возможно при полном обволакивании последнего, т.е. при покрытии всех его граней и, как следствие, подводе энергии

через пленку воды. В случае же с подложками контакт капли с ними происходит при наличии только одной общей грани. Давления паров, выделяющихся с этой границы раздела сред, недостаточно для формирования паровой прослойки с размерами, сопоставимыми с размерами включения. Фактор взрывного разрушения капли воды в высокотемпературных газах при введении в ее состав включения может быть использован в системах пожаротушения для распыления огнетушащей жидкости и покрытия большей площади очага пожара. С металлическими включениями вследствие теплофизических свойств (высокая плотность и теплопроводность) такой эффект обеспечить сложно. Поэтому пока основным приложением результатов выполненных экспериментов с металлическими включениями представляется использование фактора интенсификации испарения воды при использовании включений в системах охлаждения (основной эффект – интенсивный отвод энергии на парообразование).

3.8. Исследование нагрева и испарения неоднородных капель жидкости в различных высокотемпературных газовых средах

Изучены [222–224] особенности прогрева и испарения неоднородных капель воды в продуктах сгорания типичных жидких горючих веществ (ацетон, технический спирт, бутан-пропановая газовая смесь) и разогретом воздухе. Температура нагрева T_g в проведенных экспериментах изменялась в диапазоне 300–850 К. Определены времена существования (полного испарения) τ_h капель воды (с начальной массой 5, 10 и 15 мг) в различных условиях нагрева при варьировании размера частицы от 2 до 4 мм (форма включения – параллелепипед). Выполнено [222–224] сопоставление времен существования (полного испарения) τ_h неоднородных капель при идентичных температурах в продуктах сгорания технического спирта и разогретом воздухе.

Сравнительный анализ результатов выполненных экспериментальных исследований в разогретом воздухе и продуктах сгорания жидких горючих позволяет утверждать о значительной роли радиационного теплового потока в

процессах испарения и парообразования жидкости (рис. 3.8.1 и 3.8.2). Необходимо отметить (рис. 3.8.1 и 3.8.2) существенную разницу (до 60 %) во временах τ_h неоднородных капель, испаряющихся в разогретом воздухе и высокотемпературных продуктах сгорания рассматриваемых горючих веществ. Как в экспериментах с разогретым воздухом, так и в опытах с продуктами сгорания жидких топлив на внутренних границах раздела сред «включение – жидкость», как правило, наблюдалось умеренное образование пузырьков пара с их последующим ростом и объединением в более крупные пузырьки. В опытах, проведенных в потоке продуктов сгорания жидких топлив, процесс формирования пузырьков, в основном, обусловлен поглощением энергии излучения газов водой с последующим аккумулярованием энергии на границе «включение – жидкость». Фазовые превращения на внутренних границах замедляются на стадии формирования более крупных пузырьков пара, поскольку капля жидкости к этому моменту становится соизмеримой с их размерами.

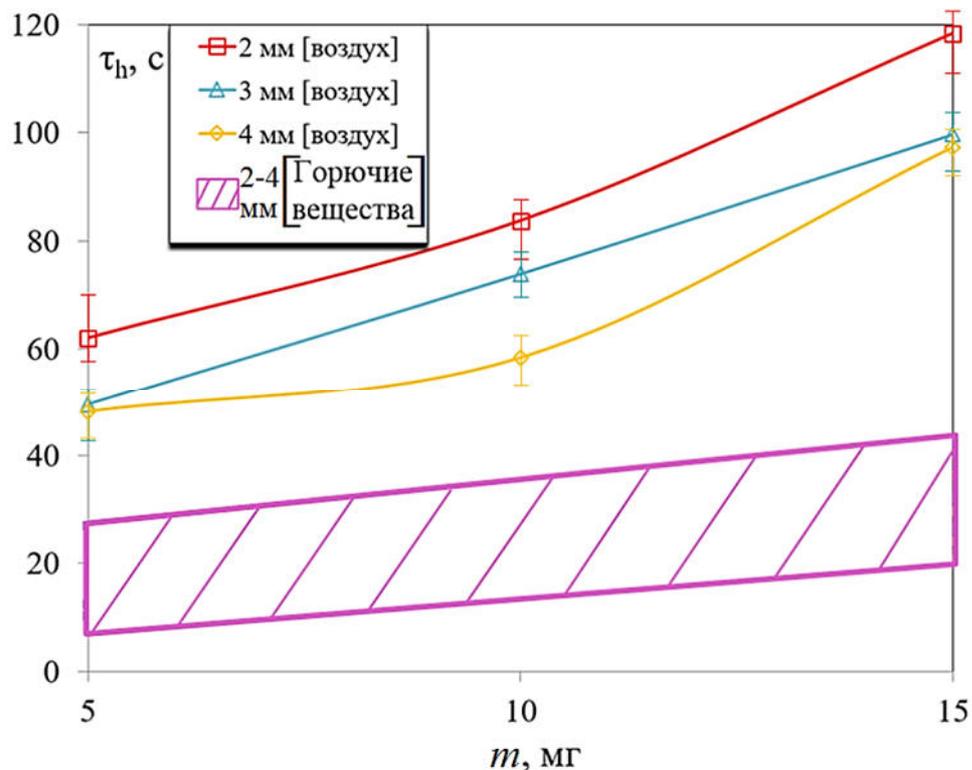


Рисунок 3.8.1. – Времена существования (полного испарения) τ_h капель воды с твердыми включениями размером d_p 2, 3 и 4 мм при возрастании температуры T_g воздуха, продуктов сгорания горючих и варьировании начальной массы воды

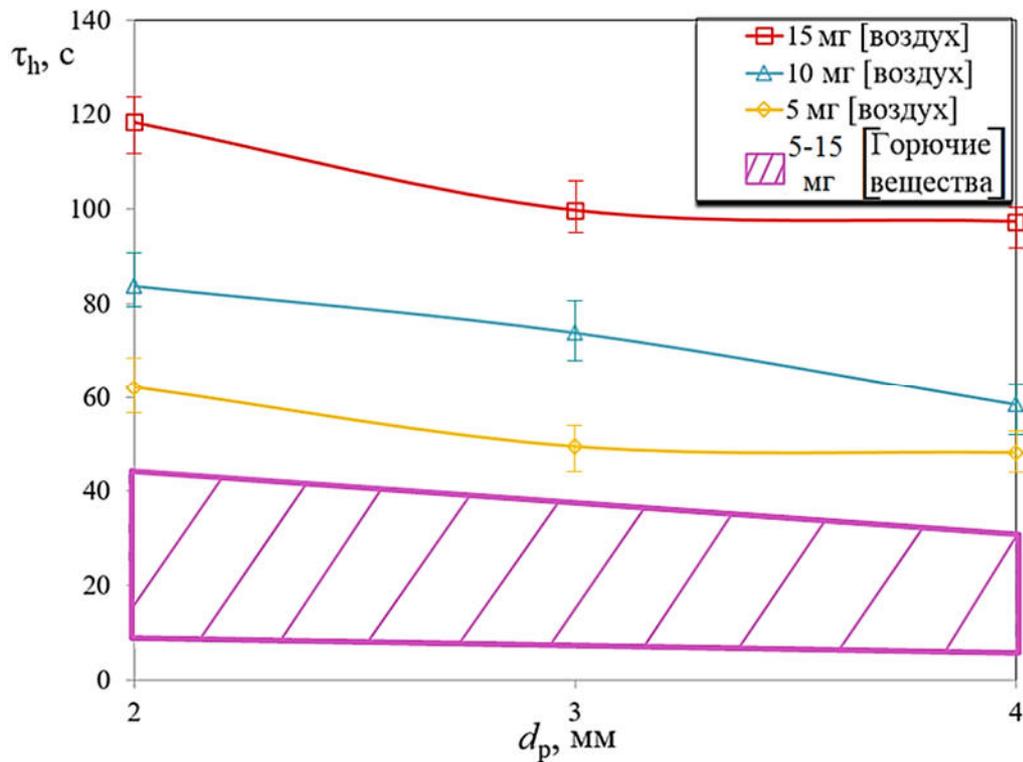


Рисунок 3.8.2. – Времена существования (полного испарения) τ_h капель воды массой 5, 10, 15 мг с твердыми включениями при возрастании температуры T_g воздуха, продуктов сгорания горючих и варьировании размеров включения d_p

На рис. 3.8.1 представлены установленные зависимости времен полного испарения τ_h капель жидкости с включениями разных размеров при варьировании температуры среды и массы обволакивающей жидкости. Увеличение площади поверхности твердого включения усиливает процесс интенсификации фазовых превращений на внутренних границах, снижая время существования τ_h капли жидкости (рис. 3.8.2). Существенная нелинейность зависимостей (рис. 3.8.1 и 3.8.2) может быть объяснена нелинейной зависимостью скорости испарения от температуры [20]. Изменение размеров включений d_p и масс жидкости данную нелинейность только усиливают. Но, безусловно, увеличение массы обволакивающей жидкости (рис. 3.8.1) и снижение размеров включений (рис. 3.8.2) увеличивают время полного испарения τ_h неоднородных капель.

На рис. 3.8.3 показаны установленные зависимости характерных времен существования (полного испарения) τ_h неоднородных (с учетом варьирования размера включения – 2, 3 и 4 мм) капель воды при разных температурах воздуха (1-3) и продуктов сгорания технического спирта (4-6). Серии экспериментов, проведенные в разогретом воздухе (1-3) при температурах менее 550 К, характеризовались значительно большими временами полного испарения жидкости с поверхности включения в сравнении с аналогичными опытами, проведенными в потоке продуктов сгорания спирта (4-6). Это обусловлено тем, что в случае испарения неоднородной капли в потоке продуктов сгорания спирта подвод тепла реализуется еще и посредством лучистого теплового потока. При более высоких температурах (более 550 К) наблюдается незначительная разница (между зависимостями 1-3 для разогретого воздуха и зависимостями 4-6 для продуктов сгорания) во временах существования неоднородных капель.

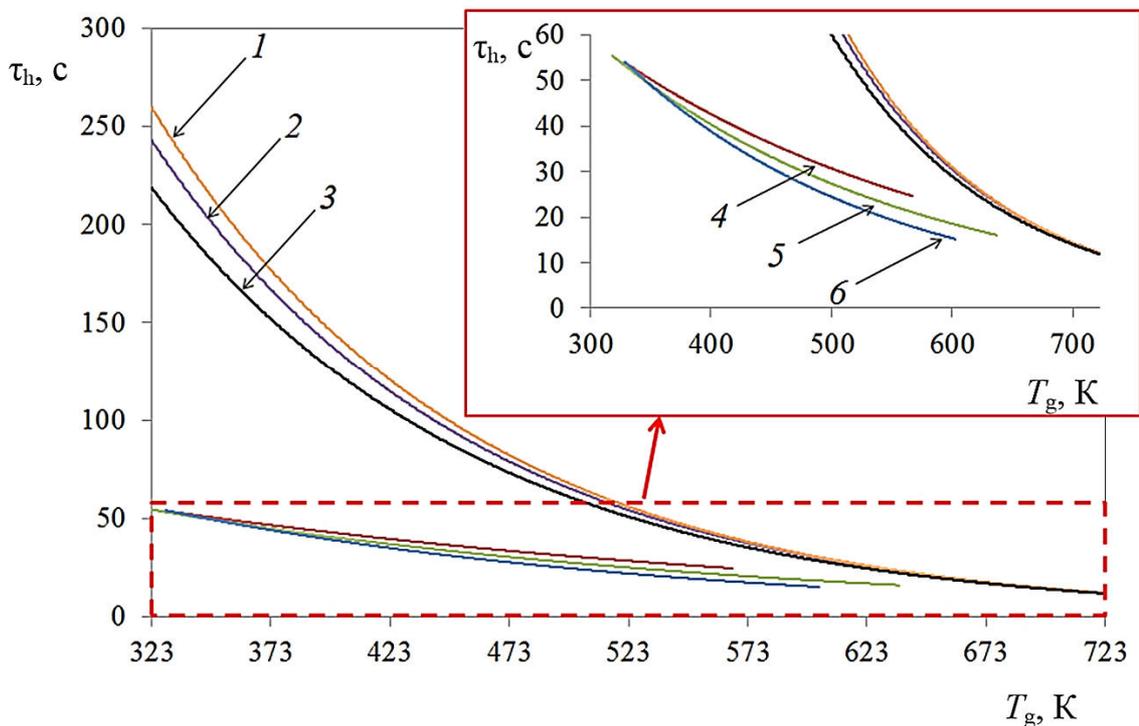


Рисунок 3.8.3. – Времена существования (полного испарения) τ_h неоднородных (с учетом варьирования размера включения d_p) капель воды при разных температурах воздуха (1-3) и продуктов сгорания (4-6)

Комментарий: размах значений времен существования τ_h при нагреве в потоке продуктов сгорания составлял не более 9 с; в потоке разогретого воздуха – не более 6 с.

Для опытов, проведенных в разогретом воздухе при температурах менее 550 К, можно отметить существенную разницу времен полного испарения капель жидкости в зависимости от характерного размера (длины) включения. Это объясняется повышением интенсификации фазовых превращений на внутренних границах раздела сред за счет увеличения площади поверхности твердого включения. С ростом температуры воздуха влияние размеров включения на времена полного испарения становится незначительным.

Следует отметить, что в проведенных опытах помимо испарения с внешней поверхности и парообразования на внутренних границах наблюдалось интенсивное кипение с последующим распадом капли жидкости (времена реализации – до 5 с). При нагреве неоднородных капель разогретым воздухом случаи интенсивного парообразования с взрывным дроблением слоя жидкости были единичные поскольку, как установлено ранее, характерная температура нагрева до условий «взрыва» составляет минимум 850 К. Дробление слоя жидкости неоднородных капель, нагреваемых в высокотемпературных продуктах сгорания горючих, стабильно реализовывалось при температурах T_g более 650 К. Однако, при нагреве капель в тепловом потоке, сформированном при сжигании бутан-пропановой смеси, интенсивное парообразование с эффектом взрывного распада не зарегистрировано даже при максимальной для данных экспериментов температуре.

3.9. Изменение конфигурации поверхности неоднородных капель жидкости при высокотемпературном нагреве

Выполнен [223, 225] анализ особенностей формирования капель воды с твердыми включениями при нагреве в высокотемпературных газах (с учетом разнонаправленности движения теплового потока). Проведенные эксперименты [213, 222, 226–230] позволили установить доминирующие механизмы и временные характеристики фазовых превращений для каждого из выделенных

положений границ раздела сред «жидкость – газ» и «жидкость – твердое тело». Проведена тепловизионная съемка процесса интенсивного нагрева исследуемой системы «неоднородная капля жидкости – керамический стержень». Выполнено экспериментальное исследование испарения неоднородных капель воды при их движении через высокотемпературную газовую среду и каплю воды на неподвижной графитовой подложке при нагреве.

Проведенные на разработанных стендах эксперименты позволили сделать вывод о том, что в реальной практике обволакивание включения водой может реализовываться по двум сценариям. Типичным случаем формирования неоднородной капли жидкости является частичное обволакивание включения каплями воды (рис. 3.9.1, б). Другой не менее характерный случай – это полное обволакивание включения (рис. 3.9.1, а). В проведенных экспериментах установлено, что полное обволакивание может реализовываться, как правило, при малых объемах генерируемых капель. В частности, при объеме 5–7 мкл вокруг включения с характерными размерами 2 мм формировалась пленка воды с размерами до 1 мм. При этом не происходило стекание капли, и все включение покрывалось практически равномерной пленкой. При увеличении размеров включения или объема генерируемой капли воды реализовывались условия частичного стекания последней под действием силы тяжести (например, рис. 3.9.1, а).

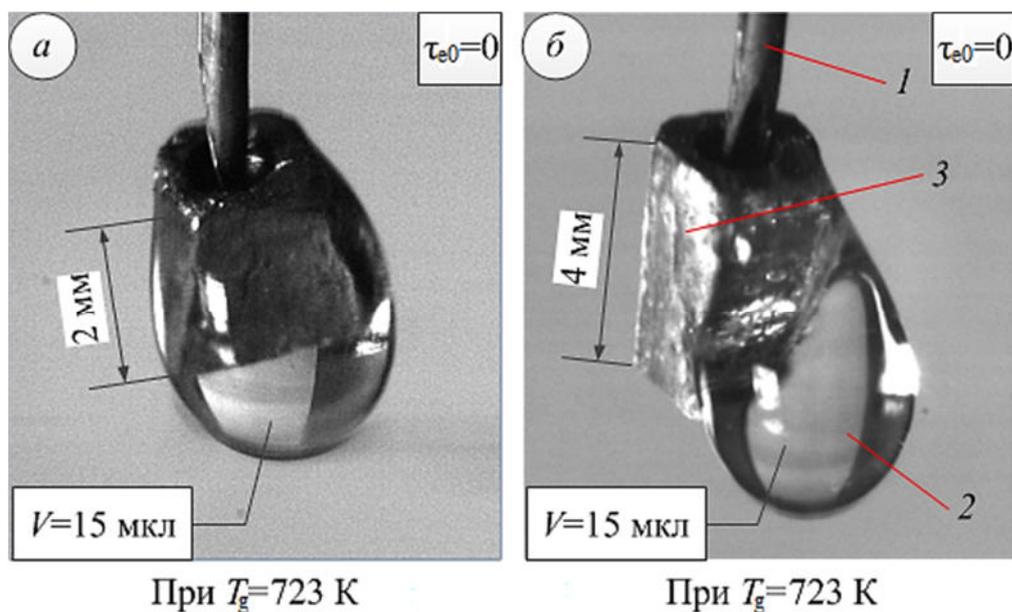


Рисунок 3.9.1. – Рассмотренные варианты обволакивания жидкостью включения (1 – стержень; 2 – капля воды; 3 – твердое включение):

а – полное, *б* – частичное

Установлено, что при нагреве неоднородной капли жидкости в высокотемпературной газовой среде процесс интенсивного кипения и парообразования осуществляется значительно быстрее в случае, когда тепловой поток подводится к включению, а затем последнее начинает прогревать каплю.

Для выделения этого эффекта проведены контрольные эксперименты с двумя каплями на одном включении. На рис. 3.9.2 видно, что фазовые превращения второй капли воды по отношению к направлению потока воздуха происходят умеренно до тех пор, пока первая капля не испарится полностью. Затем наблюдается интенсивное образование парового слоя на границе раздела сред «твердое включение – капля воды» и кипение жидкости. Необходимо отметить, что при проведении опытов в разогретом воздухе ($T_g=623$ К) процесс интенсивного парообразования гетерогенной капли с ее взрывным распадом не зарегистрирован, что позволяет утверждать о существенной роли лучистой составляющей теплообмена в достижении условий исследуемого процесса.



Рисунок 3.9.2. – Типичные кадры видеogramм процессов испарения и кипения двух капель воды (начальный объем капель 7 мкл) с поверхности графитового включения (характерный размер 2 мм) в разные моменты времени при температуре воздуха $T_g=623$ К: *a* – 6 с; *б* – 14 с; *в* – 15 с; *г* – 16 с; *д* – 18 с; *е* – 22 с

Выполненные диссертационные исследования показали, что одним из условий интенсификации фазовых превращений капли жидкости является увеличение площади поверхности теплообмена. Далее, приведены результаты исследований, в которых неоднородная капля жидкости формируется из двух включений (рис. 3.9.3).

Рассмотренный вариант системы «капля воды – два включения» показал, что такие процессы как интенсивное кипение и образование, слияние пузырьков происходят непосредственно с момента начала нагрева гетерогенной капли в газовой среде. На рис. 3.9.3, *б* и *в* наблюдается процесс слияния пузырьков пара на границе раздела сред и последующий рост единичного пузырька с увеличением размера неоднородной капли относительно начального. При превышении давлением пара критических значений давления, вызванного силами поверхностного натяжения и внешней среды, происходили «взрывы» пузырьков пара. На рис. 3.9.3, *г* изображена капля воды после схлопывания («взрыва») единичного пузырька пара. Последствия взрывного парообразования могут быть разными (образование группы небольших капель или крупных агломератов жидкости, схлопывание пузырьков пара без распада капли воды). В данном случае (рис. 3.9.3) распад капли воды на группу мелких капель или крупные агломераты не наблюдался.

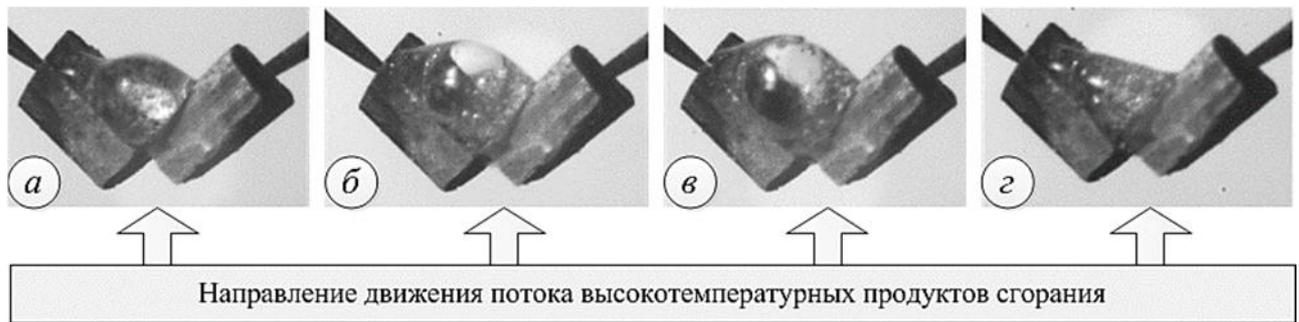


Рисунок 3.9.3. – Типичные кадры видеogramм процессов испарения и интенсивного парообразования капли воды (начальный объем 15 мкл), заключенной между двух графитовых включений (характерный размер d_p для каждого 3 мм), в разные моменты времени при нагреве в потоке продуктов сгорания технического спирта (температура газовой среды $T_g=650$ К): $a - 0,33$ с; $б - 3$ с; $в - 3,45$ с; $г - 4$ с

Выбор способа генерации и закрепления гетерогенной капли в высокотемпературной газовой среде с использованием держателя (керамического стержня) обусловлен несколькими причинами. Для исследования условий полного испарения (или взрывного распада) движущихся гетерогенных (с размерами, соответствующими проведенным опытам) капель необходимы довольно протяженные каналы (предварительные оценки динамики исследуемых процессов показали, что длина таких каналов должна составлять не менее 7–10 м). Создание стендов с такими каналами и выделение помещений для их размещения почти невозможно. Поэтому исследования проводились с закрепленными на стержне каплями (наиболее близкий с физической точки зрения вариант). К тому же, предварительные эксперименты показали, что в процессе движения капля включение в последних непрерывно перемещалось. Этот фактор не позволял в полной мере изучить особенности испарения на внутренних границах раздела сред (выделить стадии, определить их длительности и т.д.).

Проведенные на разработанном стенде (рис. 2.2.1) предварительные эксперименты с движущимися (в режиме свободного падения) неоднородными каплями воды через высокотемпературные газы позволили сделать вывод о том,

что в реальной практике положение твердых включений в капле может быть различным. В частности, включения могут располагаться в глубине капли, быть смещены относительно центра масс к поверхности, частично выступать над поверхностью. В предварительно проведенных экспериментах с единичным включением выявлено, что последнее чаще всего смещается относительно центра масс (или условной оси симметрии) падающей капли. При этом для условий падения капель можно выделить неединичные случаи частичного выступления включения за их поверхности.

Механизм подвода энергии внешней газовой среды к внутренней границе раздела сред «включение – жидкость» существенно зависит не только от условий обволакивания пленкой жидкости включения, но и теплофизических свойств последнего. Проведенные оценки характерных времен прогрева материала включения и воды показали, что при теплофизических характеристиках воды [182] и графита (см. п. 2.3), и идентичном слое размером 2 мм для воды они составляют несколько десятков секунд, для графита – много меньше секунды. Если учесть, что толщина пленки воды в несколько раз меньше поперечного размера включения, то разница между полученными временами прогрева графита и воды для проведенных экспериментов уменьшится (например, при толщине пленки жидкости 0,25 мм время ее прогрева составит около 0,5 с, а такой результат сопоставим с временем прогрева слоя графита размером 2 мм). Из анализа возможных диапазонов изменения времен прогрева воды и включений можно предположить, что для усиления эффекта взрывного дробления (распада) капли целесообразно применять материалы частиц с меньшей теплопроводностью по сравнению с жидкостью. В проведенных экспериментах контакт графитового включения с продуктами сгорания происходил только на заключительной стадии (длительность процесса испарения жидкости в таком режиме составляла лишь 10–15 % от общего времени полного испарения). Считать определяющей роль прогрева включения в проведенных экспериментах нет оснований (особенно в экспериментах с взрывным дроблением).

На рис. 3.9.4 видно, что прогрев неоднородной капли жидкости интенсивно реализуется в ее верхней части (через тонкую пленку воды или непосредственно через поверхность твердого включения). На рис. 3.9.4, б (термограмма системы «неоднородная капля жидкости – керамический стержень»), сделанная позднее по времени по сравнению с изображенной на рис. 3.9.4, а) верхняя грань нагрета до температуры около 570 К, в то время как температура в месте соединения стержня с неоднородной каплей ниже приблизительно 370 К.

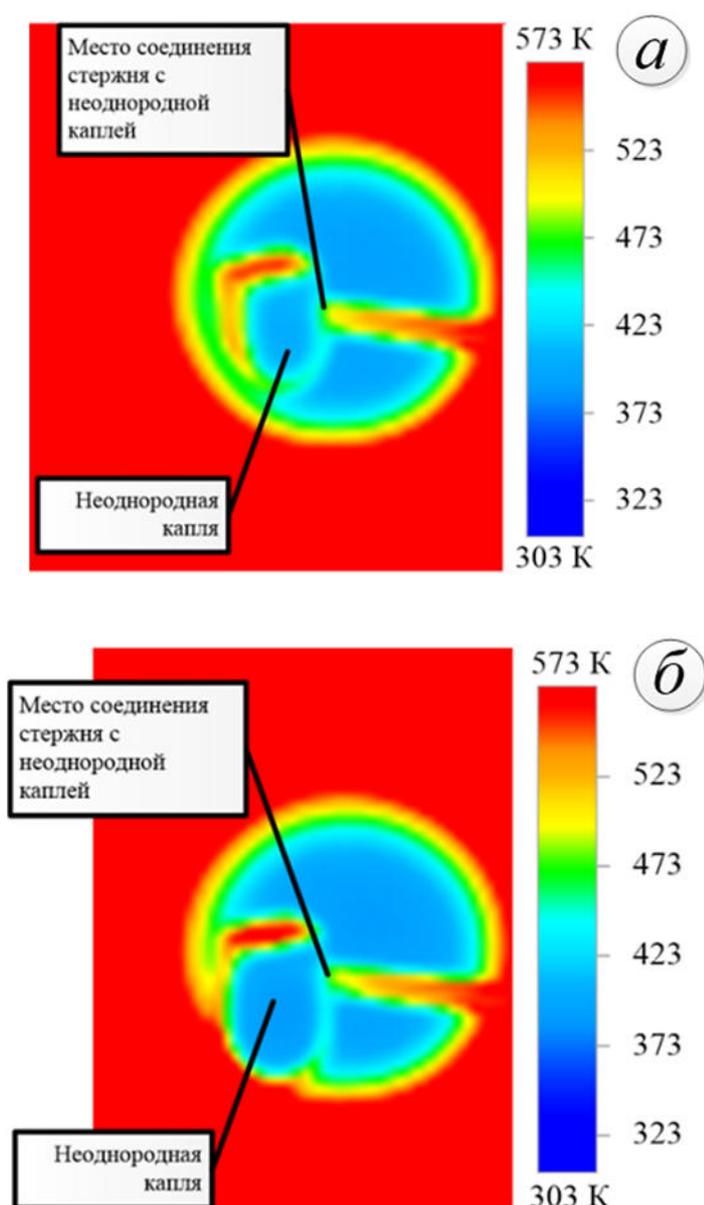


Рисунок 3.9.4. – Термограммы неоднородных (с твердым включением размером 2 мм) капель воды (с начальным объемом жидкости 10 мкл) при нагреве в муфельной печи в различные моменты времени (а, б)

Приведенные термограммы доказывают, что влияние стержня (из материала с низкой теплопроводностью) на характеристики нагрева неоднородной капли не является определяющим, поскольку в месте контакта включения с заостренным концом керамического держателя не обеспечивается достаточного стока тепла за время существования жидкости на твердом включении (рис. 3.9.4). В проведенных экспериментах [207] интенсивное зарождение пузырьков пара регистрировалось на поверхности включения (на границе контакта «вода – керамический стержень» такие пузырьки не наблюдались). Поэтому перенос тепла через малый по площади участок «вода – керамический стержень» к поверхности включения можно не учитывать [207] при анализе результатов исследований.

Установлено, что выделенные условия интенсивного испарения неоднородной капли существенно отличаются от кипения жидкости на подложке (разогретой стенке). Проведены дополнительные эксперименты. Изготовлена подложка в форме вытянутого стержня с прямоугольным поперечным сечением (характерные размеры: ширина 10 мм, толщина 3 мм, длина 100 мм). Одиночная капля (начальный объем: 5, 10, 15 мкл) помещалась на подложку дозатором. Во всех экспериментах характерный размер пятна капли не превышал половины ширины подложки (капля размещалась на оси симметрии). Перед проведением каждого эксперимента подложка переворачивалась для приближения условий опыта к основным экспериментам. С использованием моторизованного координатного устройства подложка с каплей перемещалась в область высокотемпературных продуктов сгорания. Исследования проведены при температурах продуктов сгорания около 600 К.

На рис. 3.9.5 приведены типичные стадии реализации процесса интенсивного парообразования капли воды (массой 15 мг) на подложке. Выделены времена нагрева, характерные каждой стадии. Следует отметить, что для данного варианта свойственно интенсивное образование парового слоя вблизи границы раздела сред «жидкость – твердое тело». Как видно из рис. 3.9.5,

a и *в*, капля воды за время нагрева 12,5 с практически не уменьшилась в размерах, а паровой слой за это время заполнил почти всю ее внутреннюю полость. Из особенностей образования парового слоя (рис. 3.9.5, *a*, *б* и *в*) можно выделить мгновенное (менее секунды с момента начала нагрева) формирование пузырьков пара (а также их слияние, укрупнение и отрыв) вблизи внутренней границы раздела сред «твердое тело – жидкость». Доминирующим механизмом фазовых превращений в данном случае являлось интенсивное парообразование на границе «подложка – жидкость». Рис. 3.9.5, *г* иллюстрирует некоторое перемещение (относительно начального положения) капли воды вследствие роста размеров парового слоя и отделения фрагментов жидкости (групп мелких капель) после разрушения пленки, вызванного критическим увеличением пузырьков пара. Перемещение капли жидкости в свою очередь можно объяснить эффектом Лейденфроста [231, 232]. Сформированный паровой слой с более низкой теплопроводностью [182] по сравнению с водой является своего рода теплоизолирующей прослойкой («буферной» зоной), уменьшающей площадь контакта жидкости с подложкой и обеспечивающей «скольжение» капли. На данной стадии (рис. 3.9.5, *г* и *д*) особенностью являлось часто повторяющееся разрушение целостности пузырьков пара, сопровождающееся отделением фрагментов жидкости.

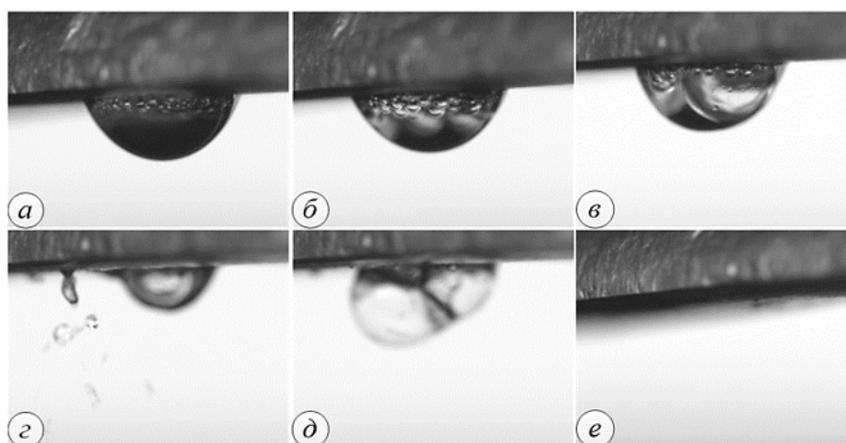


Рисунок 3.9.5. – Кадры с изображением капли (массой 15 мг) в процессе испарения и кипения на подложке:

a – 0 с, *б* – 8,20 с, *в* – 12,50 с, *г* – 20,20 с, *д* – 20,54 с, *е* – 25,65 с

Типичные стадии реализации нескольких механизмов фазовых превращений (кипение и испарение) представлены на рис. 3.9.6.

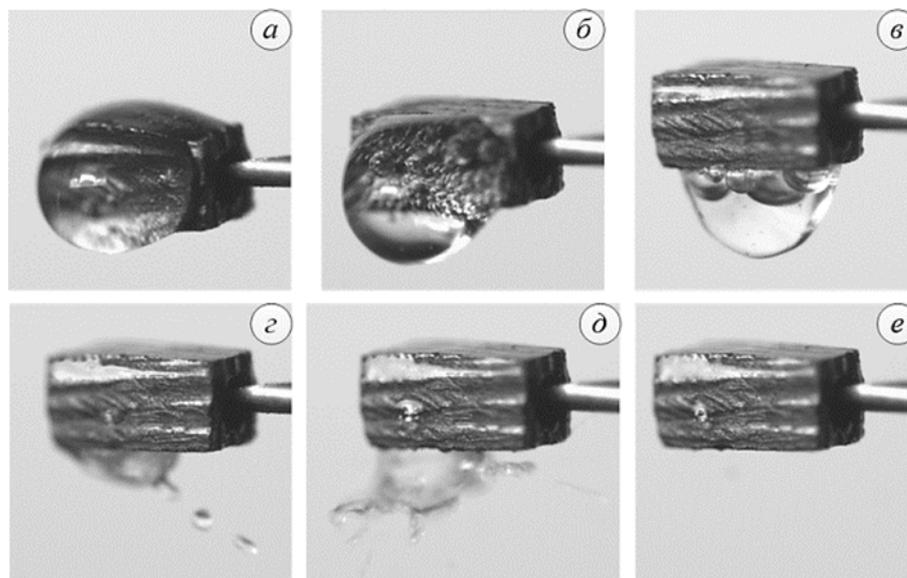


Рисунок 3.9.6. – Кадры с изображением закрепленной на керамическом стержне неоднородной капли (массой 5 мг) в процессе испарения и кипения: *a* – 0 с, *б* – 1,25 с, *в* – 7,47 с, *г* – 12,56 с, *д* – 13,52 с, *е* – 13,83 с

На рис. 3.9.6, *a–в* признаки интенсивного парообразования на границе раздела сред «включение – вода» не наблюдаются, как в случае с подложкой (рис. 3.9.5, *a–в*) при соответствующих временах. На рис. 3.9.6, *a* видно, что включение полностью покрыто жидкостью. Можно утверждать о том, что первоначально прогревается слой жидкости, и только затем твердое включение (в отличие от случая с подложкой, где обеспечивается контакт последней с газами). Прогрев слоя жидкости (рис. 3.9.6, *a–в*) сопровождается испарением с внешней поверхности капли. По истечении 7,5 с (рис. 3.9.6, *в*) характерный размер капли стал значительно меньше относительно начального. Количество энергии, аккумулируемой включением на границе раздела сред, существенно увеличивается, когда характерная толщина пленки воды вокруг включения уменьшается (несколько граней включения в этот момент покрыты лишь тонкой

пленкой жидкости). При этом значительно интенсифицируется парообразование внутри капли. Далее, процесс развивался аналогично нагреву капли на подложке (рис. 3.9.5, *г–е*) – происходило кипение жидкости, сопровождающееся разрушением пленки воды.

В случае испарения капли воды с подложки определяющую роль в достижении условий интенсивного парообразования на границе раздела сред играла не столько высокая температура газовой среды, сколько массивность графитовой подложки (по сравнению с размерами капли). При одновременном прогреве подложки и жидкости (в отличие от случая на рис. 3.9.6, *а*) обеспечивался существенный приток аккумулируемой подложкой энергии к внутренней границе раздела сред «твердое тело – жидкость» вследствие большей теплопроводности графита (см. таблицу 2.3.1) по сравнению с водой [182].

На рис. 3.9.7 представлены результаты сопоставления времен существования (полного испарения) τ_h капель воды на подложке (1) и неоднородных капель с твердыми включениями различных размеров (2 – 4 мм, 3 – 3 мм, 4 – 2 мм) при идентичных условиях нагрева. Для неоднородных капель воды (2–4) можно сделать вывод о том, что при увеличении площади поверхности включения время τ_h значительно снижается. Чем больше площадь поверхности включения, тем больше энергии аккумулируется у последней после прохождения через слой жидкости (за счет радиационного, конвективного и кондуктивного тепловых потоков). Вследствие непрозрачности включения поток излучения после прохождения через воду аккумулируется у его поверхности (в малом приповерхностном слое). Увеличение площади контакта включения со слоем жидкости интенсифицирует отток аккумулированной им тепловой энергии в выделенный выше приповерхностный слой. Наблюдается интенсивное парообразование на границах раздела сред «жидкость – включение». Возрастают скорости парообразования на внутренних и внешних границах раздела сред. Отметим, что при увеличении массы воды неоднородной капли от 5 мг до 15 мг время полного испарения увеличилось почти вдвое (рис. 3.9.7). В случае испаряющейся на подложке капли воды установлено более умеренное изменение

τ_h . Время существования капли при увеличении массы жидкости от 5 мг до 15 мг изменяется лишь на $\Delta\tau_h \approx 5$ с (рис. 3.9.7). Такие большие времена полного испарения капель (близкие к значениям для неоднородных капель), а также их незначительное изменение с ростом массы воды обусловлены формированием теплоизолирующего парового слоя [231, 232] между подложкой и каплей (рис. 3.9.5, б и в), который и замедляет процесс испарения.

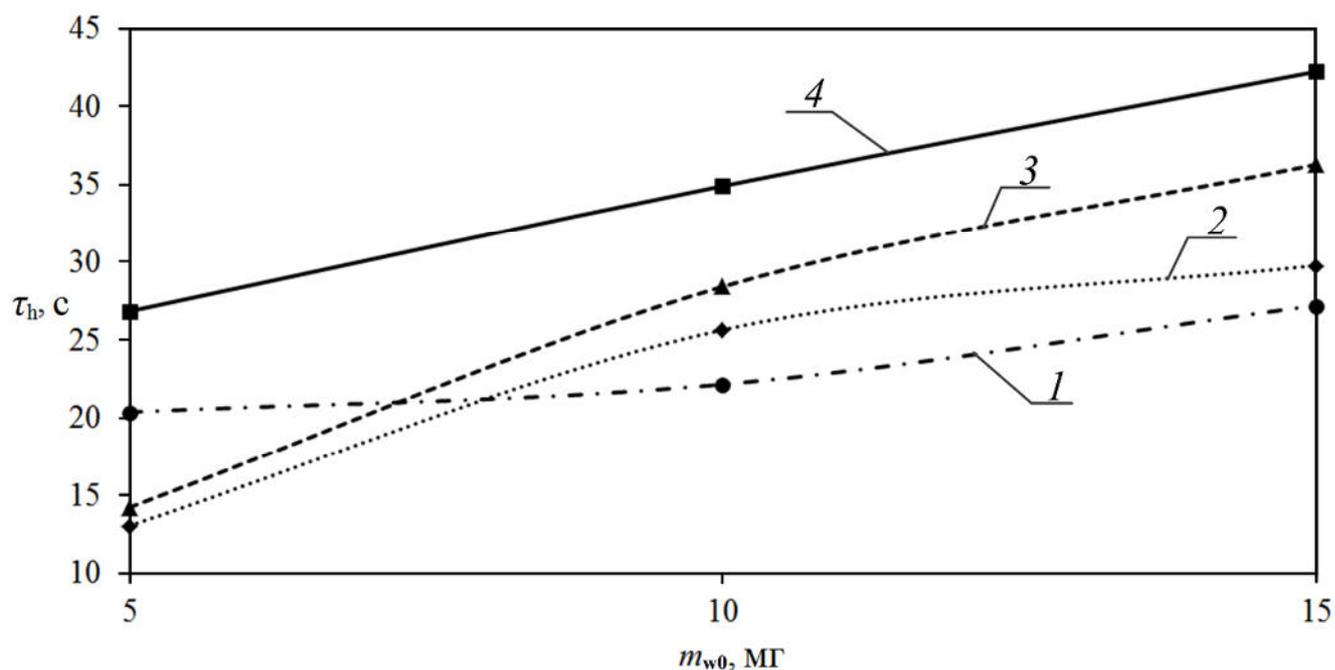


Рисунок 3.9.7. – Времена существования (полного испарения) τ_h капель воды на подложке (1) и при полном обволакивании включений с различными характерными размерами d_p (2 – 4 мм, 3 – 3 мм, 4 – 2 мм)

Комментарий: размах значений времен существования τ_h капель воды на подложке и при полном обволакивании включений составлял не более 2,5 с.

Представленные на рис. 3.9.8, а и б результаты экспериментов иллюстрируют влияние площади поверхности включения на интенсивность испарения неоднородной капли. Следует отметить, что в данном случае основным механизмом фазовых превращений являлось испарение с внешней поверхности неоднородной капли воды (на выходе из высокотемпературной среды в капле формирование парового слоя на границе раздела среда «включение – вода» не зарегистрировано). В отличие от экспериментов на рис. 3.9.5 и 3.9.6, при

кратковременном нагреве (0,3–0,5 с в режиме свободного падения в канале высотой 1 м) неоднородной капли включение, обладающее меньшей площадью поверхности, прогревалось быстрее, и, соответственно, убыль массы жидкости Δm_w увеличивалась (рис. 3.9.8, а). Убыль массы воды неоднородной капли приводила к уменьшению размеров капли (рис. 3.9.8, б). При увеличении начальной массы воды m_{w0} регистрировалось снижение параметров Δm_w и ΔR (рис. 3.9.8, а и б). Такой результат можно объяснить ростом времени прогрева слоя жидкости, а, следовательно, и включения. Таким образом, влияние твердого включения на интенсификацию процесса испарения при кратковременном прогреве можно считать достаточно умеренным.

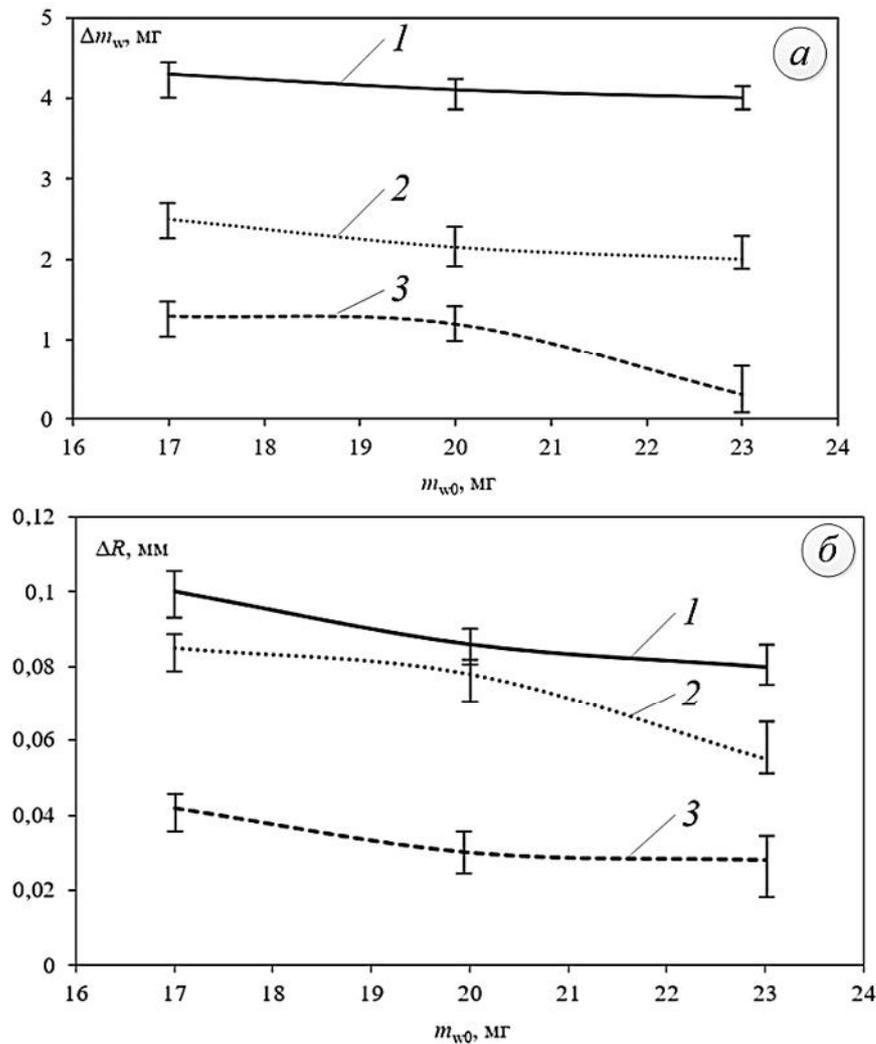


Рисунок 3.9.8. – Зависимости параметров Δm_w (а) и ΔR (б) от начальной массы воды m_{w0} при разных формах включений: 1 – цилиндр, 2 – куб, 3 – параллелепипед

В проведенных экспериментах на поверхности капли определяющую роль играли конвективный и лучистый теплообмен с газами. Соответствующие тепловые потоки можно определить (в первом приближении) с использованием выражений вида [208, 233]: $q_c = \alpha(T_g - T_c)$ и $q_l = \varepsilon\sigma(T_g^4 - T_c^4)$. В соответствии с [234, 235] условия теплообмена на поверхности капли описываются с использованием соотношения Ранца–Маршалла $Nu = 2 + 0,6Re^{1/2}Pr^{1/3}$. Для условий проведенных экспериментов с продуктами сгорания при таком подходе значения коэффициента теплообмена α не будут превышать 5–7 Вт/(м²·К).

Коэффициент ε для условий нагрева газами испаряющейся жидкости определяется с учетом излучательных свойств газов (продуктов сгорания) и паров. Спектр излучения газов, входящих в состав продуктов сгорания спирта, как и других горючих жидкостей (прежде всего водяной пар и углекислый газ), характеризуется так называемыми полосами излучения (поглощения), связанными с изменениями состояния молекул и атомов. Основными полосами спектров излучения углекислого газа и водяного пара являются [236]: $\lambda_{1CO_2} \approx 2,65$ – $2,8$ мкм, $\lambda_{2CO_2} \approx 4,15$ – $4,45$ мкм, $\lambda_{3CO_2} \approx 13$ – 17 мкм, $\lambda_{1H_2O} \approx 2,3$ – $3,4$ мкм, $\lambda_{2H_2O} \approx 4,4$ – $8,5$ мкм, $\lambda_{3H_2O} \approx 12$ – 30 мкм. Наличие полос спектров излучения основных (излучающих) компонентов продуктов сгорания следует учитывать при вычислении приведенной степени черноты высокотемпературной газовой среды. Ее расчёт можно провести в соответствии со средним значением объёмных долей соответствующих компонентов в продуктах сгорания спирта (значения объёмных долей CO₂ получены с использованием газоанализатора, объёмная доля паров воды в продуктах сгорания принималась усреднённой в соответствии со справочными данными [236]), оптической толщиной газов и их температурой. Важно отметить, что пары воды являются одним из основных «генераторов» излучения в системе «продукты сгорания – пары воды – капля». В соответствии с экспериментальными данными [4, 6] в малом приповерхностном слое капли их концентрация может быть очень высокой. Поэтому радиационная составляющая будет только расти. С использованием справочных данных [236] для

установленных концентраций компонентов продуктов сгорания (CO_2 – 4,433 %, CO – 0,058 %, O_2 – 14,907 %, NO – 0,002 %, NO_x – 0,002 %, N_2 и другие углеводородные компоненты – 80,598 %) и температуры 1100 К установлено среднее значение коэффициента ε , равное 0,254.

Максимальная температура поверхности капли воды (T_e) в соответствии с современными представлениями о фазовых превращениях жидкости может составлять 370 К (температура кипения воды). Численное моделирование [133, 203, 228] показало, что такие температуры достигаются на поверхности неоднородных капель через несколько секунд с начала нагрева при температуре газов 1100 К.

При таких исходных данных установлены значения конвективного (q_c) и лучистого (q_l) тепловых потоков на поверхности капли: $q_c = \alpha(T_g - T_e) = 5(1100 - 370) \approx 3650 \text{ Вт/м}^2$, $q_l = \varepsilon \sigma (T_g^4 - T_e^4) = 0,254 \cdot 5,669 \cdot 10^{-8} \cdot (1100^4 - 370^4) \approx 20812 \text{ Вт/м}^2$.

Анализ q_c и q_l показал, что в экспериментах с движущимися каплями конвективные и лучистые тепловые потоки могут быть сопоставимы лишь при высоких (более 5–7 м/с) скоростях движения. В проведенных опытах таких условий не было, так как исследования проводились для условий свободного падения. К тому же, из анализа экспериментов [237, 238] можно заключить, что при таких скоростях движения высока вероятность существенной трансформации поверхности и последующего дробления капли.

Роль лучистого теплообмена капли жидкости с продуктами сгорания усиливается за счет непрозрачного включения с высокой приведенной степенью черноты. Моделирование [133, 203, 228] показало, что 30–40 % подведенной лучистой энергии поглощается включением внутри капли. Остальная энергия расходуется на прогрев и испарение воды на внешней (свободной) поверхности, а также внутренних границах раздела сред (у поверхности включения). Как следствие, можно сделать вывод о доминировании радиационной составляющей в механизмах теплообмена неоднородных капель жидкости с высокотемпературными продуктами сгорания.

Для оценки отличий времен полного испарения воды (с идентичной начальной массой) на подложке и вокруг включения при разных температурах нагрева проведены соответствующие эксперименты. Температура продуктов сгорания варьировалась в диапазоне от 350 К до 650 К. На рис. 3.9.9 приведены основные результаты.

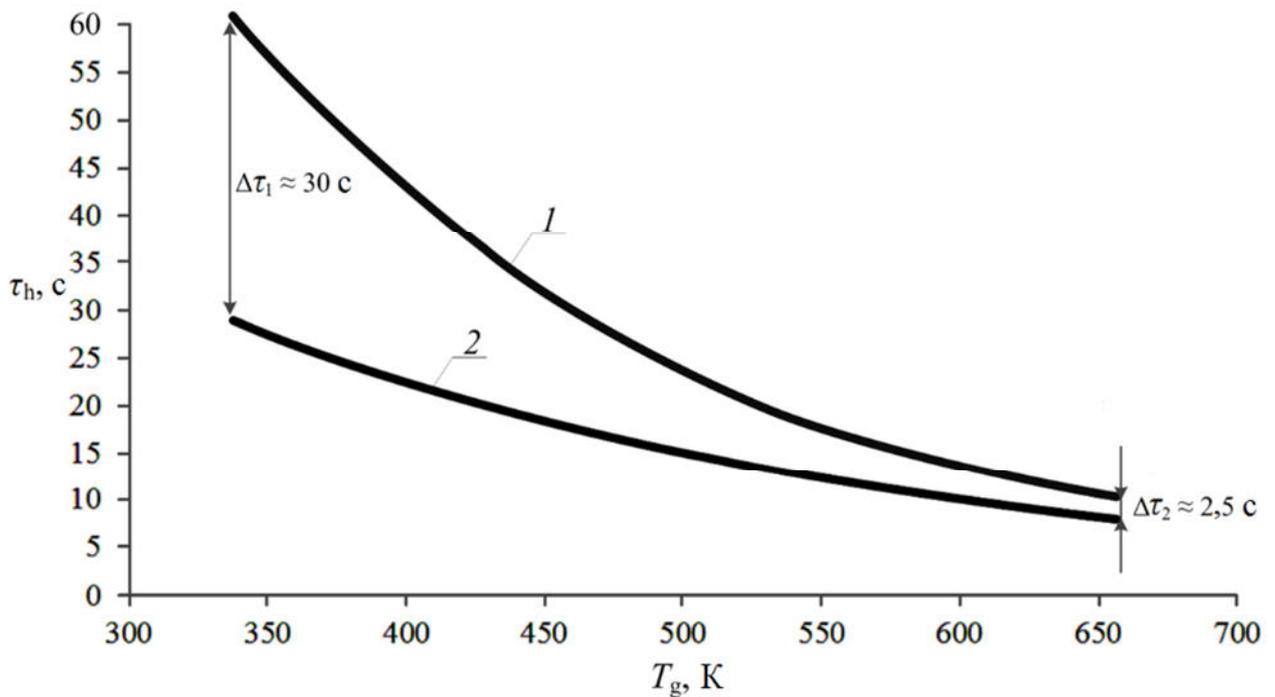


Рисунок 3.9.9. – Времена существования τ_h капли воды (массой 10 мг) для случая с обволакиванием включения (1) и на подложке (2) при разных температурах T_g

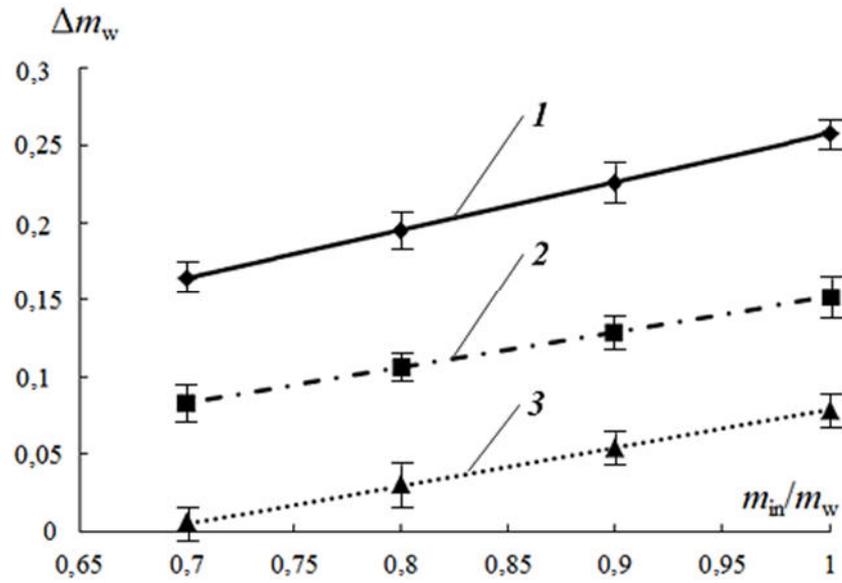
Комментарий: размах значений времен существования капель воды для рассматриваемых случаев составлял от 5 до 1 с при увеличении температуры нагрева от 350 до 650 К, соответственно.

В области малых температур отклонения параметра $\Delta\tau_h$ могут достигать 35 с (рис. 3.9.9). При повышении температуры отклонение интегрального параметра испарения нелинейно уменьшается (до 5 с при $T_g=650$ К). Выделенный эффект иллюстрирует, что для условий высоких температур газов (особенно при малых размерах капель) процессы парообразования для исследуемых систем могут характеризоваться близкими значениями τ_h . Но при этом физика этих процессов существенно отличается (в основном по механизмам парообразования на границах раздела «жидкость – твердое тело»). В случае движущихся

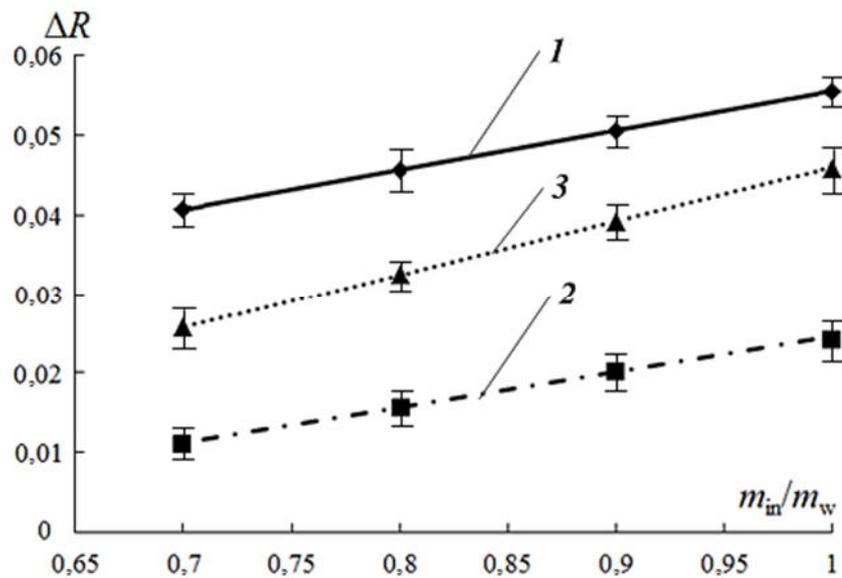
неоднородных капель определяющую роль играют времена их нахождения в высокотемпературной газовой среде. Именно этот фактор определяет возможность реализации процессов испарения или кипения на внутренней и внешней границах раздела сред. Реализация одного или нескольких механизмов фазовых превращений предопределяет временные характеристики испарения жидкости. В отношении практического применения учет времени взаимодействия неоднородных капель жидкости и высокотемпературной газовой среды предполагает варьирование геометрических параметров включений (размеров и конфигурации поверхности).

Для детального изучения интегральных характеристик испарения неоднородных капель жидкости при кратковременном нагреве (в режиме свободного падения через цилиндрический канал; аналогично экспериментам, результаты которых представлены на рис. 3.9.8) проведены дополнительные опыты. По результатам этих опытов установлено влияние соотношения масс воды и включения, формы (на примере цилиндрического диска, куба и параллелепипеда) и площади поверхности последнего на интегральные характеристики испарения жидкости после прохождения гетерогенными каплями канала (длина 1 м, внутренний диаметр 0,2 м; см. рис. 2.2.1) с высокотемпературными газами.

Приведенные на рис. 3.9.10, а зависимости достаточно наглядно иллюстрируют влияние массовой доли воды в составе гетерогенной капли на условия и характеристики испарения. При соотношении $m_{in}/m_{w0} \approx 1$ (m_{in} – масса включения, г, m_{w0} – начальная масса воды, г) масса испарившейся воды значительно выше, чем при $m_{in}/m_{w0} \approx 0,7$ (начальная масса воды больше, чем включения). Выделенная закономерность характерна всем рассмотренным формам включений. Аналогичная тенденция наблюдается и на рис. 3.9.10, б (уменьшение начального радиуса гетерогенной капли).



a



б

Рисунок 3.9.10. – Зависимости параметров Δm_w (а) и ΔR (б) от соотношения массовых долей компонентов гетерогенных капель, содержащих включения разных форм: 1 – цилиндр, 2 – куб, 3 – параллелепипед

Комментарий: параметр Δm_w ($\Delta m_w = (m_0 - m) / m_0$, где m_0 , m – массы капли до и после прохождения высокотемпературных продуктов сгорания, соответственно) характеризует уменьшение массы капель в процессе испарения; параметр ΔR ($\Delta R = (R_0 - R) / R_0$, где R_0 , R – радиусы капли до и после прохождения высокотемпературных продуктов сгорания, соответственно) характеризует уменьшение размеров капель в процессе испарения.

На рис. 3.9.11 показано, что масса испарившейся жидкости зависит от площади поверхности включения. При этом монотонность кривых $\Delta m_w = f(S_{inc})$ сохраняется при изменении начальных масс жидкости. Цилиндрическая форма включения обеспечивала наибольшую интенсификацию испарения неоднородной капли при прочих равных условиях за счет меньшей площади поверхности, а, следовательно, меньшего времени прогрева частицы. Быстрый прогрев включения приводил к интенсификации испарения с внешней поверхности неоднородной капли. Парообразование на внутренних границах раздела сред «включение – вода» не наблюдалось из-за малой длительности процесса. Это обусловлено ограниченной длиной (1 м) цилиндра с высокотемпературными газами.

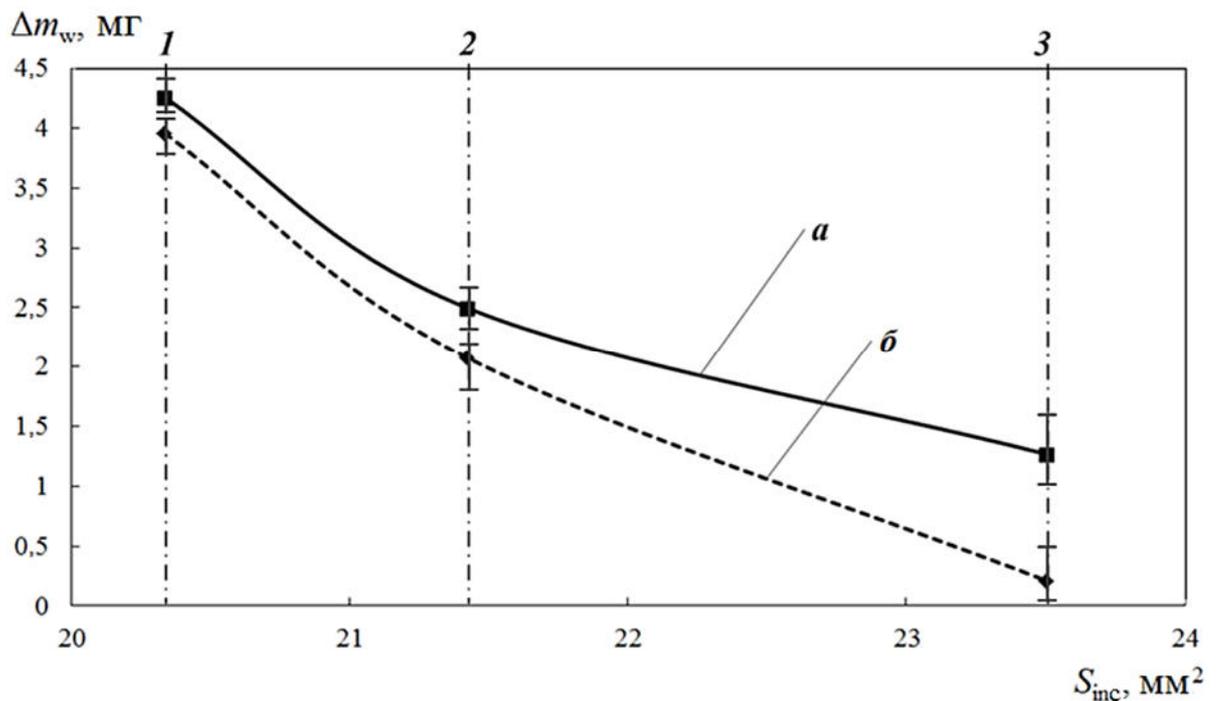


Рисунок 3.9.11. – Зависимость параметра Δm_w от площади поверхности включения S_{inc} (1 – цилиндр, 2 – куб, 3 – параллелепипед) при варьировании начальной массы воды (а – 17 мг, б – 25 мг)

Комментарий: в данном случае параметр Δm_w вычислялся как разность масс капель до (m_0) и после (m) прохождения высокотемпературных газов.

На рис. 3.9.10, *a* видно, что для капель с включениями в форме параллелепипеда при $m_{in}/m_{w0} \approx 0,7$ убыли массы жидкости практически нет, а при $m_{in}/m_{w0} \approx 1$ она в несколько раз меньше, чем для цилиндрического включения. Можно заключить, что включение в форме параллелепипеда, обладающее наибольшей площадью поверхности среди рассмотренных форм, за время прохождения через высокотемпературную газовую среду недостаточно прогревалось (аккумулированной энергии не хватало для интенсификации испарения).

В качестве основных варьируемых параметров для определения условий интенсивных фазовых превращений гетерогенных капель можно использовать характеристики включения (площадь и форма) и взаимного расположения элементов неоднородной структуры (частичное выступление включения с поверхности капли). Варьируя эти параметры, а также параметры газовой среды, можно обеспечить интенсивное испарение неоднородных капель жидкости в условиях, соответствующих на практике газопарокапельным технологиям (например, термической или огневой очистке жидкостей, полидисперсному пожаротушению, газопарокапельным теплоносителям).

Эксперименты показали, что варьирование площади поверхности включения значительно влияет на характеристики испарения неоднородных капель жидкости. Однако, целесообразно учитывать время нахождения неоднородной капли в высокотемпературной газовой среде. Длительный (более 2 с) прогрев включения интенсифицирует процессы парообразования на внутренних границах раздела сред и может приводить к разрушению капли. В ходе комплексного анализа также следует учитывать и другие определяющие параметры, в частности, температуру газовой среды, скорость движения потока, массу жидкости и т.д.

3.10. Особенности процессов теплопереноса в пленке воды при воздействии лучистого теплового потока на ее поверхность

Проведены эксперименты для обоснования гипотезы о значительной роли лучистой составляющей теплообмена в неоднородных каплях воды (содержащих непрозрачные твердые включения) при нагревании в потоке высокотемпературных газов. Выполнены измерения температуры поверхности пленки воды, дна кюветы (в форме цилиндра) и графитовой подложки. Проведено сравнение этих температур в экспериментах с водопроводной, дистиллированной и газонасыщенной водой. Обоснована гипотеза о существенном изменении оптических свойств воды при изменении ее температуры за счет гидрофобных эффектов с амфифильными молекулами. Полученные экспериментальные данные позволили обосновать сформулированную гипотезу о механизме взрывного дробления неоднородных (с твердыми включениями) капель воды при интенсивном парообразовании на внутренних и внешних границах раздела сред, основанную на нагреве поверхности включения до температур выше температуры кипения воды.

Для проведения экспериментальных исследований процессов теплопереноса в пленке жидкости в условиях нагрева источником видимого света применена схема, изображенная на рис. 3.10.1.

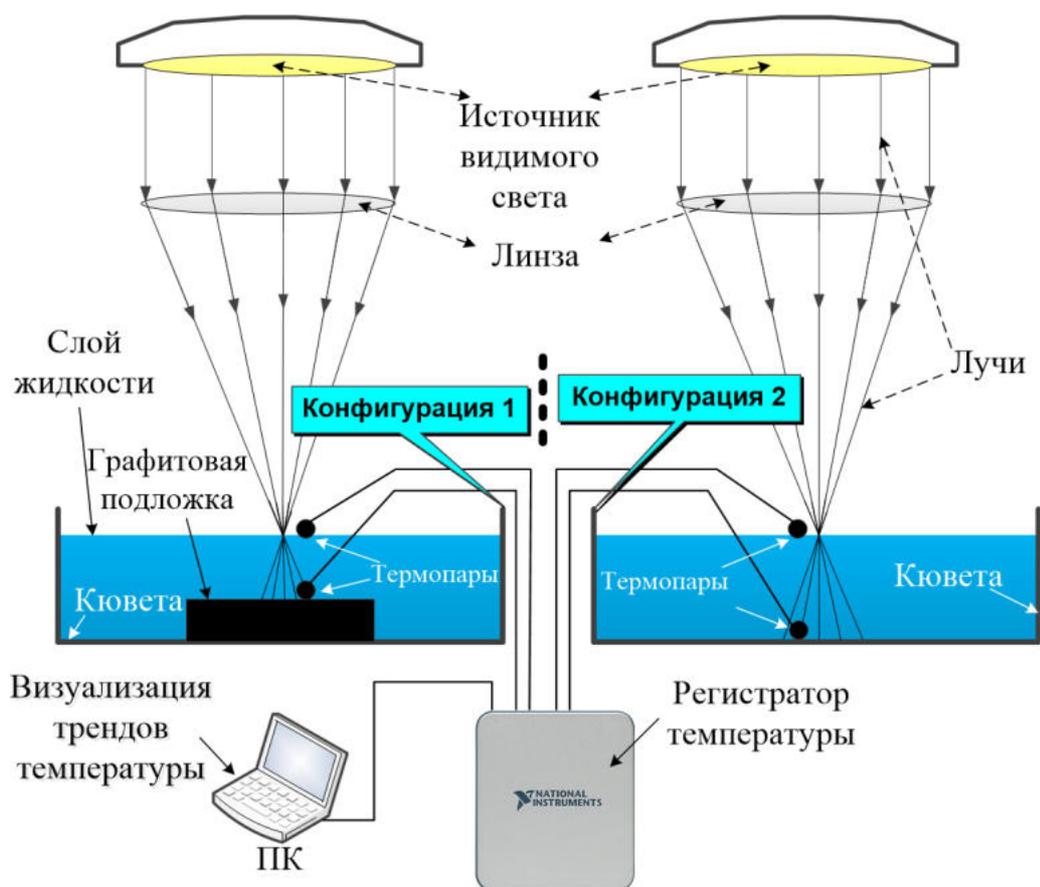


Рисунок 3.10.1. – Схематичное изображение экспериментального стенда с иллюстрацией источника излучения, фокусирующих линз, графитовой подложки, пластиковой кюветы и пленки жидкости, а также средств регистрации температуры

Проводились термопарные измерения на границах «внешняя среда – слой жидкости» (T_1 – температура пленки воды в экспериментах с графитовой подложкой T_{ws} и в опытах с пластиковой кюветой T_{wc}) и «графитовая подложка (или дно кюветы) – слой жидкости» (T_2 – температура твердого основания в экспериментах с графитовой подложкой T_s и в опытах с пластиковой кюветой T_c).

В каждом эксперименте использовались два малоинерционных термоэлектрических преобразователя типа К (хромель-алюмелевые; диапазон измеряемых температур 233–1023 К, допускаемая погрешность при измерениях температур до 650 К – $\pm 1,5$ К, толщина сая 0,25 мм). Выбор термопар с указанной толщиной сая связан с обеспечением наименьшей инерционности и

погрешности измерения [239, 240], которые по существу являются определяющими параметрами в настоящем исследовании (в отношении достоверности результатов).

Конфигурация 1 на рис. 3.10.1 – это конфигурация исследуемой области, подразумевающая наличие графитовой подложки (материал – графит природного происхождения; форма – цилиндрический диск; размеры: высота $h_g=1$ мм, радиус $R_g=3,8$ мм; начальная температура $T_g=300$ К), расположенной на дне пластиковой кюветы (материал: полиэтилен низкого давления, цвет – черный, радиус $R_s=10$ мм, высота $h_s=1$ мм).

Термопара 1 (измерение температуры на границе «внешняя среда – слой жидкости») находится на расстоянии около 3 мм от точки, в которой концентрируется фокусируемый суживающей линзой пучок лучей. Термопара 2 (измерение температуры на границе «графитовая подложка – слой жидкости») проводит регистрацию непосредственно под термопарой 1. Допускалось небольшое смещение в поперечном направлении (на 0,5–1 мм) термопары 2 относительно вертикали, проведенной между термопарой 1 и поверхностью графитовой подложки).

Термопара 1 закреплялась на специализированном автоматическом (в экспериментах [203, 204] такой механизм использовался для помещения неоднородной капли в высокотемпературную газовую среду) координатном механизме для обеспечения возможности слежения за движущейся границей раздела сред. Использовалось программное обеспечение «Тема Automotive» и две высокоскоростные (до 10^5 кадров в секунду) видеокамеры [203, 204] для контроля положения пленки воды. В процессе испарения последней термопара 1 медленно перемещалась за пленкой воды, толщина которой с ростом времени уменьшалась.

Конфигурация 2 отличается от Конфигурации 1 отсутствием графитовой подложки, т.е. термопара 2 регистрировала температуру границы «слой жидкости – дно кюветы». Принцип расположения термопар аналогичен Конфигурации 1 (см. рис. 3.10.1).

Показания термопар передавались с измерительной системы NI 9219 на ПК, где проводилась последующая обработка полученных температурных трендов.

Применялись три вида жидкостей: газонасыщенная (аэрированная; уровень насыщения углекислым газом 0,3–0,4 %), дистиллированная и водопроводная питьевая вода. Кювета наполнялась одной из указанных жидкостей с применением электронного дозирующего устройства (характеристики прибора указаны в Главе 2). В Конфигурации 1 начальный объем жидкости в кювете равнялся 314 мкл. При этом толщина слоя жидкости между исследуемыми границами раздела сред составила 1 мм (значения толщин слоев жидкости вычислялись через их объем). В Конфигурации 2 толщина слоя жидкости, соответственно, также устанавливалась на уровне 1 мм. Необходимо отметить, что используемые жидкости перед проведением экспериментов переливались в лабораторные сосуды, оснащенные термопарами, аналогичными описанным выше. Так, проводился постоянный мониторинг начальной температуры исследуемых жидкостей – около 300 К.

В качестве источника видимого света использовалась галогенная лампа мощностью 500 Вт. Между источником света и кюветой закреплялась суживающая пучок видимого света линза (диаметр 0,047 м, максимальная толщина $8,5 \cdot 10^{-3}$ м, фокусное расстояние 120 мм) таким образом, чтобы сфокусировать лучистый поток на участке (диаметром 1,5–2 мм) поверхности жидкости в кювете (рис. 3.10.1).

Длительность измерений в каждом эксперименте составляла 300 с. В течение этого времени спай термопары на границе «внешняя газовая среда – слой жидкости» оставался в непосредственном контакте с последней (жидкость в кювете при воздействии теплового излучения испарялась; толщина слоя жидкости уменьшалась). При больших временах нагрева поверхность пленки воды начинала трансформироваться вследствие конвективных течений. Этот фактор затруднял достоверный контроль температуры поверхности пленки.

После подготовительных работ (заполнение кюветы жидкостью, закрепление термопар, тестовые измерения, отладка работы программно-

аппаратного комплекса и т.д.) выполнялись контрольные эксперименты, в ходе которых менялись жидкости, заливаемые в кювету, и отсутствовала / присутствовала графитовая подложка.

В рамках одной компоновки исследуемой системы (например, дистиллированная вода и наличие графитовой подложки на дне кюветы) проводилось от 6 до 10 опытов. При обработке полученные в этих опытах значения T_1 и T_2 усреднялись. В расчете участвовали результаты экспериментов серии, которые отличались по значениям идентичных температур не более чем на 3 К. Данные остальных измерений не анализировались и исключались из рассмотрения. Результаты измерений термопар отображались в виде температурных трендов (например, рис. 3.10.2).

На рис. 3.10.2 приведены результаты измерений температур поверхности графитовой подложки T_s , дна кюветы с водопроводной водой T_c и пленки последней (T_{ws} и T_{wc} – в экспериментах с графитовой подложкой и пластиковой кюветой, соответственно) в интервале времени до 300 с.

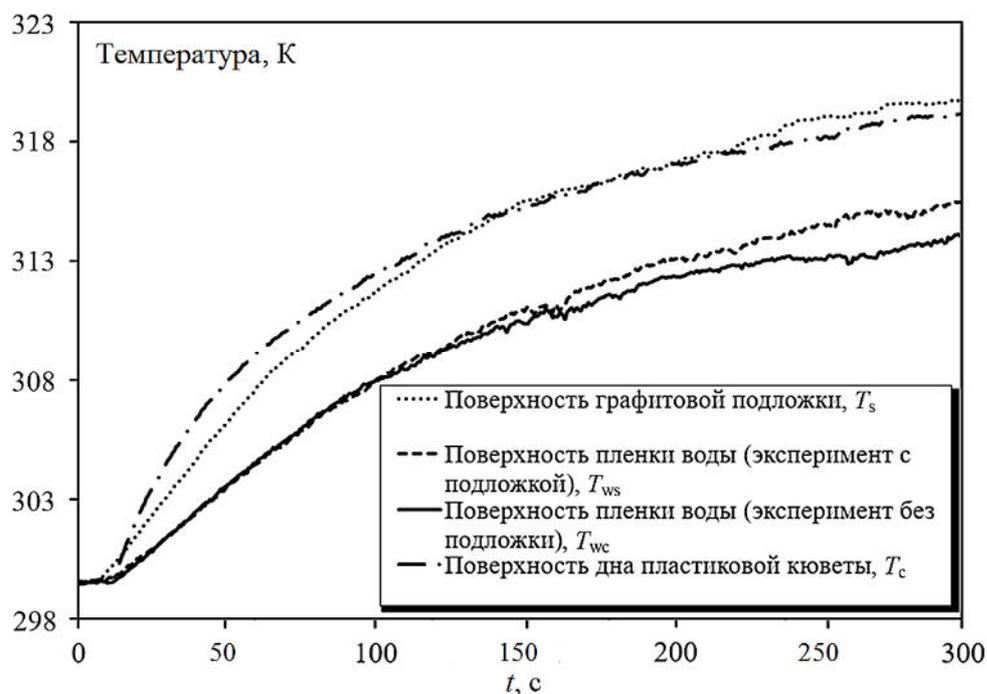


Рисунок 3.10.2. – Результаты измерения температуры при инфракрасном нагревании пленки водопроводной воды толщиной 1 мм на графитовой подложке и дне пластиковой кюветы

Хорошо видно, что значения T_s , T_c и T_{ws} , T_{wc} отличаются достаточно существенно (от 1 до 4 К). С ростом времени эти отличия становятся все более значительными. Можно сделать вывод о том, что графитовая пластина, расположенная на дне кюветы, нагревается поступающим к поверхности воды лучистым потоком на 2–4 К выше, чем открытая поверхность воды в кювете. Кроме того, также можно сделать вывод о том, что в идентичных условиях подвода энергии графит нагревается заметно (на 2–3 К) более интенсивно, чем дно пластиковой кюветы. Если принять во внимание, что степень черноты поверхности этих двух материалов отличается в 1,2–1,5 раза, а коэффициент теплопроводности графита много больше аналогичной характеристики пластиковой кюветы, можно сделать заключение о значительном влиянии лучистого теплопереноса на интенсивность прогрева материала дна кюветы, заполненной водопроводной водой.

Для дополнительного обоснования этого заключения проведены эксперименты с минеральной (насыщенной газами) и дистиллированной водой по описанной выше методике. Выполнялись аналогичные измерения характерных температур. Результаты приведены на рис. 3.10.3 и 3.10.4, соответственно.

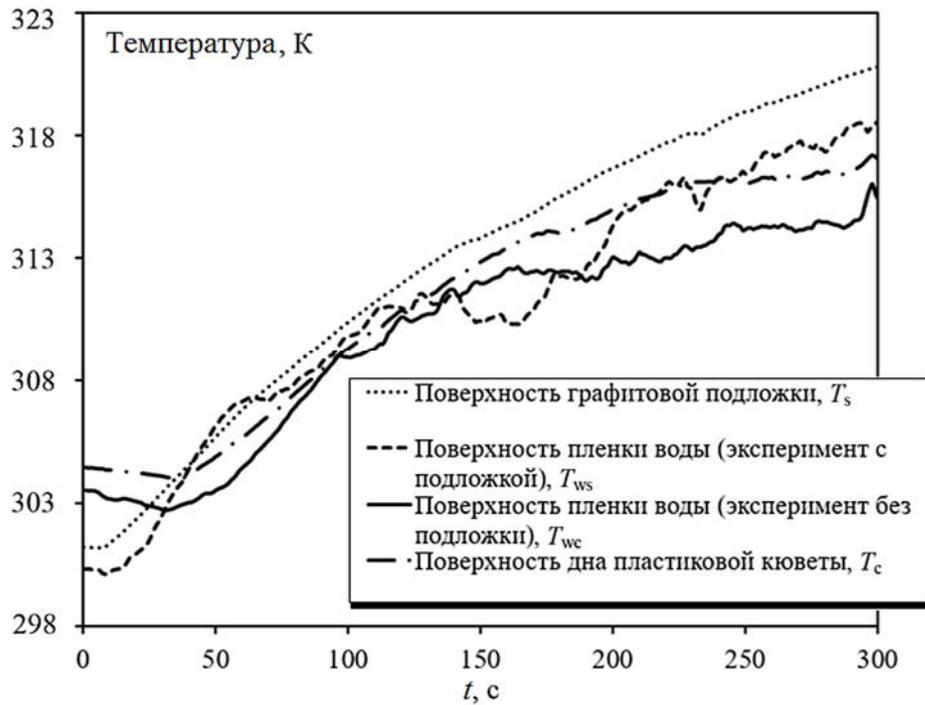


Рисунок 3.10.3. – Результаты измерения температуры при инфракрасном нагревании пленки газонасыщенной (минеральной) воды толщиной 1 мм на графитовой подложке и дне пластиковой кюветы

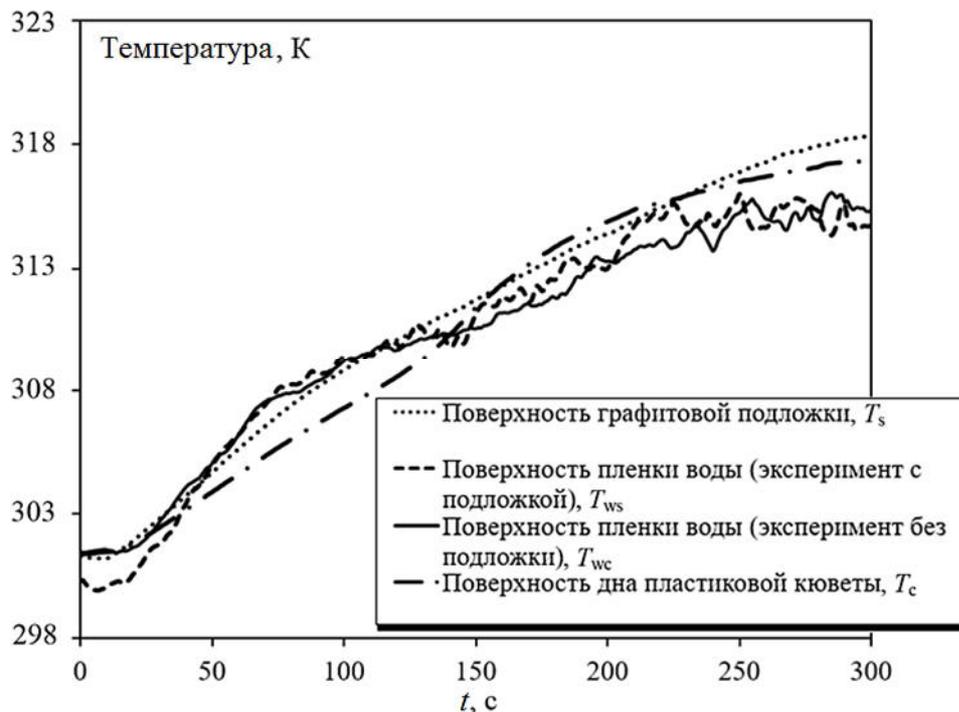


Рисунок 3.10.4. – Результаты измерения температуры при инфракрасном нагревании пленки дистиллированной воды толщиной 1 мм на графитовой подложке и дне пластиковой кюветы

На рис. 3.10.3 хорошо видно, что в случае газонасыщенной воды температуры T_s , T_c , T_{ws} и T_{wc} отличаются относительно друг друга меньше, чем в экспериментах с водопроводной водой. Распределения (тренды) $T_s(t)$, $T_c(t)$, $T_{ws}(t)$ и $T_{wc}(t)$ для дистиллированной воды (рис. 3.10.4) иллюстрируют однородное по существу температурное поле системы «вода – графитовая пластина – дно кюветы».

Анализ рис. 3.10.2–3.10.4 показал, что для двух использованных в экспериментах сред характерны короткие периоды времени в начале опытов (30–40 с), в течение которых соотношения между характерными температурами не соответствуют основному периоду времени (при $t > 50$ с). Можно предположить, если учесть, что в дистиллированной воде такой начальный участок не выделен, что в течение 30–40 с под действием инфракрасного излучения умеренной интенсивности (за 300 с вода разогревается до температур не более 318 К) в жидкости происходят процессы, приводящие к изменению ее оптических свойств. При временах менее 50 с результаты измерений температур в водопроводной (питьевой) и минеральной воде не дают оснований для вывода о возможном распространении теплоты за счет механизма излучения через пленку воды. При больших временах $50 < t < 300$ с механизм прогрева воды меняется. О природе этого изменения можно сформулировать гипотезу по результатам сравнения рис. 3.10.2–3.10.4. Отсутствие каких-либо эффектов, аналогичных водопроводной воде, в этой среде дает основание для предположения о том, что содержащиеся в обычной (и в меньших объемах в минеральной) воде жидкие, твердые и газообразные примеси при нагреве взаимодействуют с водой, образуя новые соединения, свойства которых (в том числе и оптические) отличаются от свойств чистой (в экспериментах – дистиллированной) воды.

Анализ работ [241, 242] дает основания для подтверждения этой гипотезы. При исследовании гидрофобного взаимодействия амфифильных молекул в разбавленных растворах методами молекулярной динамики установлено [241, 242], что по мере нагрева вода становится менее плотной, и присутствующие в

ней молекулы поверхностно-активных веществ начинают гидрофобно взаимодействовать. В результате происходит агрегация амфифильных молекул. Экспериментально установлена возможность помутнения [241, 242] растворов таких молекул в диапазоне температур от 270 К до 370 К. Результаты теоретического анализа, обосновывающего возможность гидрофобного взаимодействия, получены для условия окружения 7075 молекулами воды одной молекулы типа C_8E_6 [241, 242]. Экспериментально установлена корреляция между температурами растворов и признаками их помутнения.

На основании анализа установленных закономерностей помутнения слабых водяных растворов поверхностно-активных веществ при температурах, существенно меньших температуры кипения воды [241, 242], можно объяснить результаты экспериментальных исследований, приведенных на рис. 3.10.2–3.10.4.

При нагреве обычной (водопроводной) воды потоком инфракрасного излучения до температур 320–330 К реализуются взаимодействия содержащихся в воде в микроскопических объемах примесей с молекулами воды. Происходит помутнение (по терминологии [241, 242]) слабого раствора – гидрофобное взаимодействие амфифильных молекул. В результате изменяются оптические свойства водопроводной воды, и инфракрасное излучение распространяется на некоторую глубину слоя воды, достигая поверхности частиц примесей в капле воды. В дистиллированной воде таких примесей (амфифильных молекул) нет [241, 242]. Поэтому она остается непрозрачной для инфракрасного излучения.

На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что установленный эффект взрывного разрушения гетерогенных (содержащих твердые включения) капель воды в результате интенсивного парообразования на границе «вода – твердое включение» обусловлен распространением в нагретой до температур 320–350 К воде (оптические свойства которой изменяются достаточно существенно при таком нагреве) инфракрасного излучения.

В технологиях очистки воды последняя содержит в больших объемах (от 10 до 30 %) примеси разного рода (твердые и жидкие). Поэтому при нагреве такая вода становится частично прозрачной для инфракрасного излучения. В результате

создаются условия для взрывного дробления капель с включениями в условиях интенсивного нагрева (температуры внешней среды более 1000 К).

Установленные в [203, 204] закономерности показали, что в реальных технологиях высокотемпературной очистки сильно загрязненной воды есть значительные резервы повышения эффективности этих технологий. Процессы разделения воды и примесей (твердых и жидких) при определенной температуре и длительности нагрева происходят в режиме взрывного парообразования и распада неоднородных капель воды на множество более мелких фрагментов (мелких капель). В результате возможно существенное уменьшение времен высокотемпературной или термической очистки воды и, соответственно, снижение суммарных энергозатрат.

3.11. Рекомендации по использованию полученных результатов и дальнейшему развитию сформулированного в диссертации подхода

Обобщение результатов выполненных опытов и сделанных заключений позволило сформулировать рекомендации по использованию полученных экспериментальных данных в ряде практических приложений.

Термическая или огневая очистка воды

- ❖ Перед подачей воды в виде капельного потока в испарительные камеры и печи для интенсификации испарения жидкости можно рекомендовать специализированное введение в ее состав непрозрачных неметаллических твердых включений с характерными размерами 0,05–4 мм.
- ❖ В процессе испарительной очистки воды при использовании твердых частиц с известными характеристиками целесообразно принимать во внимание масштабы их влияния на длительности стадий рабочих процессов. При этом можно рекомендовать использование аппроксимационных зависимостей, приведенных в п. 3.3–3.5.
- ❖ С использованием установленных условий выполнения выделенных в настоящем исследовании механизмов фазовых превращений становится

возможным предопределение времен процесса испарительной очистки воды. Реализация одного или нескольких механизмов фазовых превращений также будет способствовать прогнозированию длительности рабочего процесса.

- ❖ С учетом установленных в п. 3.3–3.6 временных характеристик процессов и закономерностей дробления капель при реализации выделенного явления – взрывного парообразования, а также особенностей формирования неоднородных капель, описанных в п. 3.9, целесообразным и возможным является разработка практических рекомендаций по снижению трудоемкости процесса очистки, экономии энергоресурсов и изменению конструктивных особенностей испарительных установок (стремление к компактности и меньшей металлоемкости).
- ❖ Аппроксимационные зависимости, представленные в п. 3.8, могут быть использованы при подготовке методических указаний для проведения очистных мероприятий в различных высокотемпературных средах.

Пожаротушение неоднородными по составу потоками тушащего агента

- ❖ Для интенсификации процесса испарения воды в области пламени и соответствующего уменьшения расхода тушащего агента можно рекомендовать добавление в воду специализированных примесей (размером от 0,05 мм до 4 мм) с заранее известными теплофизическими характеристиками.
- ❖ Установленные в диссертационном исследовании условия взрывного разрушения неоднородных капель воды вследствие интенсивного парообразования жидкости на внутренних границах раздела сред являются по существу фундаментальной основой для разработки технологии, в рамках которой крупные капли неоднородной жидкости могут входить в пламя (без их уноса продуктами сгорания на входе в последнее) и затем дробиться на большое число малых капель для максимально полного испарения в зоне горения. Реализация такой технологии позволит увеличить

площадь поверхности испарения воды и эффективность ее использования. Кроме того, при дроблении и испарении капель жидкости формируется парок капельное облако, способствующее вытеснению окислителя из зоны горения. Результаты исследований в п. 3.2, 3.6 и 3.9 могут быть рекомендованы для разработки указанной технологии.

- ❖ При использовании в процессе тушения пожаров воды с примесями (соли, поверхностно-активные вещества, мелкие частицы графита) следует учитывать их концентрацию. При определении указанного параметра целесообразно использование представленных в п. 3.5 аппроксимационных зависимостей.
- ❖ Полученные в п. 3.6 количественные оценки увеличения площади испарения в результате дробления неоднородных капель на мелкие фрагменты могут быть использованы при выборе оптимальных с точки зрения повышения интенсивности фазового перехода в зоне пламени соотношений объемов воды V и твердого включения V_{inc} .

Охлаждение ограждающих конструкций теплонагруженного оборудования

- ❖ По результатам анализа п. 3.7 одним из наиболее целенаправленных путей практического развития физических аспектов, выделенных в данном исследовании, является создание вспомогательного теплообменного слоя между теплонагруженной поверхностью и наружной средой на основе суспензии с высокой теплоемкостью и теплопроводностью. Эффективное функционирование такой системы достижимо за счет применения циркуляционных насосов или механических перемешивающих устройств, результатом работы которых является равномерное распределение частиц в объеме теплообменного слоя. С учетом временных характеристик перегрева металлических конструкций режим эксплуатации такого вспомогательного оборудования может быть кратковременным или длительным. После отключения системы перемешивания твердые частицы (аккумулирующие отведенную от поверхности теплообмена тепловую энергию) начнут

оседать. Этот процесс позволит естественным образом отводить значительную часть избыточной тепловой энергии и тем самым охлаждать теплонагруженные металлические поверхности.

Представленные в настоящей работе результаты экспериментов имеют значительные перспективы практического использования: процессы испарения капельных потоков жидкости широко распространены в энергетике при формировании газопарокапельных теплоносителей и утилизации вторичных энергоресурсов, в технологиях интенсивной разморозки сыпучих сред, очистки поверхностей теплоэнергетического оборудования газопарокапельными смесями и др. Представленные в п. 3.1 – 3.6, 3.8, 3.9 закономерности и зависимости целесообразно учитывать при выборе начальных параметров капель неоднородных потоков жидкостей при разработке упомянутых выше технологий.

Выводы по третьей главе

1. Добавление твердых относительно крупных (размером 2 мм) включений в капли воды (с начальным объемом 10 мкл) позволяет в значительной мере (до 60 % – в случае добавления включений с гладкой поверхностью, до 70 % – с искусственными неровностями) снизить времена их существования (полного испарения) τ_h в высокотемпературной газовой среде. Показано значительное снижение (до 40 %) времен испарения неоднородных капель жидкости при нагреве в продуктах сгорания технического спирта за счет нанесения искусственных неровностей (шероховатостей и пор) на твердые включения, добавляемые в капли воды.
2. Установлен эффект устойчивого взрывного распада гетерогенной капли вследствие интенсивного парообразования жидкости на внутренних границах раздела сред при высокотемпературном нагреве. Измерены характерные времена нагрева неоднородных капель до условий взрывного распада (от 1 с до 12 с) и полного испарения с сохранением целостности (до 100 с). Выделены три режима дробления, которые отличаются количеством и размерами отрывающихся фрагментов в процессе взрывного распада исходной большой капли воды. Установлены масштабы увеличения суммарной площади испарения вследствие распада жидкости на мелкие фрагменты, а также зависимость этой площади от начальных характеристик гетерогенной капли (соотношения начального объема плёнки жидкости и объема твёрдой частицы V/V_{inc}). Выявлено, что максимальное соотношение суммарной площади поверхности к начальной поверхности капли $S_{out}/S_{in} \approx 15$ может быть достигнуто при равенстве объёмов плёнки жидкости и графитового включения $V \sim V_{inc}$. Для отношения $V/V_{inc} = 0,5-4$ значения отношения площадей S_{out}/S_{in} составляют от 1 до 15. При использовании суспензий графита наблюдалось только двух-, трехкратное увеличение площади поверхности испарения в процессе дробления неоднородных капель.

3. Проведенные эксперименты показали, что возможны две схемы «взрыва» капли, отличающиеся процессами подведения энергии к внутренним границам раздела сред, и одна схема интенсивного испарения со свободной поверхности неоднородной капли. Выделены типичные стадии рассматриваемых процессов (прогрев жидкости, испарение с внешней поверхности, пузырьковое кипение на внутренних границах раздела сред, рост размеров пузырьков, взрывное разрушение капли). Показано, что при полном обволакивании включения жидкостью прогрев последнего выполняется посредством прохождения теплового потока через пленку. Обосновано слабое влияние керамического стержня на характеристики нагрева неоднородной капли жидкости.
4. Установлено, что времена существования (полного испарения) неоднородных капель жидкости объемом 5 мкл в условиях относительно низких (350 К) и высоких (850 К) температур газовой среды значительно снижаются (до 30 %) при концентрации (1–2 %) мелких графитовых частиц. Выявлен рост (до 30 %) времен существования неоднородных капель суспензий (при $T_g=850$ К) с добавлением мелких включений графита при увеличении начального объема капли до 15 мкл по сравнению с характерными временами τ_h для обволакивающих крупные включения капель воды. Для объяснения снижения влияния добавления мелких графитовых частиц сформулировано предположение о формировании буферного теплоизоляционного парового слоя на границе раздела сред «поверхность капли суспензии – газовая среда» при высоких температурах нагрева ($T_g=850$ К). Установлено существенное снижение времен существования τ_h неоднородных капель в случае добавления ПАВ (до 45 %) и соли NaCl (до 35 %).
5. Определены условия, при которых возможно интенсивное парообразование с внешней (свободной) поверхности неоднородной капли и внутренних границ раздела сред (условия взрывного дробления подробно обсуждаются в разделе «Заключение»).
6. По результатам экспериментальных исследований установлено, что ввод в капли воды частиц углерода (с относительной массовой концентрацией до 0,01)

приводит к существенному увеличению скорости испарения жидкости (в 2–2,5 раза) при движении через высокотемпературные ($T_g > 1000$ К) газы. Выявлено, что форма (эллипсоид, сфера, блин) капле, содержащих частицы углерода, изменяется случайным образом от эксперимента к эксперименту в процессе их перемещения через газовую среду.

7. Для капле воды, содержащих металлические включения, выявлен доминирующий механизм фазовых превращений – испарение со свободной поверхности капле жидкости. Для обоснования целесообразности применения исследуемых металлов в различных отраслях промышленности представлены практические рекомендации (в направлении выбора материала конструкций и способов их охлаждения). Установлено, что интенсивность оттока тепловой энергии от включения к пленке воды зависит в первую очередь от коэффициента теплопроводности металла. Вследствие интенсивного оттока теплоты к слою воды, достигается условие интенсификации испарения неоднородной капли жидкости, способствующее снижению времени ее существования τ_h в высокотемпературной газовой среде. Отмечается, что металлическими включениями поглощалось достаточно несущественное количество теплоты по отношению к общему количеству подведенной к рассматриваемой системе тепловой энергии. Однако, именно от этой составляющей во многом зависело изменение времен существования неоднородных капле жидкости τ_h . Сравнение результатов экспериментов с металлическими включениями и подложками показало, что для достижения максимального эффекта парообразования при охлаждении теплонагруженных поверхностей (например, на ТЭС и АЭС) можно использовать не только воду и дополнительные металлические конструкции, увеличивающие площадь поверхности теплоотвода. Применение гетерогенных капельных потоков с содержанием частиц, изготавливаемых из материалов с довольно высокой теплоемкостью и теплопроводностью, является потенциальным и перспективным методом интенсификации испарения воды при охлаждении нагретых поверхностей технологических объектов.

8. Выделено влияние лучистого (радиационного) теплообмена на условия прогрева и фазовых превращений неоднородных капель воды в высокотемпературных газовых средах. Установлено, что за счет пропускания довольно значительных лучистых тепловых потоков жидкостью на внутренних границах раздела сред реализуются условия интенсивного кипения. Эти условия могут не только приводить к вскипанию капель, но и их взрывному разрушению.
9. Варьирование площади поверхности включения существенно (до 20 %) влияет на характеристики испарения неоднородных капель жидкости. Увеличение начальной массы воды m_{w0} в составе неоднородной капли даже на 6 мг способствует снижению параметров Δm_w (до 90 %) и ΔR (до 50 %). Установлено определяющее влияние образования парового слоя на границе раздела сред «подложка – жидкость» на времена существования испаряющейся с подложки капли воды (изменение τ_h на 20 % при росте начальной массы воды от 5 мг до 15 мг). Выделенные отличия $\Delta \tau_h$ при изменении температуры газов показывают, что для высокотемпературных газопарокапельных приложений допустимо различное расположение зоны контакта «твердое тело – жидкость», при котором могут быть достигнуты близкие интегральные характеристики (скорости испарения и времена существования) парообразования. Однако, условия кипения или испарения (формирования парового слоя, зарождения, роста и разрушения пузырьков и др.) при этом могут достаточно существенно отличаться.
10. Установлено влияние соотношения масс воды и включения, формы (на примере цилиндрического диска, куба и параллелепипеда) и площади поверхности последнего на интегральные характеристики испарения жидкости после прохождения гетерогенными каплями канала с высокотемпературными газами.
11. Экспериментально обоснована гипотеза о механизме взрывного дробления неоднородных (с твердыми непрозрачными включениями) капель воды при интенсивном парообразовании на внутренних и внешних границах раздела

сред, основанная на нагреве поверхности включения до температур выше температуры кипения воды.

12. Согласно полученным результатам экспериментальных исследований разработаны практические рекомендации для перспективных высокотемпературных газопарокапельных технологий, способствующие целесообразному выбору основных параметров капельных потоков неоднородных жидкостей и условий реализации механизмов фазовых превращений таких жидкостей.

Список условных обозначений и символов

a_{Me} – коэффициент температуропроводности металлов, см²/с;

a_w – коэффициент температуропроводности воды, м²/с;

d – размер мелких графитовых частиц, мм;

d_p – характерный размер крупного твердого включения, мм;

h_v – толщина парового слоя на внутренней границе раздела сред «жидкость – твердая частица», мм;

L_m – средний размер углеродистых частиц, мкм;

m_{in} – масса включения, г;

m_{w0} – начальная масса воды в составе неоднородной капли, мг;

Nu, Re, Pr – безразмерные комплексы (числа Нуссельта, Рейнольдса и Прандтля);

q_c, q_l – конвективный и лучистый тепловые потоки на поверхности капли, Вт/м²;

R – размер (радиус) капли жидкости в аэрозольном потоке, мкм;

R_d – начальный радиус неоднородной капли жидкости, мм;

R_d^{inp} – условный радиус капель на входе в высокотемпературный канал, мм;

R_d^{out} – условный радиус капель на выходе из высокотемпературного канала, мм;

r_{Me} – радиус металлического включения, см;

R_{sd} – радиус мелких (отделившихся) капель жидкости, мм;

S_{in} – начальная площадь поверхности капли жидкости, м²;

S_{out} – суммарная площадь поверхностей отделившихся в процессе взрывного дробления капель жидкости, м²;

t – время нагрева, с;

T_c – температура дна кюветы с жидкостью, К;

T_e – температура поверхности капли воды, К;

t_e – время тушения модельного очага возгорания, с;

T_{ex5}, T_{ex10} и T_{ex15} – температуры начала интенсивного парообразования гетерогенных капель с начальным объемом жидкости 5, 10 и 15 мкл, соответственно, при нагреве в муфельной печи, К;

T_g – температура газовой среды (температура нагрева), К;

T_{inc} – температура поверхности включения (граница раздела «включение – слой воды»), К;

T_{ins} – температура включения на глубине 0,5 мм, К;

T_{max} – максимальная температура нагрева неоднородных капель в муфельной печи, К;

T_s – температура поверхности графитовой подложки, К;

T_{wc} – температура поверхности пленки воды в экспериментах с пластиковой кюветой, К;

T_{wd} – температура поверхности слоя воды неоднородной капли, К;

T_{ws} – температура поверхности пленки воды в экспериментах с графитовой подложкой, К;

T_0 – температура среды до начала нагрева (температура воздуха в помещении лаборатории ~298 К);

V – начальный объем пленки (капли) жидкости (воды, суспензии), м³;

V_e – объем жидкости, затраченный на тушение модельного очага возгорания, л;

V_{inc} – объем включения, м³.

Греческие символы:

α – коэффициент теплообмена, Вт/(м²·К);

γ_c – массовая концентрация углеродистых частиц, %;

γ_p – массовая концентрация мелких частиц порошка графита, %;

$\Delta\tau_h$ – параметр, характеризующий отличие времен полного испарения воды на подложке и вокруг включения, с;

Δm_w – параметр, характеризующий уменьшение начальной массы капли после прохождения высокотемпературной среды, в долях, миллиграммах мг;

ΔR – параметр, характеризующий уменьшение радиуса капли после прохождения высокотемпературной среды, в долях, процентах %, миллиметрах мм;

ε – приведенная степень черноты;

η – коэффициент пропускания излучения;

σ – постоянная Стефана–Больцмана, Вт/(м²·К⁴);

τ – время интенсивного парообразования неоднородной капли жидкости с ее взрывным разрушением, с;

τ_e – конечное время испарения капли, с;

τ_{e0} – начальное время испарения капли, с;

τ_h – время существования неоднородной капли в высокотемпературной среде (капли воды на подложке), с;

τ_{Me} – время прогрева металлических включений, с;

τ_w – время прогрева слоя воды, с;

τ_0 – время начала интенсивного парообразования на границе раздела сред «включение – слой жидкости», с;

$\tau_{1...N}$ – моменты времени интенсивного парообразования с взрывным разрушением (испарения с внешней поверхности) неоднородной капли, с.

Заключение

По результатам выполненных диссертационных исследований сформулированы следующие выводы и заключения:

1. Разработана уникальная методика и созданы три экспериментальных стенда для исследования процессов парообразования при нагреве капель жидкости с твердыми включениями в высокотемпературной газовой среде.
2. Установлен эффект взрывного дробления неоднородной капли жидкости вследствие интенсивного парообразования на внутренних границах раздела сред (поверхности твердого непрозрачного включения).
3. Определены условия, при которых возможен эффект взрывного дробления неоднородной капли жидкости: температура при нагреве в продуктах сгорания жидких горючих топлив более 650 К, в воздушной среде без направленного движения потока высокотемпературной среды – более 800 К, в потоке горячего воздуха – более 850 К; материал включений – графит природного происхождения; форма включений – многогранник (включая искусственные неровности такие как шероховатости и поры); размеры твердых частиц следует варьировать в пределах 50–70 % от размеров капель.
4. Зарегистрированы характерные времена существования τ_h неоднородных капель жидкости в условиях ее интенсивного парообразования с взрывным дроблением (от 1 с до 12 с) и полного испарения с сохранением целостности (до 100 с). Установлено влияние температуры нагрева (диапазон от 300 до 1373 К), размеров включений (от 0,05 мм до 4 мм) и начальных масс жидкости (от 5 до 15 мг) на времена существования неоднородных капель жидкости в условиях ее интенсивного парообразования с взрывным дроблением и полного испарения с сохранением целостности.
5. Выявлено, что возможны две схемы интенсивного парообразования жидкости (в неоднородной капле) с ее взрывным дроблением (отличающиеся процессами подведения энергии к внутренним границам

раздела сред), а также одна схема испарения со свободной поверхности неоднородной капли. Впервые экспериментально выделены характерные стадии парообразования неоднородной капли, включающие испарение с ее свободной (внешней) поверхности, пузырьковое кипение на внутренних границах раздела сред, рост пузырьков и увеличение размеров капли с уменьшением толщины пленки жидкости вокруг включения, взрывной распад капли.

6. Добавление мелких (размером $d=0,05$ мм) графитовых включений (с массовой концентрацией $\gamma_p=2$ %) в неоднородную каплю жидкости уменьшает времена существования τ_h последних на 40–50 % по сравнению с τ_h для капель воды, содержащих только одно крупное графитовое включение. Сформулирована гипотеза о формировании буферной паровой прослойки в приповерхностном слое неоднородных капель воды (объемом 10 и 15 мкл) с добавлением мелких графитовых включений при температуре газовой среды 850 К. Установлены масштабы влияния такого парового слоя на τ_h неоднородных капель жидкости и замедление процессов испарения в целом; τ_h для неоднородных капель (объемом 15 мкл) с добавлением мелких графитовых включений (с $\gamma_p=2$ %) увеличились на 8 % по сравнению с τ_h для капель такого же объема воды без содержания мелких графитовых включений.
7. Установлено, что при нагреве и испарении капли воды с твердым включением в газовой среде (воздухе) с температурой $T_g \approx 1073–1373$ К площадь поверхности испарения в результате интенсивного парообразования жидкости с ее взрывным дроблением на мелкие фрагменты может увеличиваться в 3–15 раз относительно начальной площади поверхности капли. Показано, что значительное влияние на количество фрагментов жидкости, образующихся в результате взрывного дробления слоя жидкости неоднородной капли (и, следовательно, на результирующую площадь поверхности испарения), оказывает начальное соотношение объёмов плёнки жидкости V и твёрдого включения V_{inc} .

Максимальное число отделившихся фрагментов зафиксировано при примерном соответствии объёмов $V \sim V_{\text{inc}}$.

8. Проведенные эксперименты показали, что при искусственных неровностях на поверхностях твердых включений ($d_p=2$ мм) времена существования τ_h неоднородных капель снижаются на 40 % (при сравнении с включениями, имеющими гладкую поверхность). Добавление твердых включений в капли воды может снизить времена существования τ_h последних на 60–70 %.
9. По результатам экспериментальных исследований процессов теплопереноса в пленках дистиллированной, водопроводной (питьевой) и газонасыщенной (аэрированной) воды в условиях нагрева инфракрасным излучением установлены достаточно существенные отличия градиентов температур. Полученные экспериментальные данные обосновывают основную сформулированную в диссертационной работе гипотезу о механизме взрывного дробления неоднородных (с твердыми включениями) капель воды при интенсивном парообразовании.

Список литературы

1. Вараксин, А.Ю. Гидрогазодинамика и теплофизика двухфазных потоков: проблемы и достижения / А.Ю. Вараксин // Теплофизика высоких температур. – 2013. – Т. 51, № 3. – С. 421–455.
2. Saisorn, S. Heat transfer characteristics of gas-liquid flow in horizontal rectangular micro-channels / S. Saisorn, P. Kuaseng, S. Wongwises // Exp. Therm. Fluid Sci. – 2014. – V. 55. – P. 54–61.
3. Volkov, R.S. Experimental investigation of mixtures and foreign inclusions in water droplets influence on integral characteristics of their evaporation during motion through high-temperature gas area / R.S. Volkov, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak // Int. J. Therm. Sci. – 2015. – V. 88. – P. 193–200.
4. Volkov, R.S. The influence of initial sizes and velocities of water droplets on transfer characteristics at high-temperature gas flow / R.S. Volkov, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak // Int. J. Heat Mass Transfer. – 2014. – V. 79. – P. 838–845.
5. Gupta, M. Experimental evaluation of fire suppression characteristics of twin fluid water mist system / M. Gupta, R. Rajora, S. Sahai, R. Shankar, A. Ray, S.R. Kale // Fire Saf. J. – 2012. – V. 54 – P. 130–142.
6. Кузнецов, Г.В. Оценка численных значений констант испарения капель воды, движущихся в потоке высокотемпературных газов / Г.В. Кузнецов, П.А. Куйбин, П.А. Стрижак // Теплофизика высоких температур. – 2015. – Т. 53, № 2. – С. 264–269.
7. Tang, Z. Experimental study of the downward displacement of fire-induced smoke by water spray / Z. Tang, Z. Fang, J.P. Yuan, B. Merci // Fire Saf. J. – 2013. – V. 55. – P. 35–49.
8. Vysokomornaya, O.V. Experimental investigation of atomized water droplet initial parameters influence on evaporation intensity in flaming combustion zone / O.V. Vysokomornaya, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak // Fire Saf. J. – 2014. – V. 70. – P. 61–70.
9. Hsu, S.-H. On the formation of vapor film during quenching in de-ionized water

- and elimination of film boiling during quenching in natural sea water / S.-H. Hsu, Y.-H. Ho, M.-X. Ho, J.-C. Wang, C. Pan // *Int. J. Heat Mass Transfer*. – 2015. – V. 86. – P. 65–71.
10. Fu, B.-R. Quenching characteristics of a continuously-heated rod in natural sea water / B.-R. Fu, Y.-H. Ho, M.-X. Ho, C. Pan // *Int. J. Heat Mass Transf.* – 2016. – V. 95. – P. 206–213.
 11. Тулепбаев, В.Б. Применение вакуумных выпаривателей для очистки сточных вод гальванического производства / В.Б. Тулепбаев, И.Ю. Дьяченко // *Гальванотехника и обработка поверхности*. – 2008. – № 1. – Т. 16. – С. 40-45.
 12. Кофман, Д.И. Барабанные инсинераторы для термического уничтожения иловых осадков сточных вод / Д.И. Кофман, М.М. Востриков, А.В. Антоненко // *Химическое и нефтегазовое машиностроение*. – 2009. – № 9. – С. 41-43.
 13. Алешин, В.И. Модельное исследование охлаждения изолированной металлической сферы в водных средах (закалка) / В.И. Алешин, Н.А. Долотова, В.С. Анисимов // *Журнал технической физики*. – 2001. – № 12. – Т. 71. – С. 71–78.
 14. Никитин, М. Н. Использование парогазовой смеси при сжигании топлива / М. Н. Никитин // *Промышленная энергетика*. – 2010. – № 12. – С. 37–42.
 15. Марьин, Б.Н. Обработка поверхностей в металлургии и машиностроении / Б.Н. Марьин, В.А. Ким, О.Е. Сысоев. – Владивосток: Дальнаука, 2011. – 421 с.
 16. Barber, J. A review on boiling heat transfer enhancement with nanofluids / J. Barber, D. Brutin, L. Tadrist // *Nanoscale Res. Lett.* – 2011. – № 1. – V. 6. – P. 1–16.
 17. Strizhak, P.A. Influence of droplet distribution in a “water slug” on the temperature and concentration of combustion products in its wake / P.A. Strizhak // *J. Eng. Phys. Thermophys.* – 2013. – V. 86, № 4. – P. 895–904.

18. Mahmoudi, S.R. Two-phase cooling characteristics of mono-dispersed droplets impacted on an upward-facing heated disk / S.R. Mahmoudi, K. Adamiak, G.S. Peter Castle // *Exp. Therm. Fluid Sci.* – 2013. – V. 144. – P. 312–322.
19. Gupta, M. An experimental study of the effects of water mist characteristics on pool fire suppression / M. Gupta, A. Pasi, A. Ray, S.R. Kale // *Exp. Therm. Fluid Sci.* – 2013. – V. 44. – P. 768–778.
20. Avdeev, A.A. Kinetic analysis of intensive evaporation (method of reverse balances) / Avdeev, A.A., Zudin, and Yu.B. // *High Temp.* – 2012. – № 4. – V. 50. – P. 527–535.
21. Hertz, H. Ueber die Verdunstung der Flüssigkeiten, insbesondere des Quecksilbers, im luftleeren Raume / H. Hertz // *Ann. Phys. Chem.* – 1882. – V. 253. – P. 177.
22. Knudsen, M. Die maximale Verdampfungsgeschwindigkeit des Quecksilbers / M. Knudsen // *Ann. Phys.* – 1915 – V. 352. – P. 697.
23. Narvaez, J.A. Evaluation of nanofluids as potential novel coolant for aircraft applications: The case of de-ionized water-based alumina nanofluids / J.A. Narvaez, A.R. Veydt, R.J. Wilkens // *J. Heat Transfer.* – 2014. – № 5. – V. 136. – Article number 051702.
24. Fang, X. Thermal conductivity enhancement of ethylene glycol-based suspensions in the presence of silver nanoparticles of various shapes / X. Fang, Q. Ding, L.W. Fan, Z.T. Yu, X. Xu, G.H. Cheng, Y.C. Hu, K.F. Cen // *J. Heat Transfer.* – 2014. – № 3. – V. 136. – Article number 034501.
25. Wu, W. Jet impingement heat transfer using air-laden nanoparticles with encapsulated phase change materials / W. Wu, H. Bostanci, L.C. Chow, Y. Hong, S.J. Ding, M. Su, J.P. Kizito // *J. Heat Transfer.* – 2013. – № 5. – V. 135. – Article number 052202.
26. Xiao, X.K. On the behavior of flame expansion in pool fire extinguishment with steam jet / X.K. Xiao, B.H. Cong, X.S. Wang, K.Q. Kuang, Richard K.K. Yuen, G.X. Liao // *J. Fire Sci.* – 2011. – № 4. – V. 29. – P. 339–360.

27. Yao, B. Experimental study of suppressing Poly(methyl methacrylate) fires using water mists / B. Yao, B.H. Cong // *Fire Saf. J.* – 2012. – V. 47. – P. 32–39.
28. Zhou, X. Spray characterization measurements of a pendent fire sprinkler / X. Zhou, S.P. D’Aniello, H.-Z. Yu // *Fire Saf. J.* – 2012. – V. 54. – P. 36–48.
29. Försth, M. Enhanced absorption of fire induced heat radiation in liquid droplets / M. Försth, K. Möller // *Fire Saf. J.* – 2013. – V. 55. – P. 182–196.
30. Волков, Р.С. Влияние твердых включений в каплях жидкости на характеристики их испарения при движении через высокотемпературную газовую среду / Р.С. Волков, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // *Журнал технической физики.* – 2014. – Т. 84, № 12. – С. 33–37.
31. Yuen, M.C. Heat-transfer measurements of evaporating liquid droplets / M.C. Yuen, L.W. Chen // *Int. J. Heat Mass Transfer.* – 1978. – V. 21. – P. 537–542.
32. Renksizbulut, M. Experimental Study of Droplet Evaporation in a High-Temperature Air Stream / M. Renksizbulut, M.C. Yuen // *J. Heat Transfer.* – 1983. – V. 105. – P. 384–388.
33. Renksizbulut, M. Numerical Study of Droplet Evaporation in a High-Temperature Air Stream / M. Renksizbulut, M.C. Yuen // *J. Heat Transfer.* – 1983. – V. 105. – P. 389–397.
34. Домрачев, Р.А. О причинах загрязнения конденсата при очистке сточных вод гальванического производства методом вакуумного выпаривания / Р.А. Домрачев, Л.П. Фирсова, С.В. Шишкина // *Гальванотехника и обработка поверхности.* – 2006. – № 4. – Т. 14. – С. 23-26.
35. Игнатчик, С.Ю. Обеспечение надежности и энергосбережения при расчете сооружений для транспортирования сточных вод / С.Ю. Игнатчик // *Водоснабжение и санитарная техника.* – 2010. – № 8. – С. 56.
36. Вальдберг, А.Ю. Механические форсунки для подвода жидкости в газоочистные аппараты / А.Ю. Вальдберг, К.П. Макеева // *Химическое и нефтегазовое машиностроение.* – 2010. – № 5. – С. 42.

37. Паненко, Н.Н. Энергосбережение при очистке сточных вод населённых мест / Н.Н. Паненко, А.Ю. Скрыбин, К.К. Популиди, А.В. Денисова, В.В. Денисов // Инженерный вестник дон. – 2014. – № 2. – Т. 29. – С. 6.
38. Green, W.J. A Study of the Sensitivity of LOCA Heat Transfer Analysis for a Water-Cooled Reactor System / W.J. Green, K.R. Lawther // Nucl. Eng. Des. – 1978. – V. 47. – P. 87–99.
39. Berenson, P.J. Film Boiling Heat Transfer from a Horizontal Surface / P.J. Berenson // J. Heat Transfer. – 1961. – V. 83. – P. 351–356.
40. Sakurai, A. A General Correlation for Pool Boiling Heat Transfer from a Horizontal Cylinder to Subcooled Liquid, Part 1: A Theoretical Pool Film Boiling Heat Transfer Model Including Radiation Contribution and Its Analytical Solution / A. Sakurai, M. Shiotsu, K. Hata // J. Heat Transfer. – V. 112. – P. 430–440.
41. Sher, I. Film Boiling Collapse in Solid Spheres Immersed in a Subcooled Liquid / I. Sher, R. Harari, R. Reshef, E. Sher // Appl. Therm. Eng. – 2012. – V. 36. – P. 219–226.
42. Дзюбенко, Б.В. Интенсификация тепло- и массообмена на макро-, микро- и наномасштабах / Б.В. Дзюбенко, Ю.А. Кузма-Китча, А.И. Леонтьев, И.И. Федик, Л.П. Холпанов. – М.: ФГУП «ЦНИИАТОМИНФОРМ», 2008. – 532 с.
43. Дзюбенко, Б.В. Влияние интенсификации теплообмена на процессы соле- и коксоотложений в каналах с вихревой закруткой и дискретными турбулизаторами потока / Б.В. Дзюбенко, А.С. Мякочин, Н.У. Щербакова // Тепловые процессы в технике. – 2015. – № 11. – С. 498–504.
44. Dzyubenko, V.V. Influence of Flow Twisting on Convective Heat Transfer in Banks of Twisted Tubes / V.V. Dzyubenko // Heat Transf. Res. – 2005. – Vol. 36, № 6. – P. 449–460.
45. Кузма-Китча, Ю.А. Исследование интенсификации теплообмена при кипении воды на поверхности с микро- и нанорельефом / Ю.А. Кузма-Китча, А.В. Лавриков, М.В. Шустов, П.С. Чурсин, А.В. Чистякова, Ю.А.

- Звонарев, В.М. Жуков, Л.Т. Васильева // Теплоэнергетика. – 2014. – № 3. – С. 35–38.
46. Кузма-Кичта, Ю.А. Интенсификация теплообмена при конденсации водяных паров из уходящих дымовых газов / Ю.А. Кузма-Кичта, Д.Ю. Бухонов, Ю.В. Борисов // Теплоэнергетика. – 2007. – № 3. – С. 39–42.
47. Леонтьев, А.И. Влияние интенсификаторов теплообмена на теплогидравлические свойства каналов / А.И. Леонтьев, В.В. Олимпиев // Теплофизика высоких температур. – 2007. – Т. 45, № 6. – С. 925–953.
48. Терехов, В.И. Моделирование турбулентного двухфазного потока после внезапного расширения трубы при наличии испарения капель / В.И. Терехов, М.А. Пахомов // Теплофизика высоких температур. – 2009. – Т. 47, № 3. – С. 423–430.
49. Lebedev, V.P. Effects of flow turbulence on film cooling efficiency / V.P. Lebedev, V.V. Lemanov, S.Y. Misyura, V.I. Terekhov // Int. J. Heat Mass Transf. – 1995. – Vol. 38, № 11. – P. 2117–2125.
50. Misyura, S.Y. Droplets boiling crisis of ethanol water solution on duralumin substrate with SiO₂ nanoparticles coating / S.Y. Misyura // Exp. Therm. Fluid Sci. – 2016. – Vol. 75. – P. 43–53.
51. Накоряков, В.Е. Влияние формы твердого включения в неоднородной капле жидкости на условия ее “взрывного” разрушения при интенсивном теплообмене / В.Е. Накоряков, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // Доклады Академии наук. – 2015. – Т. 464, № 3. – С. 293–296.
52. Накоряков, В.Е. Пузырьковое кипение в каплях чистой воды и в каплях водного раствора соли / В.Е. Накоряков, С.Я. Мисюра // Доклады Академии наук. – 2014. – Т. 458, № 4. – С. 410.
53. Волков, Р.С. Влияние начальных параметров капель жидкости на процесс их испарения в области высокотемпературных газов / Р.С. Волков, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // Прикладная механика и техническая физика. – 2015. – Т. 56, № 2. – С. 95–105.

54. Жданова А.О. О возможности тушения лесных и торфяных пожаров полидисперсными водяными потоками / А.О. Жданова, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак, И.Р. Хасанов, Д.В. Федоткин // Пожаровзрывобезопасность. – 2015. – Т. 24, № 2. – С. 49–66.
55. Kuznetsov, G.V. Peculiarities of heat transfer in water droplets with a solid inclusion during heating in a high-temperature gas medium / G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak // J. Eng. Thermophys. – 2016. – Vol. 25, № 1. – P. 45–54.
56. Чиннов, Е.А. Интенсификация теплообмена в стекающей пленке жидкости / Е.А. Чиннов, И.А. Шарина, О.А. Кабов // Прикладная механика и техническая физика. – 2004. – Т. 45, № 5. – С. 109–116.
57. Чиннов, Е.А. Термосифон / Е.А. Чиннов, О.А. Кабов // Патент на изобретение RUS 2373473.
58. Kabov, O.A. Evaporation and flow dynamics of thin, shear-driven liquid films in microgap channels / O.A. Kabov, D.V. Zaitsev, V.V. Cheverda, A. Bar-Cohen // Exp. Therm. Fluid Sci. – 2011. – Vol. 35, № 5. – P. 825–831.
59. Исаев, С.А. Проблемы моделирования смерчевого теплообмена при турбулентном обтекании рельефа с лунками на стенке узкого канала / С.А. Исаев, А.И. Леонтьев // Инженерно-физический журнал. – 2010. – Т. 83, № 4. – С. 733–742.
60. Исаев, С.А. Моделирование смерчевой интенсификации теплообмена при низкоскоростном движении воздуха в прямоугольном канале с лунками. Часть. 2. Результаты параметрических исследований / С.А. Исаев, А.И. Леонтьев, П.А. Баранов // Теплоэнергетика. – 2007. – № 8. С. 63–70.
61. Быстров, Ю.А. Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб / Ю.А. Быстров, С.А. Исаев, Н.А. Кудрявцев, А.И. Леонтьев. – СПб.: Судостроение, 2005. – 392 с.
62. Léal, L. An overview of heat transfer enhancement methods and new perspectives: Focus on active methods using electroactive materials / L. Léal, M. Miscovic, P. Lavieille, M. Amokrane, F. Pigache, F. Topin, B. Nogarède, L. Tadrist // Int. J. Heat Mass Transf. – 2013. – Vol. 61, № 1. – P. 505–524.

63. Tadrict, L. About the use of fibrous materials in compact heat exchangers / L. Tadrict, M. Miscevic, O. Rahli, F. Topin // *Exp. Therm. Fluid Sci.* – 2004. – Vol. 28, № 2–3. – P. 193–199.
64. Brutin, D. Pressure drop and void fraction during flow boiling in rectangular minichannels in weightlessness / D. Brutin, V.S. Ajaev, L. Tadrict // *Appl. Therm. Eng.* – 2013. – Vol. 51, № 1–2. – P. 1317–1327.
65. Vancauwenberghe, V. Wetting and evaporation of a sessile drop under an external electrical field: A review / V. Vancauwenberghe, P. Di Marco, D. Brutin // *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.* – 2013. – Vol. 432 – P. 50–56.
66. Bourdon, B. Enhancing the onset of pool boiling by wettability modification on nanometrically smooth surfaces, / B. Bourdon, P. Di Marco, R. Rioboo, M. Marengo, J. De Coninck // *Int. Commun. Heat Mass Transf.* – 2013. – Vol. 45. – P. 11–15.
67. Dawood, H.K. Numerical investigation on heat transfer and friction factor characteristics of laminar and turbulent flow in an elliptic annulus utilizing nanofluid / H.K. Dawood, H.A. Mohammed, N.A.C. Sidik, K.M. Munisamy // *Int. Commun. Heat Mass Transf.* – 2015. – Vol. 66. – P. 148–157.
68. Vanaki, S.M. Numerical study of convective heat transfer of nanofluids: A review / S.M. Vanaki, P. Ganesan, H.A. Mohammed // *Renew. Sustain. Energy Rev.* – 2016. – Vol. 54. – P. 1212–1239.
69. Salman, B.H. Heat transfer enhancement of nanofluids flow in microtube with constant heat flux / B.H. Salman, H.A. Mohammed, A.S. Kherbeet // *Int. Commun. Heat Mass Transf.* – 2012. – Vol. 39, № 8. – P. 1195–1204.
70. Salman, B.H. Numerical and experimental investigation of heat transfer enhancement in a microtube using nanofluids / B.H. Salman, H.A. Mohammed, A.S. Kherbeet // *Int. Commun. Heat Mass Transf.* – 2014. – Vol. 59. – P. 88–100.
71. Han, J.C. Heat transfer enhancement in channels with turbulence promoters / J.C. Han, J.S. Park, C.K. Lei // *J. Eng. Gas Turbines Power.* – 1985. – Vol. 107, № 3. – P. 628–635.

72. Rallabandi, A.P. Heat transfer enhancement in rectangular channels with axial ribs or porous foam under through flow and impinging jet conditions / A.P. Rallabandi, D.-H. Rhee, Z. Gao, J.-C. Han // *Int. J. Heat Mass Transf.* – 2010. – Vol. 53, № 21–22. – P. 4663–4671.
73. Ekkad, S.V. A review of hole geometry and coolant density effect on film cooling / S.V Ekkad, J.-C. Han // *Front. Heat Mass Transf.* – 2015. – Vol. 6, № 1. – P. 1–15.
74. Bergles, A.E. Current progress and new developments in enhanced heat and mass transfer / A.E. Bergles, R.M. Manglik // *J. Enhanc. Heat Transf.* – 2013. – Vol. 20, № 1. – P. 1–15.
75. Bergles, A.E. Recent developments in enhanced heat transfer / A.E. Bergles // *Heat Mass Transf.* – 2011. – Vol. 47, № 8. – P. 1001–1008.
76. Bergles, A.E. New frontiers in enhanced heat transfer / A.E. Bergles // *Am. Soc. Mech. Eng. Heat Transf. Div. HTD.* – 2000. – Vol. 365. – P. 1–8.
77. Исаев, С.А. Интенсификация теплообмена при ламинарном и турбулентном течении в узком канале с однорядными овальными лунками / С.А. Исаев, А.И. Леонтьев, Н.В. Корнев, Э. Хассель, Я.П. Чудновский // *Теплофизика высоких температур.* – 2015. – Т. 53, № 3. – С. 390–402.
78. Исаев, С.А. Численное исследование влияния шероховатости на конвективный теплообмен при стационарном ламинарном обтекании маслом М20 кругового цилиндра / С.А. Исаев, Ю.В. Жукова, П.А. Баранов, А.Г. Судаков // *Теплофизика высоких температур.* – 2015. – Т. 53, № 5. – С. 765–772.
79. Исаев, С.А. Интенсификация вихревого теплообмена в пакете поперечных труб с упорядоченными траншеями / С.А. Исаев, А.И. Леонтьев, Н.А. Кудрявцев, П.А. Баранов, Ю.В. Жукова // *Инженерно-физический журнал.* – 2005. – Т. 78, № 1. – С. 112–122.
80. Олимпиев, В.В. Эффективность каналов с выступами интенсификаторами теплообмена / В.В. Олимпиев, Б.Г. Мирзоев // *Теплоэнергетика.* – 2013. – № 3. – С. 28–35.

81. Леонтьев, А.И. Теплофизика и теплотехника перспективных интенсификаторов теплообмена (обзор) / А.И. Леонтьев, В.В. Олимпиев // Известия РАН. Энергетика. – 2011. – № 1. – С. 7–31.
82. Олимпиев, В.В. Влияние интенсификации теплообмена на эффективность теплообменников при их модернизации / В.В. Олимпиев // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2000. – № 4. – С. 61–62.
83. Дрейцер, Г.А. Моделирование теплообмена в условиях его интенсификации при турбулентном течении в каналах теплоносителей с постоянными свойствами / Г.А. Дрейцер, И.Е. Лобанов // Теплоэнергетика. – 2003. – № 1. – С. 54–60.
84. Kalinin, E.K. Comprehensive study of heat transfer enhancement in tubular heat exchangers / E.K. Kalinin, G.A. Dreitser, N.V. Paramonov, A.S. Myakochin, A.I. Tikhonov, S.G. Zakirov, E.S. Levin, L.S. Yanovsky // Exp. Therm. Fluid Sci. – 1991. – Vol. 4, № 6. – P. 656–666.
85. Вараксин, А.Ю. Взрывное вскипание перегретой жидкости как способ ее тонкой фрагментации / А.Ю. Вараксин, В.Б. Алексеев, В.И. Залкинд, Ю.А. Зейгарник, Д.В. Мариничев, В.Л. Низовский, Л.В. Низовский // Доклады Академии наук. – 2013. – Т. 448, № 6. – С. 654.
86. Агальцов, А.М. Исследование быстропротекающих процессов при кипении недогретой воды / А.М. Агальцов, С.Н. Вавилов, Ю.А. Зейгарник, С.А. Ковалев // Вестник МЭИ. – 2013. – № 4. – С. 59–63.
87. Жилин, В.Г. Экспериментальное исследование характеристик взрывного вскипания недогретой воды на горячей поверхности при смене режимов кипения / В.Г. Жилин, Ю.А. Зейгарник, Ю.П. Ивочкин, А.А. Оксман, К.И. Белов // Теплофизика высоких температур. – 2009. – Т. 47, № 6. – С. 891–898.
88. Зейгарник, Ю.А. Заметки о некоторых аспектах парового взрыва / Ю.А. Зейгарник, Ю.П. Ивочкин, В.С. Григорьев, А.А. Оксман // Теплофизика высоких температур. – 2008. – Т. 46, № 5. – С. 797–800.

89. Григорьев, В.С. Поведение паровой пленки на сильно перегретой поверхности, погруженной в недогретую воду / В.С. Григорьев, В.Г. Жилин, Ю.А. Зейгарник, Ю.П. Ивочкин, В.В. Глазко, О.А. Синкевич // Теплофизика высоких температур. – 2005. – Т. 43, № 1. – С. 100–114.
90. Joule, J.P. On the surface condensation of steam / Joule, J.P. // J. Franklin Inst. – 1862. – Vol. 73, № 2. – P. 136–137.
91. Manglik, R.M. Enhanced Heat and Mass Transfer in the New Millennium: A Review of the 2001 Literature / R.M. Manglik, A.E. Bergles // J. Enhanc. Heat Transf. – 2004. – Vol. 11, № 2. – P. 87–118.
92. Dewan, A. Review of passive heat transfer augmentation techniques, / A. Dewan, P. Mahanta, K.S. Raju, P.S. Kumar // Proc. Inst. Mech. Eng. Part A J. Power Energy. – 2004. – Vol. 218, № 7. – P. 509–527.
93. Лаптев, А.Г. Методы интенсификации и моделирования тепломассообменных процессов. Учебно-справочное пособие / А.Г. Лаптев, Н.А. Николаев, М.М. Башаров. – М.: «Теплотехник», 2011. – 335 с.
94. Sheikholeslami, M. Review of heat transfer enhancement methods: Focus on passive methods using swirl flow devices / M. Sheikholeslami, M. Gorji-Bandpy, D.D. Ganji // Renew. Sustain. Energy Rev. – 2015. – Vol. 49. – P. 444–469.
95. Webb, R.L. Enhancement of single-phase heat transfer, Chapter 17 in S. Kaçak, R.K. Shah and W. Aung (eds.), Handbook of Single-Phase Convective Heat Transfer. – New York. – John Wiley, 1987. – P. 1–62.
96. Solangi, K.H. A comprehensive review of thermo-physical properties and convective heat transfer to nanofluids / K.H. Solangi, S.N. Kazi, M.R. Lohar, A. Badarudin, A. Amiri, R. Sadri, M.N.M. Zubir, S. Gharekhani, K.H. Teng // Energy. – 2015. – Vol. 89. – P. 1065–1086.
97. Фокин, Б.С. Критический тепловой поток при кипении водной дисперсии наночастиц / Б.С. Фокин, М.Я. Беленький, В.И. Альмяшев, В.Б. Хабенский, О.В. Альмяшева, В.В. Гусаров // Письма в Журнал технической физики. – 2009. – № 10. – Т. 35. – С. 1–5.

98. Корольченко, Д.А. Тушение пламени гидрофобных материалов водными растворами смачивателей / Д.А. Корольченко, А.Ф. Шароварников // Пожаровзрывобезопасность. – 2015. – Т. 24, № 3. – С. 61 – 68.
99. Копылов, Н.П. Повышение эффективности тушения лесных пожаров с использованием добавок к воде / Н.П. Копылов, И.Р. Хасанов, А.Е. Кузнецов, Д.В. Федоткин, Е.А. Москвиллин, П.А. Стрижак, В.Н. Карпов // Пожарная безопасность. – 2015. – № 4. – С. 46–50.
100. Анохина, Е.В. Исследование процессов испарения и кипения жидкостей / Е.В. Анохина // Журнал технической физики. – 2010. – Т. 80, № 8. – С. 32–37.
101. Анохина, Е.В. Экспериментальное исследование критической тепловой нагрузки при кипении бинарных смесей жидкостей / Е.В. Анохина // Журнал технической физики. – 2009. – Т. 79, № 4. – С. 153–155.
102. Jeong, Y.H. Wettability of heated surfaces under pool boiling using surfactant solutions and nano-fluids / Y.H. Jeong, W.J. Chang, S.H. Chang // Int. J. Heat Mass Transfer. – 2008. – Vol. 51. – P. 3025–3031.
103. Chen, R.-H. Surface tension of evaporating nanofluid droplets / R.-H. Chen, T.X. Phuoc, D. Martello // Int. J. Heat Mass Transfer. – 2011. – Vol. 54. – P. 2459–2466.
104. Gerken, W.J. Nanofluid pendant droplet evaporation: Experiments and modeling / W.J. Gerken, A.V. Thomas, N. Koratkar, M.A. Oehlschlaeger // Int. J. Heat Mass Transfer. – 2014. – Vol. 74. – P. 263–268.
105. Agogo, H. Spreading and Evaporation of Surfactant Solution Droplets / H. Agogo, S. Semenov, F. Ortega, R.G. Rubio, V.M. Starov, M.G. Velarde // Prog. Colloid Polym. Sci. – 2011. – Vol. 139. – P. 1–6.
106. Гуцев, Н.Д. Исследование зависимости времени смачивания лесных горючих материалов от величины поверхностного натяжения растворов смачивателей и пенообразователей / Н.Д. Гуцев, Н.В. Михайлова, Н.А. Грабежева // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. – 2015. – № 3. – С. 31–43.

107. Волков, Р.С. Влияние твердых включений в каплях жидкости на интенсивность парообразования в зоне пламени / Р.С. Волков, М.В. Забелин, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // Пожаровзрывобезопасность. – 2014. – Т. 23, № 5. – С. 10–17.
108. Hsieh, S.-S. Nanofluids spray heat transfer enhancement / S.-S. Hsieh, H.-H. Liu, Y.-F. Yeh // Int. J. Heat Mass Transfer. – 2016. – Vol. 94. – P. 104–118.
109. Пряжников, М.И. Влияние диаметра, материала наночастиц и размера нагревателя на критическую плотность теплового потока при кипении наножидкостей / М.И. Пряжников, А.В. Минаков, В.Я. Рудяк // Письма в Журнал технической физики. – 2015. – Т. 41, № 18. – С. 53–59.
110. Минаков, А.В. Измерение критической плотности теплового потока при кипении наножидкостей на цилиндрическом нагревателе / А.В. Минаков, А.С. Лобасов, В.Я. Рудяк, Д.В. Гузей, М.И. Пряжников // Письма в Журнал технической физики. – 2014. – Т. 40, № 13. – С. 44–51.
111. Бондаренко, Б.И. Наножидкости для энергетики: влияние стабилизации на критический тепловой поток при кипении / Б.И. Бондаренко, В.Н. Морару, С.В. Сидоренко, Д.В. Комыш, А.И. Ховавко // Письма в Журнал технической физики. – 2012. – Т. 38, № 18. – С. 68–78.
112. Seon Ahn, H. A Review on Critical Heat Flux Enhancement With Nanofluids and Surface Modification / H. Seon Ahn, M. Hwan Kim // J. Heat Transfer. – 2012. – Vol. 134, № 2. – 024001.
113. Kim, H. Enhancement of critical heat flux in nucleate boiling of nanofluids: a state-of-art review / H. Kim // Nanoscale Res. Lett. – 2011. – Vol. 6, № 1. – P. 1–18.
114. Бобков, В.П. Критический тепловой поток при кипении воды в каналах. современное состояние, характерные закономерности, нерешенные проблемы и пути их решения (обзор) / В.П. Бобков // Теплоэнергетика. – 2015. – № 2. – С. 10.
115. Ягов, В.В. Механизм кризиса кипения в большом объеме / В.В. Ягов // Теплоэнергетика. – 2003. – № 3. – С. 2–10.

116. Kim, S.J. Surface wettability change during pool boiling of nanofluids and its effect on critical heat flux / S.J. Kim, I.C. Bang, J. Buongiorno, L.W. Hu // *Int. J. Heat Mass Transf.* – 2007. – Vol. 50. – P. 4105–4116.
117. Танасюк, Д.А. Нетривиальный характер электропроводности водных и водно-ацетоновых растворов KCl в интервале низких его концентраций / Д.А. Танасюк, В.И. Ермаков // *Успехи в химии и химической технологии.* – 2012. – Т. 26, № 2. – С. 35–39.
118. Huang, C.K. The Effects of Dissolved Salt on the Leidenfrost Transition / C.K. Huang, V.P. Carey // *Int. J. Heat Mass Transfer.* – 2007. – Vol. 50. – P. 269–282.
119. Алехин, В.П. Новая нанотехнология поверхностной упрочняющей обработки массивных изделий из конструкционных и инструментальных сталей / В.П. Алехин, О.В. Алехин // *Тяжелое машиностроение.* – 2008. – № 2. – С. 22–25.
120. Леонтьев, А.И. Вклад отечественных ученых в теорию теплообмена / А.И. Леонтьев // *Теплофизика и аэромеханика.* – 1999. – Т. 6, № 2. – С. 141–155.
121. Занегин, И.Н. Идеальный микроклимат для вашего оборудования. системы контроля микроклимата Rittal - качество, инновации, энергоэффективность / И.Н. Занегин // *Век качества.* – 2010. – № 5. – С. 62–63.
122. Chen X. A review of small heat pipes for electronics / X. Chen, H. Ye, X. Fan, T. Ren, G. Zhang // *Appl. Therm. Eng.* – 2016. – Vol. 96. – P. 1–17.
123. Panão, M.R.O. High-power electronics thermal management with intermittent multijet sprays / M.R.O. Panão, A.M. Correia, A.L.N. Moreira // *Appl. Therm. Eng.* – 2012. – Vol. 37. – P. 293–301.
124. Gupta, M. A comprehensive review of experimental investigations of forced convective heat transfer characteristics for various nanofluids / M. Gupta, N. Arora, R. Kumar, S. Kumar, N. Dilbaghi // *International Journal of Mechanical and Materials Engineering.* – 2014. – Vol. 9, № 1. – 11.
125. Trisaksri, V. Critical review of heat transfer characteristics of nanofluids / V. Trisaksri, S. Wongwises // *Renew. Sustain. Energy Rev.* – 2007. – Vol. 11, № 3. – P. 512–523.

126. Godson, L. Enhancement of heat transfer using nanofluids – An overview / L. Godson, B. Raja, D. Mohan Lal, S. Wongwises // *Renew. Sustain. Energy Rev.* – 2010. – Vol. 14, № 2. – P. 629–641.
127. Abu-Nada, E. Application of nanofluids for heat transfer enhancement of separated flows encountered in a backward facing step / E. Abu-Nada // *Int. J. Heat Fluid Flow.* – 2008. – Vol. 29, №1. – P. 242–249.
128. Kathiravan, R. Preparation and pool boiling characteristics of copper nanofluids over a flat plate heater / R. Kathiravan, R. Kumar, A. Gupta, R. Chandra // *Int. J. Heat Mass Transfer.* – 2010. – Vol. 53, № 9–10. P. 1673–1681.
129. Евдокимов, А.Н. Наножидкости для охлаждения высокофорсированных теплоэнергетических установок / А.Н. Евдокимов, А.М. Жуков, А.В. Жаров, Н.Г. Савинский, А.А. Павлов // *История и перспективы развития транспорта на севере России.* – 2014. – № 1. – С. 105–109.
130. Сироткина, А.Л. К вопросу о влиянии пленки из наночастиц на поверхности нагрева на процесс кипения наножидкости / А.Л. Сироткина // *Научный альманах.* – 2015. – № 8(10). – С. 885–888.
131. Terekhov, V.I. The mechanism of heat transfer in nanofluids: state of the art (review). Part 2. Convective heat transfer / V.I. Terekhov, S.V. Kalinina, V.V. Lemanov // *Thermophys. Aeromechanics.* – 2010. – Vol. 17, № 2. – P. 157–171.
132. Волков, Р.С. Экспериментальное исследование влияния начальной температуры воды и содержания в ней примесей солей на интенсивность испарения в зоне пламени при подаче в виде крупных монолитных капель и тонкораспыленной струи / Р.С. Волков, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // *Пожарная безопасность.* – 2014. – № 2. – С. 93–98.
133. Volkov, R.S. Water Droplet With Carbon Particles Moving Through High Temperature Gases / R.S. Volkov, G.V. Kuznetsov, M.V. Piskunov, P.A. Strizhak // *J. Heat Transfer.* – 2016. – V. 138, № 1. – 014502.
134. Хорошавин, Л.Б. Торфяные пожары и способы их тушения / Л.Б. Хорошавин, О.А. Медведев, В.А. Беляков, О.В. Беззапонная // *Пожаровзрывобезопасность.* – 2012. – Т. 21, № 11. – С. 85–89.

135. Казаков, М.В. Применение поверхностно-активных добавок для тушения пожаров / М.В. Казаков. – М.: Стройиздат, 1977. – 80 с.
136. Стрижак, П.А. Влияние распределения капель в «водяном снаряде» на температуру и концентрацию продуктов сгорания в его следе / П.А. Стрижак // Инженерно-физический журнал. – 2013. – Т. 86, № 4. – С. 839–848.
137. Стрижак, П.А. Численный анализ диффузионно-конвективных процессов тепломассопереноса при движении капель воды через высокотемпературные продукты сгорания // Пожаровзрывобезопасность. – 2013. – Т. 22, № 7. – С. 11–21.
138. Волков, Р.С. Экспериментальное исследование изменения массы капель воды при их движении через высокотемпературные продукты сгорания / Р.С. Волков, О.В. Высокоморная, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // Инженерно-физический журнал. – 2013. – Т. 86, № 6. – С. 1327–1332.
139. Karpov, A.I. Numerical modeling of the effect of fine water mist on the small scale flame spreading over solid combustibles / A.I. Karpov, V.B. Novozhilov, A.A. Galat, V.K. Bulgakov // Fire Safety Science: Proceeding of Eight International Symposium. – 2005. – Vol. 27. – P. 753–764.
140. Wighus, R. Water mist fire suppression technology – status and gaps in knowledge / R. Wighus // Proceedings of the International Water Mist Conference. – Vienna, 2001. – P. 1–26.
141. Жданова, А.О. Численное исследование испарения пленки воды на поверхности лесного горючего материала / А.О. Жданова, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // Пожаровзрывобезопасность. – 2014. – Т. 23, № 6. – С. 18–25.
142. Жданова, А.О. Численное исследование физико-химических процессов при испарении воды в порах приповерхностного слоя лесного горючего материала / А.О. Жданова, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // Инженерно-физический журнал. – 2014. – Т. 87, № 4. – С. 751–758.

143. Лиштван, И.И. Исследование возможности использования полимеров и ПАВ как структурообразователей торфяных почв. Новые процессы и продукты переработки торфа: сб. статей. – М.: Наука и техника, 1982. – С. 15–19.
144. Волков, Р.С. О некоторых физических закономерностях испарения распыленной воды при движении через высокотемпературные продукты сгорания / Р.С. Волков, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323, № 2. – С. 201–207.
145. Ищенко, А.Н. Актуальные проблемы мониторинга водных объектов / А.Н. Ищенко // Вода: химия и экология. – 2010. – № 7. – С. 2–5.
146. Нигматуллина, Э.Р. Повышение эффективности устройств для термического обезвреживания и очистки сточных вод: диссертация кандидата технических наук / Э.Р. Нигматуллина. – Уфа, 2002. – 146 с.
147. Седлов, А.С. Способ термического обессоливания воды / А.С. Седлов, В.В. Шищенко, И.П. Ильина, С.В. Сидорова, Е.Н. Потапкина // Патент на изобретение RUS 2074122.
148. Бородай, Е.Н. Ресурсосберегающая технология очистки нефтесодержащих сточных вод ТЭС / Е.Н. Бородай, Л.А. Николаева, А.Г. Лаптев // Теплоэнергетика. – 2011. – № 7. – С. 73–75.
149. Николаева, Л.А. Ресурсосберегающая технология биосорбционной очистки сточных вод промышленных предприятий / Л.А. Николаева, Р.Я. Недзвецкая // Энергосбережение и водоподготовка. – 2011. – № 2. – С. 28–30.
150. Черныш, А.М. Вакуумная установка для обработки воды дистилляцией / А.М. Черныш // Патент на изобретение RUS 2066300.
151. Чичеткин, В.И. Устройство для очистки жидкости дистилляцией / В.И. Чичеткин // Патент на изобретение RUS 2069067.
152. Онуфриенко, С.В. Выпарной аппарат для очистки продувочной воды парогенерирующей установки атомной электростанции / С.В. Онуфриенко,

- М.Р. Багерман, В.Н. Беляев, Б.А. Гершевич, А.А. Зубков, О.П. Кректунов // Патент на изобретение RUS 2100041.
153. Kang, J. Film boiling heat transfer on a completely wettable surface with atmospheric saturated distilled water quenching / J. Kang, S.H. Kim, H. Jo, G. Park, H.S. Ahn, K. Moriyama, M.H. Kim, H.S. Park // *Int. J. Heat Mass Transf.* – 2016. – Vol. 93. – P. 67–74.
154. Kim, H. On the quenching of steel and zircaloy spheres in water-based nanofluids with alumina, silica and diamond nanoparticles / H. Kim, G. DeWitt, T. McKrell, J. Buongiorno, L. Hu // *Int. J. Multiph. Flow.* – 2009. – Vol. 35, № 5 – P. 427–438.
155. Kim, H. Nanoparticle deposition effects on the minimum heat flux point and quench front speed during quenching in water-based alumina nanofluids / H. Kim, J. Buongiorno, L.-W. Hu, T. McKrell // *Int. J. Heat Mass Transf.* – 2010. – Vol. 53, № 7–8. – P. 1542–1553.
156. Buchanan, D.J. Mechanism for vapor explosions / D.J. Buchanan, T.A. Dullforce // *Nature.* – 1973. – Vol. 245. – P. 32–34.
157. Matsumura, K. Self-Trigging Mechanism of Vapor Explosions for Molten Tin in Water / K. Matsumura, H. Nariari // *J. Nucl. Sci. Technol.* – 1996. – Vol. 33, № 4. – P. 298–306.
158. Berthoud, G. Vapor Explosions / G. Berthoud // *Annu. Rev. Fluid Mech.* – 2000. – Vol. 32. – P. 573–611.
159. Park, H.S. Fine fragmentation of molten droplet in highly subcooled water due to vapor explosion observed by X-ray radiography / H.S. Park, R.C. Hansson, B.R. Seghal // *Exp. Therm. Fluid Sci.* – 2005. – Vol. 29. – P. 351–361.
160. Arai, T. Thermal Hydraulic Criteria for Base-Trigged Vapor Explosion / T. Arai, Y. Abe // *J. Therm. Sci. Technol.* – 2007. – Vol. 2, № 2. – P. 134–145.
161. Буланов, Н.В. Интенсификация теплообмена и цепная активация центров кипения при использовании эмульсий с низкокипящей дисперсной фазой / Н.В. Буланов, Б.М. Гасанов // *Вестник Уральского государственного университета путей сообщения.* – 2010. – № 3. – С. 29–37.

162. Гасанов, Б.М. Влияние размера капелек дисперсной фазы эмульсии на теплообмен при пузырьковом кипении эмульсии. Кризис кипения / Б.М. Гасанов, Н.В. Буланов // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2014. – № 2. – С. 12–18.
163. Буланов, Н.В. Зависимость начала цепной активации центров кипения от перегрева капелек дисперсной фазы эмульсии / Н.В. Буланов, Б.М. Гасанов // Теплофизика высоких температур. – 2011. – Т. 49, № 2. – С. 221–224.
164. Буланов, Н.В. Критический объем и цепная активация центров кипения в эмульсиях с низкокипящей дисперсной фазой / Н.В. Буланов, Б.М. Гасанов, Г.Н. Муратов // Теплофизика высоких температур. – 2009. – Т. 47, № 6. – С. 899–904.
165. Lu, Q. Visual investigation on the breakup of high superheated molten metal during FCI process / Q. Lu, D. Chen, C. Li // Appl. Therm. Eng. – 2016. – Vol. 98. – P. 962–975.
166. Corradini, M.L. Vapor explosions in light water reactors: A review of theory and modeling / M.L. Corradini, B.J. Kim, M.D. Oh // Prog. Nucl. Energy. – 1988. – Vol. 22, № 1. – P. 1–117.
167. Dinh, T.N. Experimental and analytical studies of melt jet-coolant interactions: a synthesis / T.N. Dinh, V.A. Bui, R.R. Nourgaliev, J.A. Green, B.R. Sehgal // Nucl. Eng. Des. – 1999. – Vol. 189, № 1. – P. 299–327.
168. Abe, Y. Fragmentation behavior during molten material and coolant interactions / Y. Abe, E. Matsuo, T. Arai, H. Nariai, K. Chitose, K. Koyama, K. Itoh // Nucl. Eng. Des. – 2006. – Vol. 236, № 14–16. – P. 1668–1681.
169. Abe, Y. Study on thermal-hydraulic behavior during molten material and coolant interaction / Y. Abe, T. Kizu, T. Arai, H. Nariai, K. Chitose, K. Koyama // Nucl. Eng. Des. – 2004. – Vol. 230, № 1–3. – P. 277–291.
170. Eckhoff, R.K. Water vapour explosions – A brief review / R.K. Eckhoff // J. Loss Prev. Process Ind. – 2016. – Vol. 40. – P. 188–198.
171. Полежаев, Ю.В. Тепловая защита / Ю.В. Полежаев, Ф.Б. Юрьевич. – М., 1976. – 391 с.

172. Sutka, A. Sol-gel auto-combustion synthesis of spinel-type ferrite nanomaterials / A. Sutka, G. Mezinskis // *Front. Mater. Sci.* – 2012. – № 2. – V. 6. – P. 128–141.
173. Boulos, M.I. New frontiers in thermal plasmas from space to nanomaterials / M.I. Boulos // *Nucl. Eng. Technol.* – 2012. – № 5. – V. 44. – P. 1–8.
174. Wang, Q. A review on application of carbonaceous materials and carbon matrix composites for heat exchangers and heat sinks / Q. Wang, X.H. Han, A. Sommers, Y. Park, C. T' Joen, A. Jacobi // *Int. J. Refrig.* – 2012. – № 1. – V. 35. – P. 7–26.
175. Wissler, M., Graphite and carbon powders for electrochemical applications / M. Wissler // *J. Power Sources.* – 2006. – № 2. – V. 156. – P. 142–150.
176. Lide, D.R. *CRC Handbook of Chemistry and Physics* / D.R. Lide, Ed. 79th Edition. – Boca Raton, FL: CRC Press, 1998.
177. *Metals Handbook, Volume 2 – Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials.* – ASM International, 2001.
178. Nayer, A. *The Metals Databook* / A. Nayer. – New York: McGraw-Hill, 1997.
179. Winkler, E.M. *Stone: Properties, Durability in Man's Environment, Second Edition* / E.M. Winkler. – New York: Springer-Verlag, 1975.
180. Lide, D.R. *CRC Handbook of Chemistry and Physics* / D.R. Lide, Ed. 80th Edition. – Boca Raton, FL: CRC Press, 1999.
181. Touloukian, Y.S. *Thermophysical Properties of Matter, Thermal Diffusivity* / Y.S. Touloukian, R.W. Powell, C.Y. Ho, M.C. Nicolaou. – New York: TPRC, IFI/Plenum, 1973.
182. Vargaftik, N.B. *Handbook of Thermophysical Properties of Liquids and Gases* / N.B. Vargaftik, Y.K. Vinogradov, V.S. Yargin. – New York: Begell House, 1996.
183. Touloukian, Y.S. *Thermophysical Properties of Matter, Thermal Conductivity* / Y.S. Touloukian, R.W. Powell, C.Y. Ho, P.G. Klemens. – New York: TPRC, IFI/Plenum, 1970.
184. *Metals Handbook, Volume 1 – Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys.* – ASM International, 1991.

185. Metals Handbook, Volume 3 – Properties and Selection: Stainless Steels, Tool Materials and Special-Purpose Metals. – ASM International, 1980.
186. MatWeb Material property data [Электронный ресурс]. – MatWeb, LLC, 2016. – Режим доступа: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=1b42254ce6554fa380e30579438c738a>.
187. Volkov, R.S. Influence of droplet concentration on evaporation in a high-temperature gas / R.S. Volkov, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak // *Int. J. Heat Mass Transfer*. – 2016. – V. 96. – P. 20–28.
188. Maltsev, R.V. Gas-dynamic colliders: Numerical simulations / R.V. Maltsev, A.K. Rebrov // *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* – 2011. V. 48, № 3. – P. 420–427.
189. Ozar, B. Interfacial area concentration in gas–liquid bubbly to churn-turbulent flow regime / B. Ozar, A. Dixit, S.W. Chen, T. Hibiki, M. Ishii // *Int. J. Heat Fluid Flow*. – 2012. – V. 38. – P. 168–179.
190. Dem'yanov, A.Yu. Simulation of the transfer of water with a fine-disperse gas phase in porous media / A.Yu. Dem'yanov, O.Yu. Dinariev, E.N. Ivanov // *J. Eng. Phys. Thermophys.* – 2012. – V. 85, № 6. – P. 1243–1253.
191. Hernández-Bocanegra, C.A. Measurement of heat flux in dense air-mist cooling: Part I – A novel steady-state technique / C.A. Hernández-Bocanegra, A.E. Humberto Castillejos, F.A. Acosta-González, Zhou Xiaoxu, B.G. Thomas // *Exp. Therm. Fluid Sci.* – 2013. – V. 44. – P. 147–160.
192. Hernández-Bocanegra, C.A. Measurement of heat flux in dense air-mist cooling: Part II – The influence of mist characteristics on steady-state heat transfer / C.A. Hernández-Bocanegra, A.E. Humberto Castillejos, F.A. Acosta-González, Zhou Xiaoxu, B.G. Thomas // *Exp. Therm. Fluid Sci.* – 2013. – V. 44. – P. 161–173.
193. Meenakshi, G. An experimental study of the effects of water mist characteristics on pool fire suppression / G. Meenakshi, P. Amit, R. Anjan, S.R. Kale // *Exp. Therm. Fluid Sci.* – 2013. – V. 44. – P. 768–778.
194. Vysokomornaya, O.V. Heat and Mass Transfer in the Process of Movement of Water Drops in a High-temperature Gas Medium / O.V. Vysokomornaya, G.V.

- Kuznetsov, P.A. Strizhak // *J. Eng. Phys. Thermophys.* – 2013. – V. 86, № 1. – P. 62–68.
195. Trinh, E.H. The dynamics of ultrasonically levitated drops in an electric field / E.H. Trinh, R.G. Holt, D.B. Thiessen // *Phys. Fluids.* – 1996. – V. 8, № 1. – P. 43–61.
196. Dubrovskii, V.V. Measuring natural oscillation periods for droplets and two-component particles / V.V. Dubrovskii, A.M. Podvysotskii, A.A. Shraiber // *J. Eng. Phys. Thermophys.* – 1990. – V. 58, № 5. – P. 622–625.
197. Basset, A.B. On the motion of a sphere in a viscous liquid / A.B. Basset // *Phil. Trans. Roy. Soc. A.* – 1888. – V. 179. – P. 43–69.
198. Boussinesq, J.V. Sur la resistance d'une sphere solide / J.V. Boussinesq // *C.R. Hebd. Seanc. Acad. Sci. Paris.* – 1885. – V. 100. – P. 935.
199. Tchen, C.M. Mean value and correlation problems connected with the motion of small particles suspended in a turbulent fluid / C.M. Tchen. – Dordrecht, Netherlands: Springer Science+Business Media, 1947.
200. Crowe, C.T. Fundamentals of gas-particle and gas-droplet flows / C.T. Crowe, M. Sommerfeld. – Boca Raton: CRS Press, 1998.
201. Terekhov, V.I. Numerical study of heat transfer in a laminar mist flow over a isothermal flat plate / V.I. Terekhov, M.A. Pakhomov // *Int. J. Heat Mass Transfer.* – 2002. – V. 45, № 10. – P. 2077–2085.
202. Liua, Y. Experimental study of non-uniform inlet conditions and three-dimensional effects of vertical air–water two-phase flow in a narrow rectangular duct / Y. Liua, T. Roy, D.Y. Lee, M. Ishii, J.R. Buchanan Jr. // *Int. J. Heat Fluid Flow.* – 2013. – V. 39. – P. 173–186.
203. Kuznetsov, G.V. Evaporation, boiling and explosive breakup of heterogeneous droplet in a high-temperature gas / G.V. Kuznetsov, M.V. Piskunov, P.A. Strizhak // *Int. J. Heat Mass Transfer.* – 2016. – V. 92. – P. 360–369.
204. Piskunov, M.V. Intensive evaporation and boiling of a heterogeneous liquid droplet with an explosive disintegration in high-temperature gas area / M.V.

- Piskunov, P.A. Strizhak, A.A. Shcherbinina // *Therm. Sci.* – 2016. – V. 20, № 2. – P. 541–553.
205. Dmitrienko, M.A. Explosive breakup of a water droplet with a nontransparent solid inclusion heated in a high-temperature gaseous medium / M.A. Dmitrienko, M.V. Piskunov, P.A. Strizhak, A.A. Shcherbinina // *MATEC Web Conf.* – 2015. – V. 23, № 01064. – P. 1–4.
206. Пискунов, М.В. Особенности испарения капель воды с твёрдым включением в потоке высокотемпературных газов / М.В. Пискунов, П.А. Стрижак, А.А. Щербинина // *Ползуновский вестник.* – 2015. – № 3. – С. 81–85.
207. Высокоморная, О.В. Влияние «собственного излучения» продуктов сгорания на интенсивность испарения неоднородной капли воды в пламени / О.В. Высокоморная, Г.В. Кузнецов, М.В. Пискунов, П.А. Стрижак // *Инженерно-физический журнал.* – 2016. – Т. 89, № 4. – С. 1–10.
208. Терехов, В.И. Тепломассоперенос и гидродинамика в газочапельных потоках / В.И. Терехов, М.А. Пахомов – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009.
209. Кузнецов, Г.В. Испарение одиночных капель и потока распыленной жидкости при движении через высокотемпературные продукты сгорания / Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // *Теплофизика высоких температур.* – 2014. – Т. 52, № 4. – С. 597–604.
210. Santangelo, P.E. Experiments and modeling of discharge characteristics in water-mist sprays generated by pressure-swirl atomizers / P.E. Santangelo // *J. Therm. Sci.* – 2012. – V. 21, № 6. – P. 539–548.
211. Varaksin, A.Yu. Clusterization of Particles in Turbulent and Vortex TwoPhase Flows / A.Yu. Varaksin // *High Temp.* – 2014. – V. 52, № 5. – P. 752–769.
212. Ануфриев, И.С. Условия взрывного парообразования на границе раздела сред в неоднородной капле / И.С. Ануфриев, Г.В. Кузнецов, М.В. Пискунов, П.А. Стрижак, М.Ю. Чернецкий // *Письма в ЖТФ.* – 2015. – Т. 41, № 16. – С. 98–104.

213. Пискунов, М.В. Экспериментальное определение условий «взрывного» парообразования капли воды с твердым включением в высокотемпературной газовой среде / М.В. Пискунов, П.А. Стрижак, А.А. Щербинина // Сборник докладов XI Всероссийского съезда по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Казань, 20–24 августа 2015 г. – Казань, 2015. – С. 3007–3009.
214. Borisova, A.G. Phase changes of water droplets with single metallic and nonmetallic inclusions in a high-temperature gas environment / A.G. Borisova, M.V. Piskunov, P.A. Strizhak // Interfacial phenomena and heat transfer: book of abstracts. International Symposium and School for Young Scientists. Novosibirsk, March 02–04, 2016. – Novosibirsk, 2016. – P. 20.
215. Высокоморная, О.В. Испарение капель суспензий воды с графитовыми включениями в высокотемпературных газах / О.В. Высокоморная, М.В. Пискунов, А.А. Щербинина // Ползуновский вестник. – 2016. – № 1. – С. 96–101.
216. Borisova, A.G. Evaporation and Vapor Formation of Graphite Suspensions Based on Water in a High-Temperature Gas Environment: an Experimental Investigation / A.G. Borisova, M.V. Piskunov, K.A. Rybatsky // EPJ Web Conf. – 2016. – V. 110. – 01013.
217. Legros, J.C. An Experimental Procedure to Estimate Lifetime of Water Drop with Graphite Inclusion under Intensive Vaporization with Explosive Breakup / J.C. Legros, V.M. Gumerov, M.V. Piskunov // MATEC Web Conf. – 2016. – V. 72, 01087. – P. 1–6.
218. Виноградов, А.Г. Поглощение теплового излучения водяными завесами / А.Г. Виноградов // Пожаровзрывобезопасность. – 2012. – Т. 21, № 7. – С. 73–82.
219. Glushkov, D.O. Experimental investigation of evaporation enhancement for water droplet containing solid particles in flaming combustion area / D.O. Glushkov, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak, R.S. Volkov // Therm. Sci. – 2016. – V. 20, № 1. – P. 131–141.

220. Панин, В.Ф. Экспериментальное изучение особенностей испарения капель воды с металлическими включениями / В.Ф. Панин, М.В. Пискунов, П.А. Стрижак // Известия ВУЗов. Проблемы энергетики. – 2016. – № 1–2. – С. 106–113.
221. Legros, J.C. Difference of evaporation and boiling for heterogeneous water droplets in a high-temperature gas / J.C. Legros, M.V. Piskunov, P.A. Strizhak // MATEC Web Conf. – 2015. – V. 37, 01027. – P. 1–4.
222. Piskunov, M.V. Analysis of the Water Droplet Evaporation Features with a Solid Nontransparent Inclusion in High-Temperature Gas Environment / M.V. Piskunov, A.A. Shcherbinina, P.A. Strizhak // Procedia - Social and Behavioral Sciences. – 2015. – V. 206. – P. 315–320.
223. Пискунов, М.В. Особенности кипения и испарения неоднородной капли жидкости в высокотемпературной газовой среде / М.В. Пискунов, К.А. Рыбацкий, П.А. Стрижак // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2016. – № 8. – С. 6–9.
224. Пискунов, М.В. Испарение и «взрывное» парообразование капли жидкости с твердым непрозрачным включением в высокотемпературной газовой среде / М.В. Пискунов, А.А. Щербинина // Современная техника и технологии: сборник трудов XXI международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск, 05–09 октября 2015 г. – Томск, 2015. – Т. 1. – С. 141–143.
225. Piskunov, M.V. Explosion of heterogeneous water droplet in a high-temperature gaseous region / M.V. Piskunov, A.A. Shcherbinina // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2015. – V. 27, 012064. – P. 1–6.
226. Пискунов, М.В. Отличие условий и характеристик испарения неоднородных капель воды в высокотемпературной газовой среде / М.В. Пискунов, П.А. Стрижак // Журнал технической физики. – 2016. – Т. 86, № 9. – С. 24–31.
227. Антонов, Д.В. Испарение капли воды с твердым непрозрачным включением при движении через высокотемпературную газovou среду / Д.В. Антонов,

- Р.С. Волков, М.В. Пискунов, П.А. Стрижак // Письма в ЖТФ. – 2016. – Т. 42, № 5. – С. 49–56.
228. Высокоморная, О.В. Влияние показателя поглощения тушащей жидкости на интенсивность кипения и испарения неоднородной капли в пламени / О.В. Высокоморная, М.В. Пискунов, П.А. Стрижак, А.А. Щербинина // Пожаровзрывобезопасность. – 2015. – Т. 24, № 7. – С. 9–16.
229. Высокоморная, О.В. О двух механизмах «взрывного» парообразования в зоне пламени при движении неоднородных капель тушащей жидкости / О.В. Высокоморная, М.В. Пискунов, П.А. Стрижак, А.А. Щербинина // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2015. – № 3. – С. 26–30.
230. Пискунов, М.В. «Взрыв» неоднородной капли воды в высокотемпературной газовой среде / М.В. Пискунов, А.А. Щербинина // Проблемы геологии и освоения недр: труды XIX Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 70-летию Победы советского народа над фашистской Германией. Томск, 06–10 апреля 2015 г. – Томск, 2015. – Т. II. – С. 590–591.
231. Leidenfrost, J.G. On the fixation of water in diverse fire / J.G. Leidenfrost // Int. J. Heat Mass Transfer. – 1966. – V. 9, № 11. – P. 1153–1166.
232. Biance, A.-L. Leidenfrost drops / A.-L. Biance, C. Clanet, D. Quere // Phys. Fluids. – 2003. – V. 15, № 6. – P. 1632–1637.
233. Ягов, В.В. Теплообмен в однофазных средах при фазовых превращениях / В.В. Ягов. – М.: МЭИ, 2014. – 542 с.
234. Ranz, W.E. Evaporation from drops / W.E. Ranz, W.R. Marshall // Chem. Eng. Prog. – 1952. – V. 48, № 3. – P. 141–146, 173–180.
235. Терехов, В.И. Экспериментальное и численное исследования нестационарного испарения капель жидкости / В.И. Терехов, В.В. Терехов, Н.Е. Шишкин, К.Ч. Би // Инженерно-физический журнал. – 2010. – Т. 83, № 5. – С. 829–836.

236. Тепловой расчет котлов: нормативный метод. 3-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Издательство НПО ЦКТИ, 1998. – 256 с.
237. Волков, Р.С. Экспериментальное исследование влияния скоростей движения и размеров капель жидкостей на характеристики их деформации в воздухе / Р.С. Волков, О.В. Высокоморная, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // Журнал технической физики. – 2015. – Т 85, № 8. – С. 15–22.
238. Волков, Р.С. Особенности процессов деформации движущихся в газовой среде капель жидкостей / Р.С. Волков, А.О. Жданова, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // Журнал технической физики. – 2015. – Т 85, № 10. – С. 29–33.
239. Chen, X. Numerical analysis on the transient measurement of gas temperature in porous material using thermocouples at high temperatures / X. Chen, X.-L. Xia, C. Sun, Y. Li // Int. J. Heat Mass Transf. – 2015. – V. 91. – P. 1060–1068.
240. Yilmaz, N. Detailed multiphysics modeling and validation of thermocouple readings in fires / N. Yilmaz // J. Fire Sci. – 2011. – 29. – P. 443–464.
241. Kim, A.V. Molecular dynamics study of the volumetric and hydrophobic properties of the amphiphilic molecule C_8E_6 / A.V. Kim, N.N. Medvedev, A. Geiger // Journal of Molecular Liquids. Special issue: Fluid phase associations. – 2014. – V. 189. – P. 74–80.
242. Voloshin, V.P. Calculation of the volumetric characteristics of biomacromolecules in solution by the Voronoi-Delaunay technique / V.P. Voloshin, A.V. Kim, N.N. Medvedev, R. Winter, A. Geiger // Biophysical Chemistry. – 2014. – V. 192. – P. 1–9.