

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

Волков Роман Сергеевич

**ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ И ДЕФОРМАЦИИ
КАПЕЛЬ ВОДЫ ПРИ ИХ ДВИЖЕНИИ В ТРАКТАХ
ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ**

**05.14.14 – Тепловые электрические станции,
их энергетические системы и агрегаты**

01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научные руководители:
доктор физико–математических наук,
профессор Кузнецов Г.В.,
доктор физико–математических наук
доцент Стрижак П.А.

Томск – 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

	С.
ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЯХ И ПРОЦЕССАХ ДЕФОРМАЦИИ КАПЕЛЬ ЖИДКОСТЕЙ В ГАЗОВЫХ И ПАРОВЫХ ТРАКТАХ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ.....	16
Выводы по первой главе.....	29
ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ..	31
2.1. Планирование экспериментальных исследований	31
2.2. Экспериментальный стенд и методика исследований.....	33
2.2.1. Одиночные капли жидкости.....	37
2.2.2. Полидисперсный капельный поток жидкости.....	40
2.3. Методы исследований.....	41
2.3.1. Метод «Particle Image Velocimetry».....	42
2.3.2. Метод «Interferometric Particle Imaging».....	49
2.4. Оценка достоверности результатов экспериментальных исследований	53
2.4.1 Оценка погрешности определения скоростей движения капель.....	53
2.4.2 Оценка погрешности определения размеров капель.....	58
Выводы по второй главе.....	60
ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИИ КАПЕЛЬ ВОДЫ, ДВИЖУЩИХСЯ В ГАЗОВЫХ СРЕДАХ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ТЕПЛООБМЕНА.....	61
3.1. Определение основных характеристик процессов деформации капель жидкостей в газовых средах при различных условиях	

теплообмена.....	61
3.2. Анализ интегральных характеристик испарения капель при различной начальной температуре воды.....	88
3.3. Влияние размеров капель воды на интегральные характеристики их испарения при движении через высокотемпературные газы.....	94
3.4. Влияние начальных скоростей капель воды на интегральные характеристики их испарения при движении через высокотемпературные газы.....	100
3.5. Исследование закономерностей испарения капель воды с примесями солей.....	109
3.6. Анализ интегральных характеристик испарения неоднородных (с твердыми инородными включениями) капель воды.....	114
3.7. Особенности испарения и перемещения капель воды во встречном потоке высокотемпературных газов.....	120
3.8. Теоретический анализ численных значений основных характеристик деформации и фазовых превращений водяных капель при движении в газовых средах.....	132
3.9. Рекомендации по использованию полученных результатов в энергетических технологиях и дальнейшему развитию сформулированного в диссертации подхода.....	146
Выводы по третьей главе.....	150
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	155
ЛИТЕРАТУРА.....	157

ВВЕДЕНИЕ

Современный электроэнергетический комплекс России включает почти 600 электростанций единичной мощностью свыше 5 МВт [1]. Общая установленная мощность электростанций в Российской Федерации достигает 220 ГВт. Мощность парка действующих электростанций по типам генерации имеет следующую структуру [2]: 21 % – гидроэлектростанции, 11 % – атомные электростанции и 68 % – тепловые электростанции (ТЭС). Наибольшее развитие и распространение в России получили ТЭС общего пользования, работающие на органическом топливе (газ, уголь), преимущественно паротурбинные. Общая установленная мощность теплофикационных энергоблоков составляет около 154,7 ГВт [2]. Эффективная работа ТЭС в целом зависит от слаженной работы всех агрегатов тепловой схемы [1-3]. Одной из важнейших задач в процессе производства электроэнергии ТЭС является поддержание на расчетном уровне параметров рабочего тела в пароводяном тракте. При этом наибольшие потери в системах оборотного водоснабжения наблюдаются при охлаждении в градирнях отработавшей воды [3].

Исследования проблемы повышения эффективности работы промышленных градирен проводятся особенно активно начиная с середины прошлого века [4]. В последние годы в связи с федеральными и региональными программами энергоэффективности и энергосбережения этому вопросу уделяется специальное внимание. Как правило, разрабатываются и вводятся в эксплуатацию новые типы градирен, предлагаются новые конструкции оросителей и распылительных форсунок, а также совершенствуются способы подачи воздуха и воды в рабочую область градирни [5–11]. Все перечисленные действия преследуют практически единственную цель – интенсифицировать процессы теплообмена между циркуляционной водой и охлаждающим ее воздухом при минимальных энерго- и ресурсозатратах [12-16].

Для обеспечения максимальной эффективности использования циркуляционной воды в системах оборотного водоснабжения ТЭС, а также для минимизации потерь в момент ее охлаждения, при разработке и проектировании градирен ТЭС, как правило, прибегают к трудоемким расчетам (например, гидроаэротермические, аэродинамические и другие) [17-19]. В традиционных (башенные и вентиляционные) градирнях рассматривается не тепломассоотдача с поверхности соприкосновения воды и воздуха, а «условный» тепломассообмен в некотором объеме [17]. Например, в пределах оросителей противоточных градирен, имеющих сложную геометрическую конфигурацию, происходит парообразование с поверхности пленок, капель и струй. При этом ни распределение поверхности соприкосновения по типам, ни величина этой поверхности неизвестны [17]. Поэтому для технологических (гидроаэротермических) расчетов вводится понятие объемных коэффициентов тепло - и массоотдачи, представляющих по определению [20, 21] произведение коэффициента поверхностной отдачи на площадь поверхности соприкосновения в пределах элементарного объема. Оба множителя в объемном коэффициенте всегда неизвестны. Поэтому определить объемные коэффициенты можно только опытным путем [17].

Опытные объемные коэффициенты используются и в случае брызгальных градирен [22], которые, как и эжекционные [23], имеют только капельное охлаждение. Это объясняется тем, что при групповом расположении сопел с учетом соударения капель определить истинную величину поверхности соприкосновения практически невозможно [17].

Проведение натурных экспериментов (на реально работающих градирнях ТЭС) для определения упомянутых выше коэффициентов крайне затруднительно в связи со сложностью и финансовой затратностью данного процесса [24-26]. Поэтому для исследований тепломассообменных процессов в испарительных, насадочных и других устройствах градирен нередко используются различные экспериментальные макеты, установки и стенды (например, [27, 28]). Каждая

установка, как правило, предназначена для физического моделирования строго определенных процессов в отдельных элементах (сопла, вентиляторы, оросители) и системах (водораспределительная или воздухопроводная) градирен [28].

Большое количество работ (например, [29–40]) в последние годы посвящено численному моделированию тепломассообменных процессов в градирнях ТЭС. Такие подходы перспективны в связи с развитием компьютерных технологий и значительным увеличением вычислительных мощностей персональных компьютеров и суперкомпьютерных кластеров. Модели и методы [29–40] используются в качестве альтернативы экспериментальным исследованиям, а также для более детального изучения процессов тепломассообмена. Однако результаты теоретических исследований и сделанные заключения, как правило, нуждаются в проверке с применением экспериментальных данных. Появление экспериментальных стендов, базирующихся на современных панорамных оптических методах цифровой «трассерной» визуализации [41–45], а также методик и кросскорреляционного оборудования для высокоскоростной видеосъемки делает реальными экспериментальные исследования вышеупомянутых процессов и дает возможность провести в будущем оценку достоверности результатов теоретических исследований (в частности, [29–40]).

К настоящему времени опубликовано большое число работ по исследованию процессов тепломассообмена в системе «капли воды – воздух» [25–40]. Но не изучено в полной мере влияние на характеристики фазовых превращений (испарение и конденсация) таких факторов, как начальные размеры доставляемых в рабочую область градирен ТЭС капель, их начальная температура, компонентный состав, скорости капель и потока охлаждающего воздуха. Также известно [46], что имеет место деформация капель жидкостей при движении в газовых средах, но не установлены механизмы деформации капель и влияние выделенных выше факторов на данный процесс. При деформации капли в полете происходит непрерывное изменение ее формы и, как следствие, площади поверхности. Это, несомненно, приводит к изменению в определенных пределах

интегральных характеристик теплообмена между поверхностью капли и окружающим воздухом. Данная особенность также должна учитываться как при проектно-конструкторских работах и соответствующих расчетах градирен ТЭС, так и при разработке необходимых для этих расчетов физических и математических моделей.

Анализ влияния выделенных выше факторов может позволить наряду с мерами по интенсификации теплообмена разработать рекомендации по уменьшению интенсивности капельного уноса (прежде всего за счет выбора оптимальных значений скоростей капельного потока и охлаждающего воздуха, начальных размеров капель распыляемой воды и, возможно, расстояний между каплями). Это, в свою очередь, создаст условия для уменьшения обмерзания внешней поверхности градирни, окружающих зданий и сооружений в зимнее время года [47, 48].

Фазовые превращения капель воды и эмульсий на ее основе при движении в газовых и паровых средах представляют интерес для теплоэнергетики также в связи с активным развитием методов высокотемпературной очистки («выпаривания») воды и других жидкостей от примесей и включений [49-51], стремлением создать теплоносители на базе уходящих продуктов сгорания, водяного пара и капель воды [52-55].

Принято считать [56, 57], что наиболее эффективными, но дорогостоящими способами очистки воды для многих технологических циклов в теплоэнергетике являются термические – введение мелкодисперсных капельных потоков в газовые среды с достаточно высокими температурами (от 500 К до 1500 К). Капли воды с различными примесями и включениями в этих условиях интенсивно испаряются. В зависимости от способа нагрева и температур примеси отделяются, минерализуются, осаждаются или окисляются с последующим сгоранием [56]. Главная стадия во всех этих процессах – выделение непосредственно воды в виде водяного пара. Термические методы очистки воды считаются дорогостоящими [56, 57] вследствие того, что затрачивается много энергии для генерации

высокотемпературных газовых сред. Анализ технологических условий (например, типичных ТЭС) на современных водоподготовительных энергетических комплексах показывает, что достаточно много избыточной энергии расходуется для реализации фазовых превращений. Интерес для мировой науки и экономики представляет поиск достаточных (при минимальных энергозатратах) условий для эффективной термической очистки воды. Эти направления исследований важны для теплоэнергетики (в первую очередь, ТЭС), так как водоподготовка является очень значимым и в то же время затратным с точки зрения ресурсов этапом технологического процесса. Эффективный возврат уходящих газов и водяных паров в технологический цикл при создании соответствующих теплоносителей позволит существенно повысить коэффициент полезного действия теплоэнергетического оборудования.

Для разработки основных элементов теории фазовых превращений при движении капель жидкостей в газовых и паровых трактах теплоэнергетического оборудования целесообразно проведение циклов фундаментальных экспериментальных исследований. Известные к настоящему времени результаты теоретических исследований таких процессов (например, [58-62]) по многим характеристикам нередко существенно различаются и не позволяют сделать однозначные заключения.

Целью работы является экспериментальное исследование фазовых превращений и деформации капель воды при их движении в условиях газовых и паровых трактов теплоэнергетического оборудования с использованием оптических методов цифровой «трассерной» визуализации и высокоскоростной видеорегистрации.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Разработка методики, планирование и проведение экспериментальных исследований по изучению фазовых превращений и деформации капель воды при их движении в газовой среде в различных условиях теплообмена.

2. Определение скоростей фазовых превращений и характеристик деформации капель воды при движении в газовых средах.
3. Установление возможных режимов деформации капель (с определением характерных времен их существования) и фазовых превращений в рассматриваемых условиях движения капель.
4. Определение основных факторов, оказывающих значимое влияние на характеристики фазовых превращений и процессов деформации капель воды при движении в газовой среде в различных условиях теплообмена.
5. Установление диапазонов влияния основных и второстепенных факторов на интенсификацию фазовых превращений в системах «одиночная капля – газ», «группа капель – газ» и «капельный поток – газ».
6. Формулирование аппроксимационных выражений для зависимостей основных характеристик деформации и фазовых превращений водяных капель от группы определяющих параметров внешней среды и начальных условий исследуемых процессов.
7. Разработка рекомендаций по использованию полученных результатов для повышения эффективности работы теплоэнергетического оборудования (градирни ТЭС, высокотемпературная или термическая водоподготовка, газопарокапельные теплоносители, очистка поверхностей котельного оборудования газопарокапельными смесями).

Научная новизна работы. Разработана новая методика экспериментальных исследований фазовых превращений и процессов деформации жидкостных капель при движении в газовых и паровых трактах теплоэнергетического оборудования, отличающаяся от известных применением оптических методов «трассерной» визуализации («Particle Image Velocimetry» и «Interferometric Particle Imaging»), кросскорреляционных видеокomплексов, а также импульсных твердотельных лазеров. Создан экспериментальный стенд для проведения исследований с использованием панорамных оптических методов. Проведены эксперименты по установлению макроскопических закономерностей фазовых превращений и

деформации капель воды при движении в газовой среде. Установлено влияние на интенсивность фазовых превращений и процессов деформации свойств жидкости, параметров капель и внешней газовой среды. Выделены типичные формы капель жидкостей при движении в газовых средах при различных условиях теплообмена, а также характерные времена существования капель в различной форме в процессе перемещения. Определены характерные скорости фазовых превращений для одиночных капель и капельных потоков воды при различных условиях теплообмена с внешней газовой средой. Установлены диапазоны изменения коэффициентов конденсации (испарения) для условий, соответствующих условиям работы типичного теплоэнергетического оборудования.

Практическая значимость работы. Полученные экспериментальные результаты, сформулированные аппроксимационные выражения и теоретические следствия являются основой для разработки новых технических решений, а также модернизации существующих средств и систем подачи и охлаждения воды в рабочей области градирен ТЭС. Их можно использовать при совершенствовании технологий высокотемпературной очистки воды, а также создании газопарокапельных теплоносителей на основе уходящих дымовых газов и пароводяных смесей. Сформулированные в тексте рукописи аппроксимационные выражения и сделанные выводы могут быть использованы при выборе эффективных режимов распыления воды в ряде практических приложений (размораживание сыпучих сред газопарожидкостными высокотемпературными потоками, очистка поверхностей котельного оборудования газопарокапельными смесями, полидисперсное пароводяное пожаротушение).

Степень достоверности результатов проведенных исследований. Достоверность полученных в ходе экспериментальных исследований результатов подтверждается оценками систематических и случайных погрешностей результатов измерений, системой повторяемости опытов при идентичных начальных значениях основных параметров, использованием современных

высокоточных оптических методов диагностики, а также сравнением с теоретическими заключениями других авторов.

Связь работы с научными программами и грантами. Диссертационные исследования выполнены в рамках реализации Программы повышения конкурентоспособности Национального исследовательского Томского политехнического университета (проект ВИУ_ЭНИН_94_2014). Тематика 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»).

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (госконтракт № 2.1321.2014), грантов Президента РФ № МК–620.2012.8, № МК–2391.2014.8, РФФИ № 13–08–90703, № 14–08–00057, № 14–03–31304 и РНФ № 14–39–00003.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Новый подход к анализу макроскопических закономерностей фазовых превращений и деформации капель воды, движущихся в газовых и паровых средах теплоэнергетического оборудования при различных условиях теплообмена, отличающийся от известных применением оптических методов «трассерной» визуализации («Particle Image Velocimetry» и «Interferometric Particle Imaging»), кросскорреляционных видеокомплексов, а также импульсных твердотельных лазеров.
2. Результаты экспериментальных исследований особенностей деформации и фазовых превращений движущихся капель воды в условиях газовых и

паровых трактов теплоэнергетического оборудования (температуры газов от 275 К до 1100 К, воды – от 280 К до 360 К).

3. Зависимости скоростей фазовых превращений и характеристик деформации от параметров газа и капель.
4. Два характерных режима деформации капель и два режима фазовых превращений в рассматриваемых условиях.
5. Рекомендации по повышению эффективности существующих и вновь разрабатываемых средств и систем охлаждения воды в системах оборотного водоснабжения, а также водоподготовки на ТЭС.

Личный вклад автора состоит в постановке и планировании экспериментальных исследований, создании экспериментального стенда, проведении экспериментов, обработке результатов, оценке систематических и случайных погрешностей, анализе и обобщении полученных результатов, разработке рекомендаций практического использования полученных результатов, формулировке защищаемых положений и выводов.

Апробация работы. Основные результаты, сформулированные положения и теоретические следствия диссертационных исследований докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

- XVIII международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии», г. Томск, 2012 г.
- III Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Теплофизические основы энергетических технологий», г. Томск, 2012 г.
- XXX Сибирский теплофизический семинар, г. Новосибирск, 2012 г.
- Всероссийская конференция «Структура и динамика молекулярных систем», п. Яльчик, 2013 г.
- Международная конференция «VIII окуневские чтения», г. Санкт-Петербург, 2013 г.

- IV Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Теплофизические основы энергетических технологий», г. Томск, 2013 г.
- XI Международная научная конференция «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики», г. Алушта, Украина, 2013 г.
- XX Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии», г. Томск, 2014 г.
- III Международная научно-техническая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов «Высокие технологии в современной науке и технике», г. Томск, 2014 г.
- III Межотраслевая научно-практическая конференция «Инновационные пути модернизации базовых отраслей промышленности, энерго- и ресурсосбережение, охрана окружающей природной среды», г. Харьков, Украина, 2014 г.
- Международная конференция по материалам в промышленности и проблемам окружающей среды, г. Ухань, Китай, 2014 г.
- XI Международная конференция студентов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук», г. Томск, 2014 г.
- XI Всемирный конгресс по вычислительной механике (WCCM XI), г. Барселона, Испания, 2014 г.

Публикации. Основные положения и результаты диссертационных исследований опубликованы в 42 печатных работах, в том числе 18 – в журналах из списка, рекомендованного ВАК РФ для публикации основных научных результатов диссертации на соискание ученой степени кандидата наук: «Теплофизика и аэромеханика», «Журнал технической физики», «Тепловые процессы в технике», «Инженерно-физический журнал», «Известия Томского

политехнического университета), «Безопасность жизнедеятельности», «Безопасность труда в промышленности», «Пожарная безопасность», «Пожаровзрывобезопасность», «Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация». Три статьи опубликованы в зарубежных рецензируемых журналах «Advances in Mechanical Engineering» и «European Physical Journal Web of Conferences». Подготовлена 1 заявка на патент РФ (№ 2014114346 от 10.04.2014) и получены 7 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Диссертация изложена на 185 страницах машинописного текста, содержит 49 рисунков и 3 таблицы. Библиография включает 261 наименование.

Краткое содержание работы.

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

Первая глава отражает современное состояние теоретических и экспериментальных исследований фазовых превращений и процессов деформации капель жидкостей, движущихся в газовых и паровых трактах теплоэнергетического оборудования, а также в аналогичных условиях теплового воздействия других технологий. Проанализированы основные результаты работ по исследованию взаимодействия капель распыленной жидкости с высокотемпературными газовыми средами, применяемые традиционно подходы и методы экспериментальных исследований. Проведена оценка состояния теории и экспериментов в выбранном направлении. Установлено отсутствие результатов экспериментального определения влияния начальных параметров жидкостей (начальная температура, размеры и скорость капель, примеси солей, а также наличие твердых включений в каплях) на интенсивность фазовых превращений и

деформации капель при движении в газовых средах в условиях, соответствующих типичным теплоэнергетическим технологиям.

Во второй главе приведено описание разработанных автором диссертации экспериментального стенда и методик проведения исследований. Описаны используемые при проведении исследований и обработке полученных результатов панорамные оптические методы цифровой «трассерной» визуализации, а также методы оценки погрешностей результатов измерений.

В третьей главе приведены результаты исследования основных закономерностей фазовых превращений капель воды в условиях интенсивного нагрева и охлаждения. Установлены особенности деформации капель жидкости при движении в газовых средах. Определены характерные скорости фазовых превращений. Получены зависимости доли испарившейся жидкости от численных значений ее начальных параметров и параметров распыления (температура, скорость, размеры капель, компонентный состав). Разработаны рекомендации по использованию полученных результатов в теплоэнергетике, а также развитию сформулированных теоретических следствий.

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

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЯХ И ПРОЦЕССАХ ДЕФОРМАЦИИ КАПЕЛЬ ЖИДКОСТЕЙ В ГАЗОВЫХ И ПАРОВЫХ ТРАКТАХ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Исследованию фазовых превращений при движении в газовых средах одиночных капель и капельных потоков жидкостей посвящено достаточно много работ. Можно выделить труды научных коллективов и отдельных ученых, в частности, Э.П. Волчкова, В.И. Терехова, М.А. Пахомова, Н.Е. Шишкина [63-72], О.А. Кабова [73-76], А.Ю. Вараксина [77], Д.А. Лабунцова, Т.М. Муратовой [78-82], А.П. Крюкова [83-85], О. Кнаке, И.Н. Странского [86], А.В. Гусарова, И. Смурова [87], В.Е. Накорякова [88-93], С.В. Алексеенко [94, 95], Н.В. Буланова, Б.М. Гасанова [96], М. Ренксизбулут, М.С. Юань [97-99], С.С. Сажина [100-103], В.А. Сметанюка, С.М. Фролова [104], С.К. Аггарвол, А.И. Тонг, В.А. Сириньяно [105, 106], А.М. Штеренберга [107], А.Ю. Крайнова, И.М. Васенина [108], В.В. Кузнецова [109], А.Н. Павленко [110, 111], А.А. Собко [112-114] и других.

Однако, несмотря на достаточно многочисленные, на первый взгляд, публикации, фазовые превращения капель жидкостей как при умеренных, так и при очень высоких температурах до сегодняшнего дня не изучены в полной мере. В известных моделях тепломассопереноса и фазовых превращений не учтены многочисленные факторы, влияющие на условия реализации рассматриваемых процессов. Это, в свою очередь, оказывает влияние на эффективность группы промышленных технологий, например [115-119], в которых широко используются различные газопарокапельные среды с контролируемыми параметрами (последние на производствах выбираются, в основном, эмпирически).

Ставшая классической основополагающая работа Герца [120] об испарении жидкостей была опубликована еще в 1882 году. Главным выводом, к которому пришел автор [120], был следующий: для каждого вещества существует скорость испарения, зависящая от температуры поверхности и специфических свойств

данного вещества. В начале XX века Кнудсен [121], основываясь на результатах своих исследований, впервые ввел понятие коэффициента испарения (конденсации). На основании этого была введена в рассмотрение формула Герца-Кнудсена [120-122].

Установленные в работах [120, 121] значения скоростей и коэффициентов испарения послужили основой для последующего развития исследований в области фазовых превращений жидкостей.

Первая обзорная работа по исследованию процессов испарения жидкостей относится к середине прошлого века и принадлежит О. Кнаке и И.Н. Странскому [86]. В ней проанализированы результаты теоретических и экспериментальных исследований, представлены описания экспериментальных стендов и методик проведения опытов по исследованию процессов испарения. Однако основным выводом, сделанным на основании анализа [86], можно считать заключение о справедливости выведенной за почти полвека до этого формулы Герца-Кнудсена [120, 121].

Важно отметить, что развитие модельных представлений, сконцентрированных в хорошо известной и широко используемой формуле Герца-Кнудсена [120, 121], уже многие десятилетия сдерживается отсутствием достоверных экспериментальных данных о коэффициенте испарения (конденсации), являющемся обобщенной (в некотором роде) характеристикой состояния межфазной поверхности. В последние годы предприняты попытки кинетического анализа интенсивного испарения жидкостей [122] с целью изучения закономерностей фазовых превращений в рамках моделей, отличающихся от используемых более ста лет представлений Герца [120] и Кнудсена [121] об «испарении в вакуум». Но результаты [122], полученные с применением метода обратных балансов, позволяют утверждать только о «качественно верных» изменениях «плотности обратного молекулярного потока» с ростом интенсивности испарения жидкости.

Предпринимающиеся попытки (например, [77, 122]) учесть термодинамическую неравновесность пара вблизи межфазной границы (обусловленную молекулярно-кинетическими закономерностями фазовых превращений) сводятся к решению уравнения Больцмана, описывающего эволюцию функции распределения молекул пара по скоростям. До настоящего времени не разработаны общие методы построения точных решений нелинейного интегрально-дифференциального уравнения Больцмана. Использование «метода моментов» [122] приводит к некоторому приближенному решению, возможности прогностического потенциала которого ограничены.

Можно выделить достаточно большое количество теоретических [76, 123-127] и экспериментальных [73, 109-111, 128] работ по исследованию испарения неподвижных и стекающих пленок жидкостей при различных внешних условиях (например, при свободной и вынужденной конвекции). Основное внимание уделяется определению скорости испарения. Важную роль играют процессы тепломассообмена при стекании (в условиях вынужденной конвекции) пленок жидкостей в ряде типов градирен систем оборотного водоснабжения (происходит охлаждение отработавшей воды при ее движении в виде пленок и струй по вертикальным оросителям) [19].

Известно, что одной из проблем при эксплуатации большинства башенных градирен, изготовленных из железобетона, является коррозия корпуса [129, 130]. Это происходит как за счет развития обменных реакций между кислотами и солями окружающей среды и составными частями цементного камня, так и за счет накопления солей в порах бетона, вызывающих его нерасчетные напряжения и последующее разрушение [130]. При решении описанных проблем нельзя не учитывать компонентный состав воды в системе оборотного водоснабжения. Так, помимо процесса коррозии бетона, качество жидкости, несомненно, сказывается на интенсивности процесса тепломассообмена. Это может существенно влиять на эффективность производства и безопасность технологического процесса.

Кроме выше рассмотренных известны работы и по испарению многокомпонентных жидких смесей [131]. В совокупности со скоростью испарения в них проведен анализ влияния на интенсивность рассматриваемого процесса компонентного состава самой жидкости. Исследовано испарение пленок и отдельных капель солевых и водоспиртовых растворов на нагретых поверхностях, а также в миниканалах [88-93]. Главное внимание уделено анализу влияния массовой концентрации солей в растворах на скорость десорбции капель. Показано [90-93], что в условиях интенсивного нагрева имеет место одновременное влияние на процесс испарения и десорбции таких факторов, как диаметр капли, толщина стенки канала и его шероховатость, а также теплопроводность материала [90, 93].

Анализ результатов исследований процессов тепломассообмена с поверхностей пленок различных растворов жидкостей, а также сопоставление результатов теоретических и экспериментальных исследований, показывает, что математические модели и физические подходы [19, 22] могут быть использованы для достаточно подробного анализа процессов, происходящих на теплообменных поверхностях градирен.

Известно [22], что при охлаждении и конденсации воды в градирнях, теплообмен происходит не только с поверхности пленок и струй жидкости, но и с поверхности капель. При этом имеет место теплообмен в режиме вынужденной конвекции. В этом случае, как известно, наряду с охлаждением капель жидкости происходит их обтекание восходящими потоками охлаждающего воздуха. Слои жидкости перемешиваются внутри самой капли (возникают так называемые внутренние течения). Данная особенность отмечена уже достаточно давно (например, проведено моделирование [132, 133] вихревых течений внутри движущейся капли в диапазоне больших чисел Рейнольдса). Установлено, что такие течения соответствуют потенциальному течению в виде вихря Хилла [134]. Однако авторами [132–134] не рассмотрены процессы прогрева (охлаждения)

капель, которые, скорее всего, оказывают влияние на процессы внутренней циркуляции жидкости.

Рассмотрены [104, 106, 135] процессы прогрева и испарения капель в условиях вынужденной конвекции с учетом внутренних ламинарных конвективных течений, которые более сложны в описании и понимании механизма самого тепломассообмена. В частности, отмечается [104, 106], что испарение (конденсация) капель жидкостей происходит в условиях нестационарного тепломассопереноса. В условиях теплового взаимодействия капли с газовым потоком может формироваться неоднородное температурное поле. Также показано [104], что в зависимости от числа Рейнольдса относительного движения капли и газового потока реализуются различные режимы прогрева капли: кондуктивный, конвективный, промежуточный (с учетом внутренних ламинарных конвективных течений внутри самой капли). Установлены механизмы и характерные времена прогрева капли жидкости, приведены изотермы и профили температур. Однако при расчетах авторы пренебрегали фазовыми превращениями на границе «жидкость – пар», а также не учитывали деформацию капли при обтекании ее потоком газа. Без учета этих особенностей невозможно в полной мере описать процессы, проходящие в системах охлаждения оборотной воды ТЭС.

Установлено [136-140], что при движении в газовой области капля жидкости деформируется под действием аэродинамических сил и в ней возникают внутренние течения. При определенном уровне нагрузок (особенно при критических значениях чисел Вебера) капля может дробиться [138, 139], проявляя множество форм фрагментации. Стоит отметить, что в работах [136-140] основной акцент сделан на установление таких значений параметров, при которых движущаяся капля либо находится на грани дробления [136], либо необратимым образом разрушается [137-140].

Анализ результатов исследований процессов дробления и разрушения капель жидкости [136-140] показывает, что они могут быть применены для

описания процессов, происходящих, в основном, в вентиляторных градирнях с принудительной циркуляцией, когда потоки отработавшей воды и подаваемый на охлаждение воздух встречно направлены, и происходит разрушение (дробление) струй жидкости и отдельных капель. Рассмотренные в [136-140] процессы в большинстве случаев не встречаются в градирнях атмосферного и башенного типов, где распыленные капельные потоки воды в условиях умеренных скоростей охлаждающих воздушных масс, проходя от форсунок до оросителей, практически не разрушаются.

На сегодняшний день известно [46], что капли жидкости деформируются даже в условиях свободного падения в газовой среде (при движении с дозвуковыми скоростями). Так, установлены [46] периоды (времена) собственных колебаний капель водоглицеринового раствора, зафиксированы типичные формы (фазы) деформирующихся капель, а также показано, что времена собственных колебаний существенно зависят от начальных размеров капель жидкости. Однако до сегодняшнего времени не изучены механизмы деформации капель, а также влияние на процесс деформации таких факторов, как начальная температура капли, ее скорость и компонентный состав, условия окружающей среды (температура, влажность, давление) и многие другие.

На сегодняшний день известна группа математических моделей [58-62, 141-153], описывающих тепломассоперенос при движении одиночных [58, 141] и групп капель [59-62, 142-153] жидкости через высокотемпературные продукты сгорания. В частности, в моделях [59-62, 142-153] определено влияние взаимного расположения капель относительно друг друга на интенсивность фазовых превращений, установлены «предельные» расстояния между каплями, при которых усиливается взаимное влияние на тепломассообмен. Но модели [58-62, 141-153] не учитывают внутренние течения в каплях, процессы деформации (изменения формы) капель в полете, а также движение встречных потоков газа, что ограничивает их использование для описания процессов тепломассопереноса при взаимодействии капель воды с охлаждающим воздухом в системах

оборотного водоснабжения ТЭС. Также трудно использовать результаты [58-62, 141-153] для развития перспективных технологий высокотемпературной очистки воды, теплоносителей на основе парокапельного потока и уходящих дымовых газов, потоков тонкораспыленной жидкости для пожаротушения.

Проведены численные исследования [154, 155] процессов теплообмена при взаимодействии капель воды и высокотемпературных газов, в которых в отличие от моделей [58-62, 141-153] учитывались изменения формы капель воды [154] в процессе движения, а также внутренние течения в капле [155]. Однако, как и в моделях [58-62, 141-153], не принималось в расчет движение встречного потока газов, что усложняет описание реальных процессов.

Анализ численных исследований показывает, что модели [58-62, 141-155] разработаны лишь для некоторой небольшой совокупности капель (от одной до пяти) и могут описать локальные системы: «капля воды – высокотемпературные газы» и «группа капель воды – высокотемпературные газы». В реальных же условиях на многих производствах применяются моно- и полидисперсные капельные потоки жидкостей, а также газопарожидкостные смеси [156-159]. К таким технологиям можно отнести, в частности, разморозку сыпучих смесей парокапельными потоками, обработку поверхностей теплоэнергетического оборудования газокапельными потоками и струями, термическую очистку воды в процессе водоподготовки. Процессы движения в этих случаях сопровождаются интенсивными фазовыми превращениями в условиях большой совокупности капель и, как следствие, не могут быть в полной мере описаны моделями [58-62, 141-155].

В общем случае для описания фазовых превращений, а также при расчете параметров реальных процессов, происходящих в промышленных градирнях ТЭС, трудно использовать результаты исследований теплообмена для одиночных капель жидкости. Известно [81, 84], что при подаче отработавшей воды в рабочее пространство градирен используются всевозможные сопла,

форсунки и насадки, под действием которых происходит распыление воды и ее преобразование в парокапельный поток.

Следует также отметить, что процессы смешения потоков газов и испаряющихся по целому ряду причин капель [63-72, 77, 105, 106] достаточно сложны. Как следствие, довольно трудно прогнозировать состав формирующихся неоднородных газопарокапельных смесей [63-72, 77, 105, 106]. В то же время группа технологий промышленности, например [156-159], широко использует такие газопарокапельные среды с контролируемыми параметрами. Поэтому актуальна задача выделения основных факторов, влияющих на состав типичных газопарокапельных смесей в условиях интенсивного испарения жидкости. Особый интерес представляют эти процессы при высоких температурах – более 1000 К [58-62, 141-155].

Теоретические [58-62, 141-155] исследования показали (на примере капель воды и газов с температурой более 1000 К), что определяющую роль при формировании газопарокапельных сред играет комплекс взаимосвязанных процессов тепломассопереноса. Установлено [58-62, 141-155] влияние характерных размеров капель жидкости, температуры газов, теплофизических характеристик жидкости, паров и газов на интегральные характеристики испарения. Среди факторов, влияние которых пока не изучено, можно выделить начальный дисперсный состав жидкости, ее температуру и скорость движения капель. Не установлены значения последних при мелкодисперсном распылении жидкости (размеры капель в потоке составляют от нескольких десятков до сотен микрометров) в высокотемпературной газовой среде. Исследовать такие процессы с использованием моделей [58-62, 141-155] достаточно сложно (необходимы координатные сетки с большим числом узлов и вычислительные комплексы с соответствующей производительностью). Затруднительно (практически невозможно) моделировать одновременное движение большой (более 100) группы капель жидкости в условиях интенсивных фазовых превращений через высокотемпературную газovou среду. В связи с этим единственная возможность

исследовать особенности таких систем, как «парокапельный поток – газ», это разработка экспериментальных методик и проведение соответствующих экспериментов.

Кроме того, в реальных технологиях [49-54], как правило, очень редко используются эффекты фазовых превращений одиночных капель. Данные технологии предусматривают использование двухфазных, многофазных и гетерогенных потоков (испарительное охлаждение циркуляционной воды в градирнях ТЭС, обработка поверхностей, термическая очистка воды, полидисперсное пароводяное пожаротушение) [3-16, 49-54].

А.Ю. Варакин провел обобщение [77] достижений в области исследований гидрогазодинамики и теплофизики двухфазных, многофазных и гетерогенных потоков, а также сформулировал основные проблемы исследования данных процессов. В частности, отмечено [77], что при сжигании жидкого топлива в виде монодисперсных капель в камерах сгорания газотурбинных установок и жидкостных ракетных двигателей могут возникать акустические колебания, способные привести к вибрациям конструкции, нарушению работы всей установки, как следствие, даже к разрушению камеры сгорания. Результаты исследований таких процессов приведены в работе [156] – рассмотрены различные режимы возбуждения акустических колебаний при горении сферических и монодисперсных неподвижных капель жидкого топлива при сверхкритическом давлении газовой смеси, а также получены выражения для частоты таких колебаний, которая зависит от характеристик топлива и окислителя. Вышеописанные процессы, помимо упомянутых уже газотурбинных установок и ракетных двигателей, в меньшей мере, могут протекать также при сжигании топлива в промышленных газомазутных котлах пиковых водогрейных котельных ТЭС, где происходит впрыск топлива в виде капельного полидисперсного потока в топку котлоагрегата.

Авторы [157-160] исследовали тепломассообмен в области взаимодействия импактной струи с расположенной перпендикулярно ей преградой. Результаты

[157-160] представляют интерес для целого ряда практических приложений: нанесение покрытий, закалка металлических изделий, обработка и очистка поверхностей и другие. Главная задача исследования таких процессов (и соответствующих технологий) – интенсификация процесса тепломассопереноса между стенкой и взаимодействующей с ней импактной струей. Одним из способов интенсификации таких процессов является использование в качестве охладителя газочапельных потоков [77].

Можно выделить исследования авторов [161-164], которые рассматривали использование газочапельных потоков и струй жидкости для охлаждения теплонагруженных поверхностей. Данные технологии широко используются в таких областях промышленности, как теплоэнергетика, металлургия, аэрокосмическая отрасль. Рассматривалась [96] возможность использования разнообразных эмульсий для охлаждения режущих инструментов при механической обработке металлов. Интересны исследования в области пульсирующих потоков [163]. Показано [163], что для интенсификации процесса теплоотдачи наиболее целесообразным является использование коротких импульсов подачи жидкости. Для повышения эффективности процессов охлаждения поверхностей количество жидкости в импульсе, а также частота ее подачи должны выбираться с учетом поддержания испарительного режима на теплообменной поверхности [163].

Можно отметить исследования [72, 164] двухфазных отрывных потоков (в частности, при стабилизации горения испаряющихся капель топлива с помощью создания рециркуляционных зон). Выполнено численное исследование [72] газочапельного турбулентного течения за внезапным расширением трубы при наличии фазовых превращений. Установлено [72], что добавление испаряющихся капель размерами от 50 мкм до 100 мкм (массовая концентрация 5 %) приводит к значительной (более чем в 1,5 раза) интенсификации процесса теплообмена.

Установленные [72, 156-164] значения кинетических параметров, механизмы и особенности прохождения процессов тепломассообмена

способствуют развитию и совершенствованию упомянутых выше технологий, в основе которых лежит теплообмен при взаимодействии многофазных газочапельных потоков и струй с различными поверхностями (в частности, охлаждения жидкости в системах оборотного водоснабжения ТЭС). В то же время следует подчеркнуть, что авторами [72, 156-164] не рассмотрено влияние компонентного состава капель жидкости (в частности, примеси твердых включений), их начальной температуры, процессов непрерывной деформации капель в движении на закономерности фазовых превращений. Кроме того, в большинстве работ [161-164] не учитывается влияние на процессы тепломассообмена начальных размеров капель жидкости, что очень важно на практике.

Экспериментальные исследования двухфазных и гетерогенных газопарокапельных потоков до недавнего времени сдерживались отсутствием соответствующих экспериментальных методик, методов и оборудования. Однако с появлением в конце прошлого века высокоскоростных оптических методов диагностики потоков [41-45] такие исследования стали реальностью. С использованием современных панорамных методов, таких как «Particle Image Velocimetry» (PIV) и «Interferometric Particle Imaging» (IPI) [41-45] можно устанавливать мгновенные распределения размеров (до нескольких микрон) и скоростей (вплоть до сверхзвуковых) капель в потоке, наблюдать за изменением во времени его структуры, исследовать влияние на парокапельный поток внутренних и внешних факторов.

В России панорамные оптические методы диагностики многофазных сред до сегодняшнего дня пока не получили широкого распространения. Известно довольно небольшое количество результатов исследований, полученных с применением этих методов [165-167]. Данный факт можно обосновать высокой стоимостью оборудования и программного обеспечения, необходимых для реализации данных методов. Однако в зарубежной печати регулярно появляются публикации [41-45, 94, 95, 168-173], иллюстрирующие использование

вышеупомянутых методов диагностики. Список существующих на сегодняшнее время оптических методов получения и обработки данных очень обширен: «Particle Tracking Velocimetry» (PTV), «Particle Image Velocimetry» (PIV), «Stereo Particle Image Velocimetry» (Stereo PIV), «Tomographic Particle Image Velocimetry» (Tomo PIV), «Micro Particle Image Velocimetry» (Micro PIV), «Interferometric Particle Imaging» (IPI), «Laser Induced Fluorescence» (LIF), «Planar Laser Induced Fluorescence» (PLIF) и другие. Нет практически ни одного научного направления, ни одной отрасли промышленности, где бы не могли быть применены вышеупомянутые методики. Данные методы используются для получения мгновенных двух (PTV, PIV) и трехкомпонентных (Stereo PIV, Tomo PIV) распределений скоростей и размеров (IPI) частиц при исследовании ламинарных и турбулентных многофазных потоков, аэрозолей и пламен, для определения мгновенного распределения толщины пленок жидкостей (LIF) на плоскости, для диагностики потоков различных сред в каналах микронного размера (Micro PIV), для регистрации мгновенного распределения температуры (PLIF) в потоке.

Однако на сегодняшний день наиболее распространенным из используемых методов диагностики является PIV [95, 168-173]. Это можно объяснить, в первую очередь, широкой областью его применения, а также простотой калибровки и настройки измерительной системы. Следует также обратить внимание на то, что наибольшее количество модификаций (Stereo PIV, Tomo PIV, Micro PIV) относится именно к рассматриваемому методу. Применение PIV практически не ограничено. Он используется для таких приложений, как, например, исследование пленок и струй жидкости [95], диагностика двухфазных газопарожидкостных потоков [169], изучение процессов тепломассообмена в воздушных и газовых средах [170, 172].

Все большее распространение в последнее время получают работы по физическому моделированию и исследованию тепломассопереноса с применением оптических методов диагностики процессов, протекающих в пароводяных теплообменных трактах теплоэнергетического оборудования [171,

173]. Так в работе [171] при помощи PIV измерений исследуются характеристики потока сплошной среды на модели пластинчатого теплообменника. Показано изменение динамики потока при взаимодействии с ребрами теплообменного аппарата [171], приведены профили и поля скоростей, иллюстрирующие образование вихревой структуры внутри потока. Установлены механизмы развития вихрей в модели пластинчатого теплообменника [171]. Экспериментально исследованы [173] характеристики потока жидкости при движении в канале низкого давления. С применением метода PIV показаны [173] распределения скоростей и механизмы формирования вихревых структур.

На основе анализа результатов исследований [41-45, 94, 95, 168-173] можно утверждать, что оптические методы диагностики являются на данный момент практически незаменимым инструментом для развития физических моделей процессов тепломассообмена при исследовании различных газопарокапельных потоков.

Оценивая современные результаты исследований процессов тепломассообмена, протекающих при испарении капель жидкостей, можно сделать вывод о том, что в настоящее время отсутствуют физические и математические модели, описывающие полный комплекс основных процессов тепломассообмена и группу факторов, характеризующих тепломассоперенос в реальных производственных условиях. Представляет интерес с применением современных высокоточных оптических методов диагностики гетерогенных, двухфазных и многофазных газопарожидкостных смесей и методов высокоскоростной видеорегистрации решение следующих задач:

- определение основных характеристик процессов деформации капель жидкостей в газовых средах при различных условиях теплообмена;
- установление интегральных характеристик испарения капель при различной начальной температуре воды, оценка влияния размеров и начальных скоростей капель воды на интегральные характеристики их испарения при движении через высокотемпературные газы;

- исследование закономерностей испарения неоднородных (с твердыми включениями) капель, а также капель воды с примесями солей;
- определение особенностей испарения и перемещения капель воды во встречном потоке высокотемпературных газов.

Важно отметить, что выполненный цикл исследований позволит более подробно понять механизмы и особенности протекания процессов тепломассопереноса в газо- и парокапельных средах, а также сформулировать рекомендации для повышения эффективности применяемых технологий в таких приложениях, как процессы испарения и конденсации жидкости в газопаровых трактах ТЭС; высокотемпературная (испарительная) очистка воды и других жидкостей от примесей и включений; охлаждение, обработка и чистка поверхностей газопарокапельной смесью; тушение пожаров с применением «тонкораспыленной» воды, «водяного тумана» и «водяной завесы».

Следует особенно выделить технологию испарительной очистки воды [49-51], так как водоподготовка является одним из важнейших и в то же время дорогостоящих производств в общем цикле ТЭС. От качества воды во многом зависит экономичность и безопасность всего процесса производства электроэнергии ТЭС. Низкое качество воды приводит к отложению солей и неотделенных в процессе водоподготовки инородных частиц на стенках теплообменного оборудования и его коррозии, что, в свою очередь, приводит как к ухудшению характеристик его теплопередачи, так и к полному закупориванию отдельных его частей и участков. Это, в частности, может потребовать увеличения ресурсо- и энергозатрат на прогрев воды в пароводяном тракте ТЭС, а в крайних случаях способно привести к частичному либо полному останову отдельных агрегатов тепловой схемы. Чтобы повысить эффективность водоподготовки и в то же время сократить энергозатраты, нужно интенсифицировать процессы испарения воды в теплообменном водоочистном оборудовании, а также одновременно сократить ее потери при уносе мелких капель и пара с потоком уходящего газа. Для этих целей необходимо установить

влияние компонентного состава воды на интенсивность фазовых превращений, на основании чего, с учетом размеров капель в газовом потоке, а также скоростей уходящих газов и самих капель жидкости, выбрать параметры для процесса испарительной очистки.

Выводы по первой главе

1. Фазовые превращения и процессы деформации капель воды и эмульсий на ее основе являются определяющими в технологиях охлаждения пароводяных смесей в промышленных градирнях ТЭС, системах высокотемпературной очистки воды и водоподготовки на теплоэнергетических объектах, а также при создании теплоносителей на базе уходящих высокотемпературных дымовых газов и пароводяных смесей.
2. Экспериментальные исследования двухфазных и гетерогенных газопарокапельных потоков до недавнего времени сдерживались отсутствием соответствующих экспериментальных методик, методов и оборудования. Однако с появлением в конце прошлого века высокоскоростных оптических методов диагностики потоков (в частности, PIV и IPI) такие исследования стали реальностью.
3. Целесообразно проведение экспериментальных исследований фазовых превращений и процессов деформации капель воды и эмульсий на ее основе для одиночных капель, их малых групп и полидисперсных потоков.
4. Основными задачами таких экспериментов целесообразно принять: определение типичных форм капель для использования при численном моделировании, времен существования капель в различных формах, вычисление основных характеристик процессов деформации и коагуляции капель, а также скоростей фазовых превращений при различных условиях теплообмена на границе «капля жидкости – газ».

ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1. Планирование экспериментальных исследований

Установление основных макроскопических закономерностей фазовых превращений и процессов деформации капель воды при их движении в типичных газовых средах теплоэнергетического оборудования возможно в результате экспериментальных исследований в условиях, соответствующих реальным режимам испарения (конденсации) капель жидкости. Последнее достижимо на модельных установках при соблюдении условий физического и геометрического подобия [174].

Проведение экспериментов, полностью воспроизводящих реальные условия, присущие процессу испарения капель жидкости в условиях высоких температур затруднено сложностями регистрации параметров этих процессов в замкнутых объемах. В то же время возможно проведение экспериментальных исследований на модельных установках с полным воспроизведением всех основных параметров, характеризующих изучаемые процессы. В этом случае выполняются условия физического и геометрического подобия [174].

Планирование экспериментальных исследований начинается с установления ряда параметров, оказывающих влияние на фазовые превращения и процессы деформации капель жидкости, например, температура газовой среды, время существования капель, начальная температура и компонентный состав капель жидкости, их начальные размеры и скорость, объемная концентрация в газовой области и другие.

Целью данных исследований является экспериментальное определение закономерностей и характеристик фазовых превращений и процессов деформации при движении в газовых средах капель воды с использованием панорамных оптических методов цифровой «трассерной» визуализации и высокоскоростной

видеорегистрации. Достижение поставленной цели становится возможным при реализации многофакторного эксперимента с условием воспроизведения основных параметров процессов деформации и испарения одиночных и большой совокупности капель жидкости (начальной температуры и размеров капель, их компонентного состава и начальной скорости, объемной концентрации в газовой области, термогазодинамических параметров окружающей среды) при их движении в газовых средах.

В качестве рабочей жидкости при проведении экспериментов использовались как жидкости различной природы (вода, керосин, этиловый спирт), так и различные компонентные составы на основе воды. Керосин и этиловый спирт применялись в экспериментах для оценки влияния свойств жидкостей на характеристики исследуемых процессов деформации капель. При экспериментальном анализе процессов испарения распыленных капельных потоков, а также для определения размеров крупных монолитных капель жидкости использовалась вода со специальными включениями – «трассерами», представляющими примесь (0,5 % по массе) нанопорошка диоксида титана. Последние вводились в состав рабочей жидкости для повышения контрастности видеogramм, получаемых кросскорреляционной камерой. Частицы TiO_2 выбраны в качестве «трассеров», так как не растворяются в воде [175].

Для исследования влияния начальной температуры воды T_w на характеристики деформации и испарения капель использовалась специальная нагревательная система [176-178]. Для охлаждения жидкости применялись специальные термоизолированные емкости, заполненные льдом. Температура T_w в экспериментах варьировалась в диапазоне от 278 К до 363 К. Начальные температуры капель воды регистрировалась хромель-копелевыми (диапазон измеряемых температур 233–573 К, допустимое отклонение $\Delta = 2,5$ К) термопарами. Использовалась методика термопарных измерений [179].

Для исследования влияния примесей солей в воде на характеристики ее испарения в качестве рабочей жидкости применялся состав $H_2O + NaCl$. Массовая доля соли в воде изменялась в пределах $\gamma=0-10\%$.

Для исследования влияния твердых включений в составе капель жидкости на характеристики их деформации и испарения применялась смесь воды с твердыми углеродистыми включениями фиксированных размеров и в определенной концентрации. Относительная массовая концентрация твердых включений γ_c в каплях воды варьировалась в диапазоне $0-1\%$. Размеры твердых включений L_m изменялись от 50 мкм до 500 мкм .

Для варьирования начальных скоростей капель жидкости использовались распылительные форсунки и дозаторы одиночных капель. Для изменения скоростей высокотемпературных газов в экспериментах применялась нагнетательная система.

2.2. Экспериментальный стенд и методика исследований

Для проведения экспериментальных исследований фазовых превращений и процессов деформации при движении в газовых средах теплоэнергетического оборудования капель воды разработан экспериментальный стенд (рис. 2.2.1).

Основными элементами стенда являются: высокоскоростная видеокамера 1 с форматом изображения – 1024×1024 пикселей, частотой кадров – до 10^5 в секунду; кросскорреляционная видеокамера 2 с форматом изображения – 2048×2048 пикселей, минимальной задержкой между двумя последовательными кадрами – не более 5 мкс ; двойной импульсный твердотельный лазер 3 с активной сферой «алюмо-иттриевый гранат» и добавками неодима, имеющий длину волны – 532 нм , энергию в импульсе – не менее 70 мДж , длительность импульса – не более 12 нс , частоту повторений – не более 15 Гц ; синхронизирующий процессор 4 с дискретизацией сигналов не более 10 нс и поддерживающий режимы внешнего и внутреннего запуска.

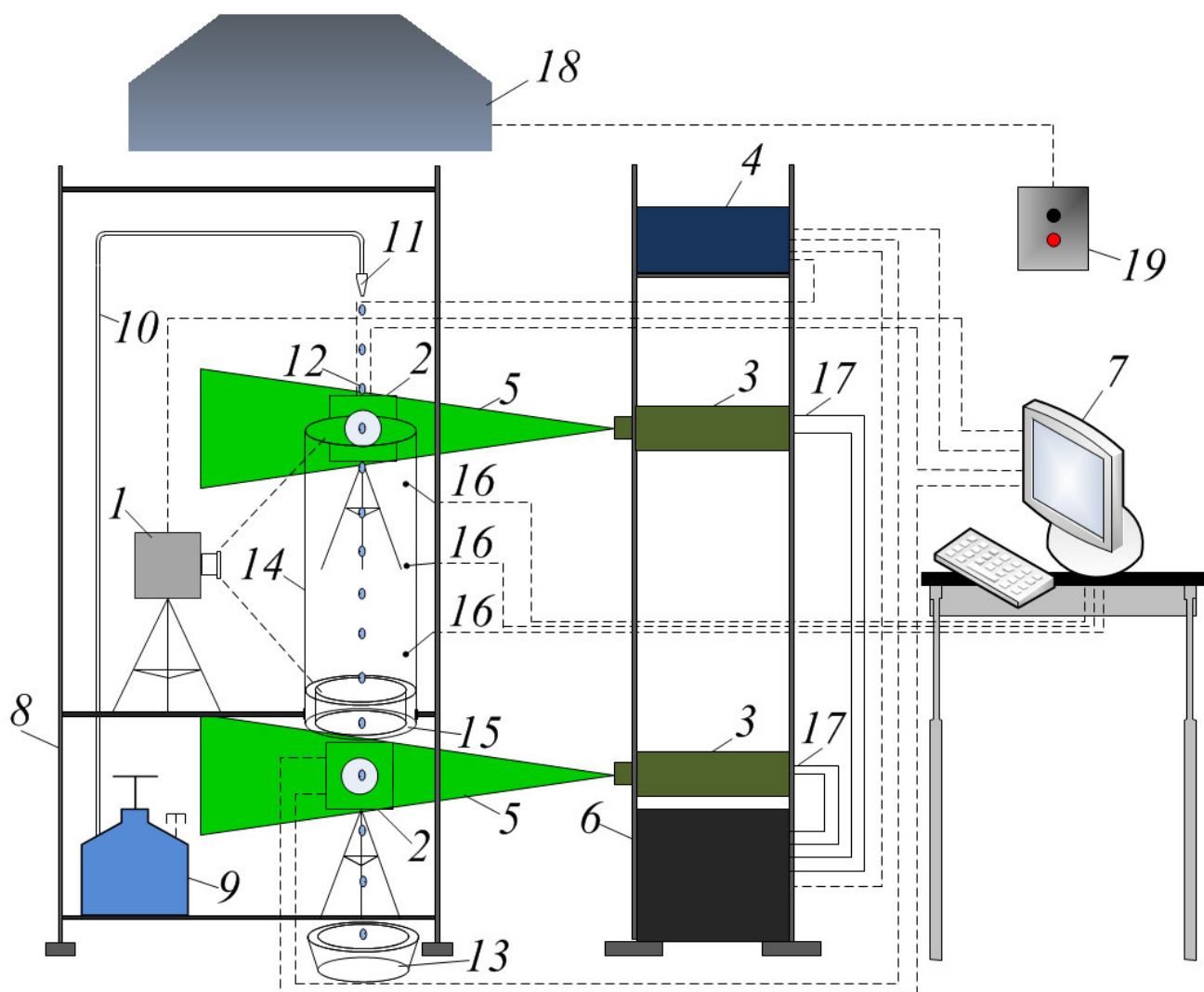


Рисунок 2.2.1. Схема экспериментального стенда: 1 – высокоскоростная видеокамера; 2 – кросскорреляционная видеокамера; 3 – двойной твердотельный импульсный лазер; 4 – синхронизатор ПК, кросскорреляционной камеры и лазера; 5 – световой «нож»; 6 – генератор лазерного излучения; 7 – ПК; 8 – штатив; 9 – ёмкость с рабочей жидкостью; 10 – канал подачи рабочей жидкости; 11 – дозатор/распылитель; 12 – капли рабочей жидкости; 13 – уловитель; 14 – цилиндр из жаростойкого светопрозрачного материала; 15 – полый цилиндр, во внутреннее пространство которого залита горючая жидкость; 16 – термопары; 17 – канал движения охлаждающей жидкости лазера; 18 – нагнетательная система вентиляции; 19 – пульт включения/отключения нагнетательной системы вентиляции

К формированию аппаратной части современных диагностических систем, работающих на базе методов цифровой «трассерной» визуализации, предъявляются довольно высокие требования, как следствие, провести верные измерения без использования высокоточной и скоростной техники просто не представляется возможным. Так, в частности, основными элементами любой системы на базе панорамных оптических методов являются мощные лазеры и скоростные видео и фотокамеры.

Существуют несколько типов лазеров: импульсные и непрерывные. В качестве альтернативы лазерному излучению в ряде случаев также используются источники излучения на светодиодах. Применение непрерывных лазеров и светодиодных ламп имеет ряд недостатков, в частности это генерация длинных и маломощных импульсов и, как следствие, возможность их применения лишь для исследования свойств медленных (водяных) потоков с максимальным размером регистрационной области до 50×50 мм. Поэтому наибольшее распространение получили твердотельные импульсные Nd:YAG лазеры. Применение таких устройств обусловлено генерацией большой энергии при очень малой длительности импульса. Как следствие, импульсные Nd:YAG лазеры в настоящий момент не имеют альтернативы и могут применяться для большинства задач и практических приложений.

В качестве камер для комплектации PIV систем, как правило, используются высокоскоростные (CMOS) либо кросскорреляционные (CCD). Выбор камеры обуславливается рядом требований, в частности: высокое разрешение матрицы, низкий уровень шума, высокая квантовая эффективность (чувствительность), широкий динамический диапазон, малая задержка между последовательными кадрами. Чувствительность и динамический диапазон данных типов камер имеют довольно близкие показатели. Однако, CMOS камеры, как правило, имеют более высокую скорость съемки, в отличие от CCD камер. Это позволяет фиксировать большие скорости потока среды при измерениях. Несмотря на это, зачастую в PIV системах используются именно CCD камеры, это обуславливается несколькими

причинами. Кросскорреляционные CCD видеокамеры имеют очень низкий уровень шума, что значительно повышает точность измерений. К тому же матрицы CCD камер имеют более высокое разрешение в отличие от CMOS, в которых за счет увеличения скорости съемки падает разрешение, это позволяет получить гораздо большее количество векторов скорости в регистрационной области при обработке отснятых изображений.

Для формирования высокотемпературной газовой среды с контролируемыми параметрами применялся (рис. 2.2.1) вертикальный цилиндрический канал 14 (высота 1 м, диаметр 0,3 м) из огнеупорного жаростойкого светопрозрачного стекла. В основании канала устанавливался полый цилиндр 15 (высота 0,1 м, внутренний и внешний диаметры – 0,26 м и 0,3 м соответственно), в межстеночное пространство которого заливалось типичное жидкое топливо со стабильными свойствами – керосин – и зажигалось перед проведением опытов. Через интервал времени около 5 минут вследствие стационарного режима горения керосина в цилиндре 14 формировалась газовая среда с требуемой для экспериментов высокой температурой.

Для измерения и контроля температуры продуктов сгорания в цилиндрическом канале 14 использовались хромель-алюмелевые (диапазон измеряемых температур – 273–1373 К, погрешность измерения ± 3.3 К) термопары 16. Проводились измерения в трех точках по высоте канала 14 – 0,15 м, 0,5 м, 0,85 м на оси его симметрии. Температура газов в цилиндре 14 при стационарном горении керосина составила 1070 ± 30 К. Для обеспечения относительно низких температур (до 285 К) в цилиндре 14 выполнялась его наружная термоизоляция с использованием льда. Умеренные (около 300 К) температуры воздуха в цилиндре 14 обеспечивались с использованием системы вентиляции 18.

Для измерения массы одиночных капель жидкости вместо уловителя 13 устанавливались лабораторные весы с дискретностью 0,01 мг.

Таким образом, экспериментальные исследования рассматриваемых процессов выполнялись в условиях, характерных основным теплоэнергетическим приложениям, рассмотренным в главе 1.

2.2.1. Одиночные капли жидкости

Для исследования процессов деформации при движении в газовых средах одиночных капель жидкости разработана следующая методика проведения эксперимента, состоящая из двух этапов. На первом этапе определяются характерные времена и протяженности деформационных циклов капель жидкости. На втором этапе вычисляются размеры и мгновенные скорости капель.

Первый этап. Рабочая жидкость из емкости 9 по каналу 10 поступает на вход дозатора 11. В соответствии с заданными начальными размерами d_0 и скоростью u_0 из дозатора 11 выходят одиночные капли 12, которые пролетают через зону регистрации в воздухе до уловителя 13. Процесс движения капель регистрируется видеокамерой 1 (с частотой 10000 кадров в секунду). Проводится не менее 10 экспериментов для одного размера и скорости капель при прочих неизменных условиях. После обработки видеogramм на персональном компьютере (ПК) 7 выделяются участки с характерными изменениями конфигурации капель. Фиксируются интервалы времени t_d , в течение которых капли завершают полный «цикл деформации», т.е. последовательно дважды принимают близкую к идентичной форму. Анализ видеogramм проведенных экспериментов позволяет сделать вывод о том, что для процесса изменения формы капель в рассматриваемых условиях можно использовать термин «деформационный цикл». При обработке видеogramм расстояние между дозатором 11 и уловителем 13 разделяется на группу участков, характеризующих соответствующие «деформационные циклы», и выполняется анализ «повторяемости» результатов измерений (как по времени t_d , так и характерной протяженности l_d).

Дозатор *11* удален от уловителя капель *13* на 1 м (расстояние, которое проходили капли в проведенных экспериментах). Начальные размеры капель воды варьировались в диапазоне 3–6 мм. В качестве начального характерного размера капли принимался ее диаметр (d_0) при отрыве от дозатора *11*. Эксперименты показали, что в этот момент времени капля имеет форму, близкую к сферической. Поэтому можно вполне обоснованно диаметр капли в форме сферы считать ее характерным начальным размером. Начальные скорости капель u_0 варьировались в диапазоне до 3 м/с. Выбор этого диапазона обусловлен тем, что при испускании дозатором *11* капель с такими скоростями в регистрационных областях (рис. 2.2.1) видеокамеры *1* и кросскорреляционной камеры *2* обеспечивалось варьирование скоростей движения капель u в довольно широком дозвуковом диапазоне – 1–5 м/с.

Второй этап. С использованием кросскорреляционной камеры *2*, твердотельного импульсного лазера *3* и синхронизатора *4* для выделенных на первом этапе экспериментов участков проводится измерение размеров капель (выполняются 10 экспериментов с идентичными первому этапу размерами и скоростями капель, но изображения капель фиксируются только для выделенного участка движения от дозатора *11* до уловителя *13* – одного или нескольких «циклов деформации»). Каждая видеogramма разделяется на расчетные области размерами 32×32 пикселей. Согласно рекомендациям [41-45], рассчитывается масштабный коэффициент S (для видеogramм рассматриваемых экспериментов значения S изменялись в диапазоне 0,01–0,05 мм/пиксель). С использованием специализированных координатных сеток и алгоритмов [41, 42] вычисляются условные (так как форма капель соответствует, в основном, эллипсоидам) максимальные диаметры капель в пикселях, а затем, с применением коэффициента S , выполняется пересчет в миллиметры.

Также с использованием кросскорреляционной камеры вычислялись скорости движения капель u в регистрационной области видеокадра. Использовался оптический метод PIV. По отснятым видеogramмам, при

известных значениях временной задержки между вспышками лазера и масштабного коэффициента S , в расчетных областях видеокadres определялись мгновенные скорости движения капель u .

Для исследования фазовых превращений при движении в газовых средах одиночных капель жидкости разработана следующая методика проведения эксперимента. В цилиндрическом канале 14 (рис. 2.2.1) формируется высокотемпературная газовая среда с контролируемыми параметрами согласно методике из п. 2.2. По прошествии 5 минут (время, необходимое для прогрева внутренней полости цилиндра 14 до 1070 ± 30 К) рабочая жидкость из емкости 9 по каналу 10 начинает поступать на вход дозатора 11 . В соответствии с заданными начальными размерами d_0 и скоростью u_0 из дозатора 11 выходят одиночные капли 12 , которые пролетают через высокотемпературную газовую область до уловителя 13 . При помощи кросскорреляционной видеокамеры 2 фиксируются видеоизображения капель жидкости на входе и выходе цилиндрического канала 14 .

Размеры капель в расчетных областях видеogramм (до и после области высокотемпературных газов) определяются в соответствии со следующей методикой. Выбирается видеogramма (пара кадров кросскорреляционной камеры). По первому видеокadres для выбранной произвольно капли жидкости определяются максимальные её диаметры (в пикселях) в горизонтальном d_{x1} и вертикальном d_{y1} направлениях. Затем диаметр усредняется: $d_1=(d_{x1}+d_{y1})/2$. Те же процедуры проводятся для второго видеоизображения из пары кадров: $d_2=(d_{x2}+d_{y2})/2$. Далее выполняется усреднение диаметра капли: $d_{\text{капли(пикс)}}=(d_1+d_2)/2$. Затем при известном (заданном) масштабном коэффициенте S (мм/пикс) осуществляется перерасчет диаметра в миллиметры: $d_{\text{капли(мм)}}=d_{\text{капли(пикс)}} \times S$ и вычисляются соответствующие значения средних радиусов капель. После этого рассчитывается параметр, характеризующий уменьшение размера капель при движении через высокотемпературную газовую область: $\Delta R=(R_d-R_d^*)/R_d$, где R_d ,

R_d^* – значение условного среднего радиуса капли на входе и выходе из зоны высокотемпературных газов, соответственно, мм.

Экспериментальные исследования фазовых превращений и процессов деформации одиночных капель жидкости проводились в условиях низких, умеренных и высоких температур.

2.2.2. Полидисперсный капельный поток жидкости

Для определения диапазонов влияния на характеристики процесса испарения капель распыленной жидкости каждого исследуемого параметра проводился отдельный цикл экспериментов. Цикл опытов включал две серии по десять экспериментов. В первой серии экспериментов фиксировались видеокдры капель жидкости на входе в цилиндрический канал *14* (высота 1 м, диаметр 0,2 м), заполненный высокотемпературными газами. Во второй серии регистрировались изображения капель после прохождения ими высокотемпературной области (на выходе канала *14*). Для генерации потока распыленной жидкости с начальными размерами (радиусами) от 50 до 350 мкм в экспериментах использовались специальные распылительные форсунки *11*.

Каждая серия эксперимента включала несколько этапов:

- ✓ в емкость *9* заливалась предварительно подготовленная рабочая жидкость;
- ✓ к выходу емкости *9* через канал *10* подключался распылитель *11*, который настраивался в зависимости от необходимых параметров истечения жидкости;
- ✓ распылитель *11* устанавливался на штативе *8* на 0,5 м выше верхней грани цилиндра *14* (указанное удаление обусловлено необходимостью защиты распылителя *11* от плавления при воздействии выходящих из цилиндрического канала *14* высокотемпературных газов);
- ✓ высота фотоштатива кросскорреляционной камеры *2*, а также высота установки лазера *3* выбирались таким образом, чтобы оптическая ось камеры

- и плоскость светового «ножа» 5 лазера пересекались под углом 90 градусов (точка их пересечения находилась в регистрационной области видеокадров);
- ✓ проводилась калибровка кросскорреляционной камеры 2 (с определением масштабного коэффициента на персональном компьютере (ПК) 7), а также настройка «перетяжки» светового «ножа» 5 лазера 3;
 - ✓ основание полого цилиндра 15 заполнялась типичным жидким горючим веществом (около 250 мл), зажигание которого инициировалось перед проведением опыта;
 - ✓ по истечении 5 минут (время, необходимое для прогрева внутренней полости цилиндра 14 до 1070 ± 30 К) на ПК 7 запускалось специализированное программное обеспечение (реализующее оптические методы диагностики «Particle Image Velocimetry» (PIV) и «Interferometric Particle Imaging» (IPI)), включался распылитель 11 и проводилась процедура регистрации видеogramм с каплями рабочей жидкости;
 - ✓ по полученным в ходе съемки видеокадров на ПК 7 при помощи специального программного обеспечения вычислялись диапазоны изменения параметров, характеризующих процесс испарения жидкости при прохождении ей зоны пламени.

Экспериментальные исследования фазовых превращений капельных потоков воды проводились в условиях высоких температур. При обработке отснятых изображений определялись следующие параметры: скорости полидисперсного парочапельного потока и отдельных капель в нем, размеры капель в потоке, распределения капель по размерам и скоростям в регистрационных областях.

2.3. Методы исследований

Экспериментальное исследование процессов испарения больших массивов капель распыленной жидкости является сложной задачей, ведь размеры капель в

потоке могут составлять всего десятки (иногда единицы) микрон, а их скорости могут варьироваться практически от нуля и до десятков метров в секунду [94, 95]. Очевидно, что зафиксировать изменения вышеперечисленных параметров, не используя современную высокоточную аппаратуру, не представляется возможным. В связи с этим при исследовании основных закономерностей испарения массивов распыленной жидкости, а также монолитных одиночных капель жидкости при прохождении ими высокотемпературной газовой области использовались современные оптические методы диагностики двухфазных газопарожидкостных потоков «Particle Image Velocimetry» (PIV) и «Interferometric Particle Imaging» (IPI) [41–45].

Вышеупомянутые методы цифровой «трассерной» визуализации являются в настоящее время востребованными в ряде практических приложений – в авиастроительной индустрии, автомобилестроении (диагностика обтекания элементов летательных аппаратов и автомобилей), энергетике, химической и нефтегазодобывающей промышленности, машиностроении (оперативная диагностика и оптимизация аэрогидродинамики в реальных аппаратах или их моделях), а также медицине, при физическом моделировании работы искусственных сосудов и клапанов и многих других.

2.3.1. Метод «Particle Image Velocimetry»

Для измерения мгновенных скоростей перемещения трассирующих частиц в составе газопарокапельной смеси в экспериментах применен метод «Particle Image Velocimetry».

Метод цифровой «трассерной» визуализации «Particle Image Velocimetry» (PIV) относится к классу бесконтактных методов измерения скорости в потоках [41, 42]. В ряду других инструментов исследования структуры течений он занимает особое место, благодаря возможности регистрировать мгновенные пространственные распределения скорости. Данное преимущество является

особенно важным при изучении потоков, содержащих крупномасштабные вихревые структуры, информация о которых частично теряется при применении одноточечных методов диагностики. К подобным течениям можно отнести большую часть сдвиговых течений, включая струи, следы, слои смешения. Применение полевых методов дает возможность получения информации о динамике структур, их масштабов, расчета дифференциальных характеристик, пространственных и пространственно-временных корреляций, а также статистических характеристик потока [180]. Схема метода PIV в общем виде приведена на рис. 2.3.1.1.

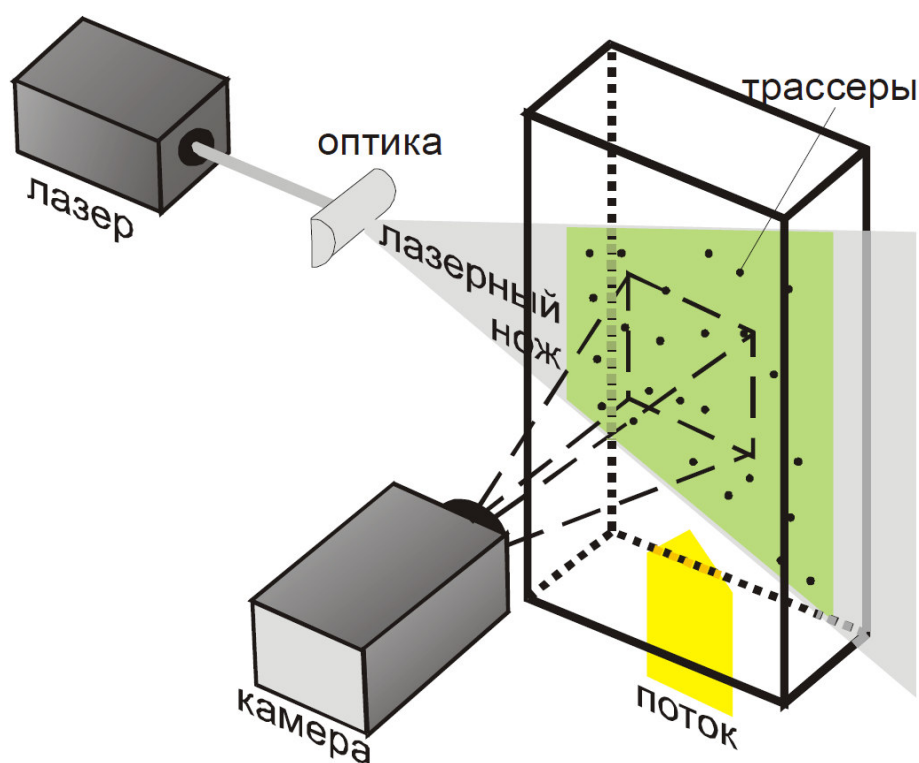


Рисунок 2.3.1.1. Схема метода «Particle Image Velocimetry» [180]

Измерение мгновенного поля скорости потока в заданном сечении основано на измерении перемещения частиц примеси, находящихся в плоскости сечения, за фиксированный интервал времени. В поток жидкости или газа добавляются частицы малого размера («трассеры»). Размер, плотность и объемная

концентрация частиц подбираются таким образом, чтобы эффекты, связанные с двухфазностью потока и плавучестью частиц, были минимальны. Измерительной областью потока (рис. 2.3.1.1) считается плоскость, «вырезаемая» световым ножом. Частицы в измерительной плоскости потока должны быть освещены минимум дважды. Образы частиц регистрируются на фотографический или электронный носитель (цифровую камеру). Последующая обработка изображений позволяет рассчитать смещения частиц за время между вспышками источника света и построить двухкомпонентное поле скорости. Измеренные двухкомпонентные значения векторов являются проекциями реальных (трехмерных) векторов на плоскость, перпендикулярную оптической оси регистрирующей образы частиц аппаратуры[180].

Основными преимуществами метода являются: бесконтактность, возможность измерения мгновенных распределений скорости, широкий диапазон измеряемых скоростей – от нуля до сверхзвуковых.

Одним из основных элементов метода PIV является обработка полученных в эксперименте изображений. Различают несколько модификаций количественной стробоскопической визуализации в зависимости от концентрации частиц и, соответственно, методов обработки. В качестве критерия обычно используется параметр N_1 – «плотность образов частиц», определяемый как [180]:

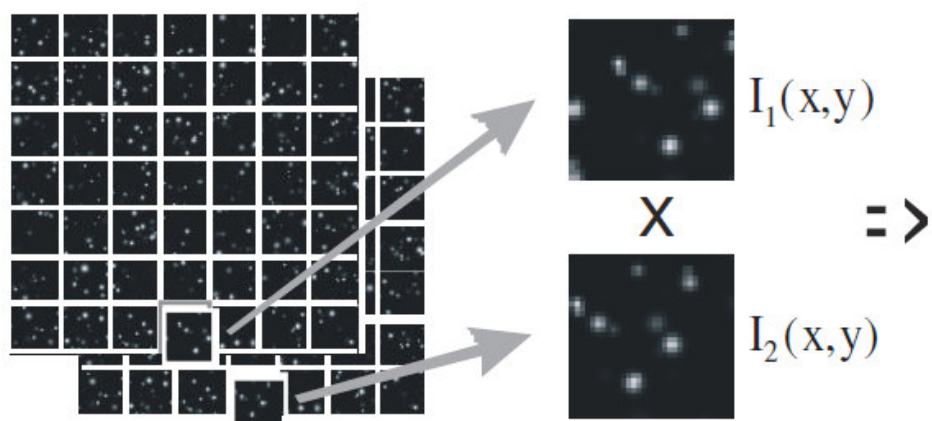
$$N_1 = C \cdot Vz_0 \cdot (D_1 / M_0)^2,$$

где C – счетная концентрация «трассеров», Vz_0 – толщина лазерного ножа, D_1 – размер расчетной области, M_0 – коэффициент увеличения. Метод PIV при $N_1 \approx 10$ предполагает использование корреляционных алгоритмов обработки «трассерных» изображений. Все поле течения разбивается на элементарные измерительные области. Для каждой области вычисляется корреляционная функция сдвигов частиц.

Существуют два основных типа корреляционных алгоритмов [45]: автокорреляционный (на одном кадре записаны как начальные положения «трассеров», так и конечные) и кросскорреляционный (начальные и конечные

положения «трассеров» фиксируются на разные кадры). Последний метод использовался при обработке видеogramм экспериментов. Применение кросскорреляционных алгоритмов является предпочтительным, поскольку в автокорреляционных алгоритмах начальные и конечные положения «трассеров» равнозначны, и смещение определяется с точностью до знака. Сущность кросскорреляционного подхода заключается в следующем (рис. 2.3.1.2). Имеются два изображения, на одном из которых зафиксированы частицы в момент первой вспышки, а на другом в момент второй вспышки лазера. Каждое изображение разбивается на элементарные (расчетные) области размером $d_x \times d_y$ (рис. 2.3.1.2). Интенсивность отраженного от частиц и зарегистрированного камерой света (степень серого) можно представить дискретной функцией двух переменных x и y : $I_1(x, y)$ и $I_2(x, y)$ для первого и второго кадра соответственно. Рассчитывается корреляционная функция [180]:

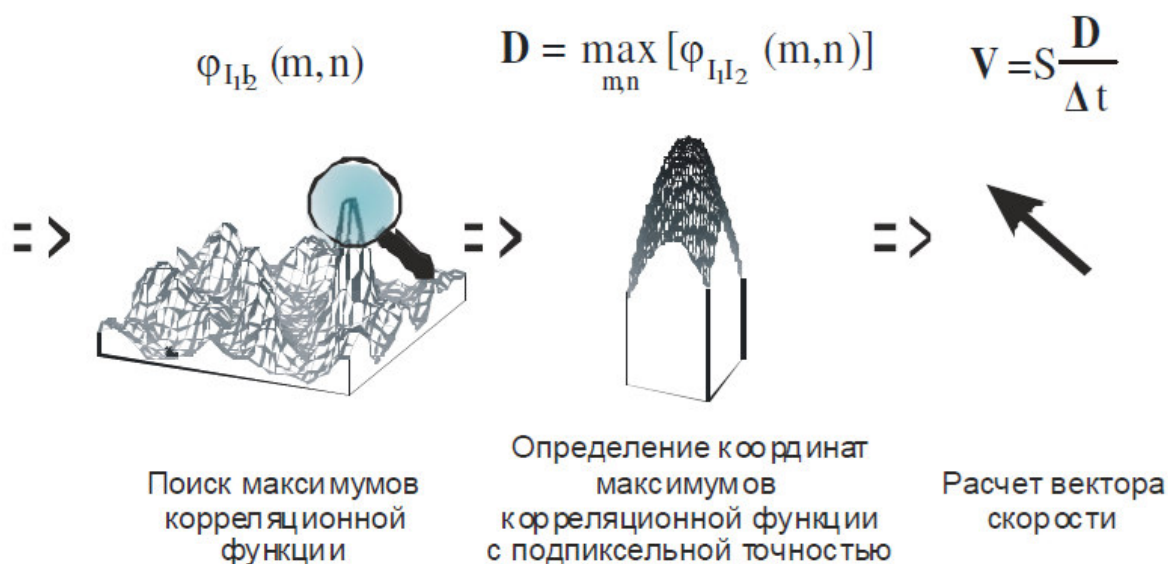
$$\phi_{I_1 I_2}(m, n) = \sum_{l=-d_y/2}^{d_y/2} \sum_{k=-d_x/2}^{d_x/2} I_1(k, l) \cdot I_2(k + m, l + n).$$



Разбиение изображений на соответствующие расчетные области

Расчет корреляционной функции «степени серого» для пары областей

a



б

Рисунок 2.3.1.2. Типичные кросскорреляционные алгоритмы (а, б) вычисления вектора скорости по изображениям частиц в потоке [180]

Максимум корреляционной функции соответствует наиболее вероятному сдвигу частиц в данной области. При этом в идеальном случае предполагается, что скорость потока в элементарной области неизменна и все частицы перемещаются одинаково, т.е. у корреляционной функции существует один наиболее ярко выделенный максимум на фоне шума. Для более точного определения координат максимума используется подпиксельная интерполяция корреляционной функции в окрестности ее максимума. Координатой максимума считается максимум интерполирующей функции. Для расчета корреляционной функции используется стандартный алгоритм быстрого преобразования Фурье с применением корреляционной теоремы [180]:

$$\phi_{I_1 I_2} = \mathcal{F}^{-1} [\mathcal{F}[I_1] \cdot \mathcal{F}^* [I_2]],$$

где \mathcal{F} и \mathcal{F}^{-1} – прямое и обратное преобразование Фурье соответственно. В алгоритмах быстрого преобразования Фурье размер элементарной области равен $2^n \times 2^n$, где $n = 2-8$.

Зная временную задержку между вспышками лазера Δt и рассчитав наиболее вероятное перемещение частиц D в данной элементарной области, определяется скорость:

$$v = S \cdot D / \Delta t ,$$

где S – масштабный коэффициент для пересчета скорости в м/с.

В данной диссертационной работе предпочтение отдано использованию кросскорреляционного алгоритма обработки данных. Применялся программный пакет «ActualFlow» (разработка сотрудников Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН [94, 95, 165-167, 180]).

При обработке видеogramм рассчитывался масштабный коэффициент S , который для исследуемой рабочей области (на входе и выходе канала с пламенем) составлял 0,01–0,1 мм/пикс. Видеogramмы разбивались на расчетные области 32×32 , 64×64 или 128×128 пикс. Выбор значения масштабного коэффициента, а также размеров расчетных областей был обусловлен ограничениями PIV метода [180]. Для каждой области рассчитывалась корреляционная функция. Одновременно с нахождением максимума корреляционной функции для уменьшения числа случайных корреляций, связанных с эффектом «потери пары», применялось наложенное «Top-hat» окно [41, 42], что позволяло уменьшить вклад в корреляционную функцию частиц, которые располагаются в непосредственной близости от границ расчетной области видеокadra. При известных временных задержках между вспышками лазера и наиболее вероятных перемещениях частиц (определенных по максимуму корреляционной функции) в расчетных областях видеокadров определялись мгновенные скорости «трассеров» [41–45].

Итогом обработки отснятых изображений являются видеogramмы потока капель распыленной жидкости (рис. 2.3.1.3) и соответствующие им поля скоростей (рис. 2.3.1.4).



Рисунок 2.3.1.3. Типичная видеogramма потока капель распыленной жидкости в проведенных экспериментах

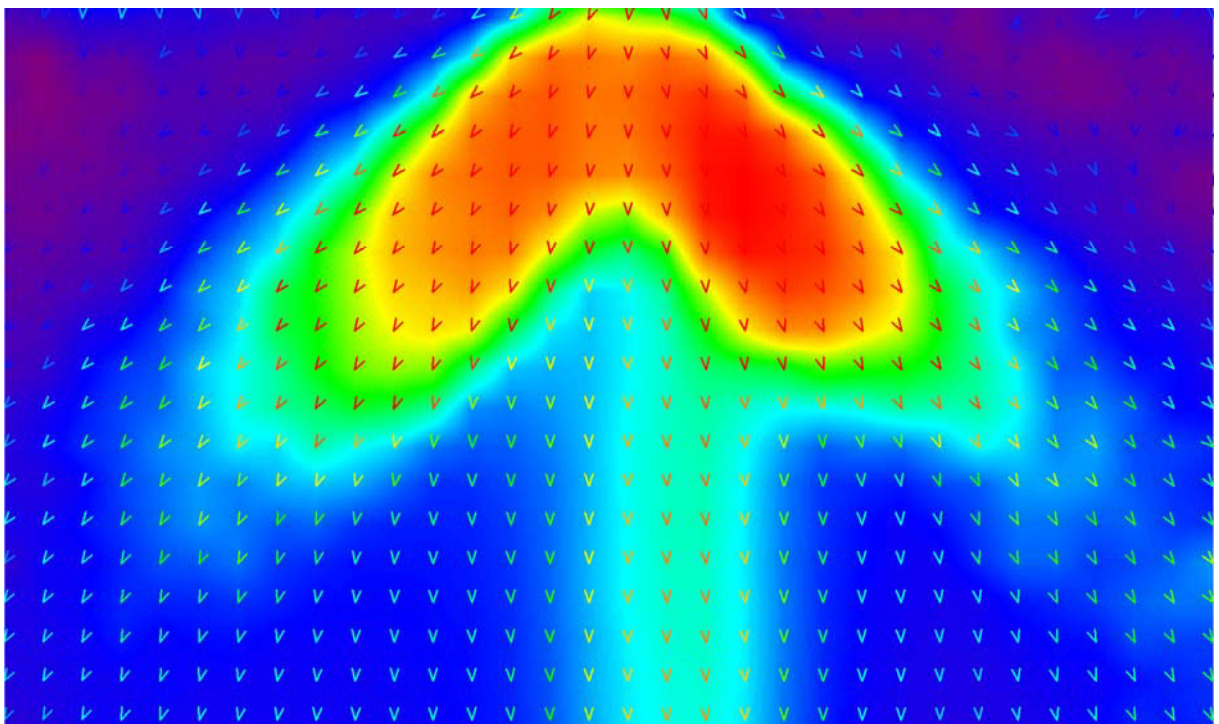


Рисунок 2.3.1.4. Типичное поле скорости потока капель распыленной жидкости в проведенных экспериментах

Также при обработке видеogramм экспериментов использованы фильтры в виде весовых функций [44, 45]: «No–DC» (для удаления постоянной компоненты в сигнале) и «Low–pass» (для увеличения ширины корреляционных пиков за счет отсекаания небольшой части низких и значительной части высоких частот из спектра корреляционной функции). Дополнительно выполнялась процедура отсева части полученных векторов по критерию «сигнал/шум» (функция «Peak Validation») [44, 45].

2.3.2. Метод «Interferometric Particle Imaging»

Для измерения размеров капель тонкораспыленной жидкости в экспериментах использован оптический метод «Interferometric Particle Imaging» [181].

Интерферометрический метод измерения размеров капель «Interferometric Particle Imaging» (IPI, также известен под названием ILIDS) можно отнести к классу полевых оптических методов исследования течений жидкости и газа. Данный метод позволяет измерять размеры сферических капель в выделенном плоском сечении потока [165, 182-185]. Обработка данных позволяет также определить положение капель и их скорость, что вместе с размерами капель составляет значительную часть информации о потоке. Основными преимуществами метода IPI являются: невозмущающий способ измерения, локальность больше, чем у распространенных интегральных методов, возможность измерений в реагирующих потоках, в т. ч. с горением. В отличие от одноточечных методов измерения (например, PDA – Phase Doppler Analyzer), IPI дает информацию о каплях сразу во всем выбранном сечении потока. Еще одним преимуществом IPI является возможность построения измерительной системы на базе довольно широко распространенных PIV-систем (измеритель полей скорости на основе метода Particle Image Velocimetry), задействовав наиболее дорогие компоненты таких систем – цифровую камеру и лазер. Также возможно

комбинирование метода IPI, например, с методом PLIF (Planar Laser Induced Fluorescence) для одновременного измерения температуры в том же сечении потока или с методом PIV для измерения полей скорости [165].

Измерение диаметра капли методом IPI осуществляется по расстоянию между полосами на интерференционной картине, формируемой отраженным и однократно преломленным каплей светом (рис. 2.3.2.1). Измерительная система включает в себя лазер, из луча которого формируется световой «нож», и цифровую камеру с расфокусированным объективом (рис. 2.3.2.2). Камера регистрирует интерференционные картины сразу от всех капель, освещенных световым ножом, а использование сферических и цилиндрических линз позволяет получить «сжатый» по одной координате образ капли с сохранением полезной информации – интерференционных полос, что значительно снижает вероятность перекрытия образов капель [165].

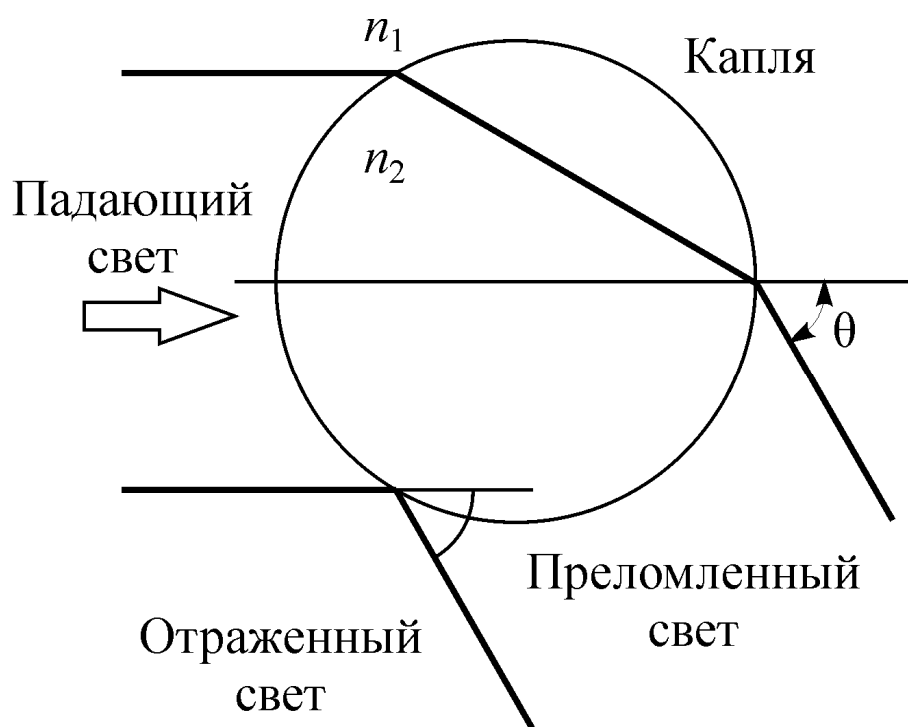


Рисунок 2.3.2.1. Отражение и преломление каплей лазерного луча [181]

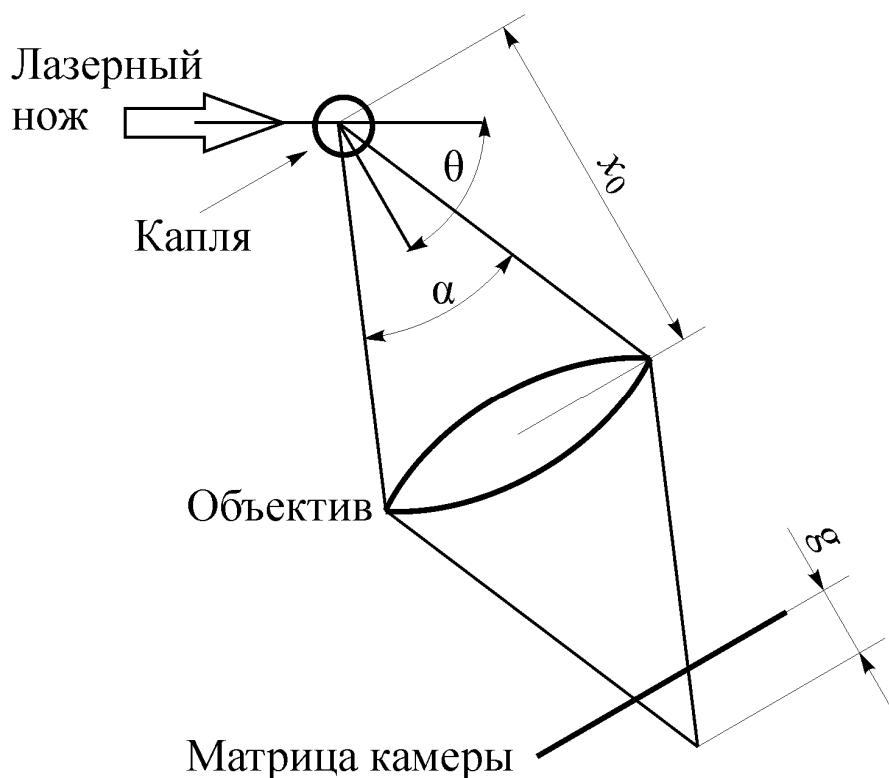


Рисунок 2.3.2.2. Оптическая схема измерительной установки [181]

Измерение диаметра сферической частицы методом ПИ осуществлялось путем анализа распределения интенсивности света, рассеянного такой частицей [165].

Капли в потоке многократно освещались световым «ножом» лазера. Параллельно их образы регистрировались предварительно откалиброванной цифровой кросскорреляционной камерой с расфокусированным объективом. Отснятые изображения подвергались обработке при помощи специального программного обеспечения, в ходе которой определялись мгновенные распределения размеров и скоростей частиц.

Приближенное значение диаметра частицы, вычисленного с применением данного метода, может быть описано следующим выражением [101]:

$$d = \frac{2\lambda}{\Delta\theta n_1} \left(\cos \frac{\theta}{2} + \frac{m \sin(\theta/2)}{\sqrt{m^2 - 2m \cos(\theta/2) + 1}} \right)^{-1},$$

где λ – длина волны света; $\Delta\theta$ – угловое расстояние между полосами на интерференционной картине капли; θ – угол рассеяния (наблюдения); $m=n_2/n_1$, n_1 – показатель преломления окружающей среды, n_2 – показатель преломления капли жидкости.

Итогом обработки отснятых изображений являются мгновенные распределения размеров и скоростей частиц в выбранной регистрационной области (рис. 2.3.2.3, 2.3.2.4).

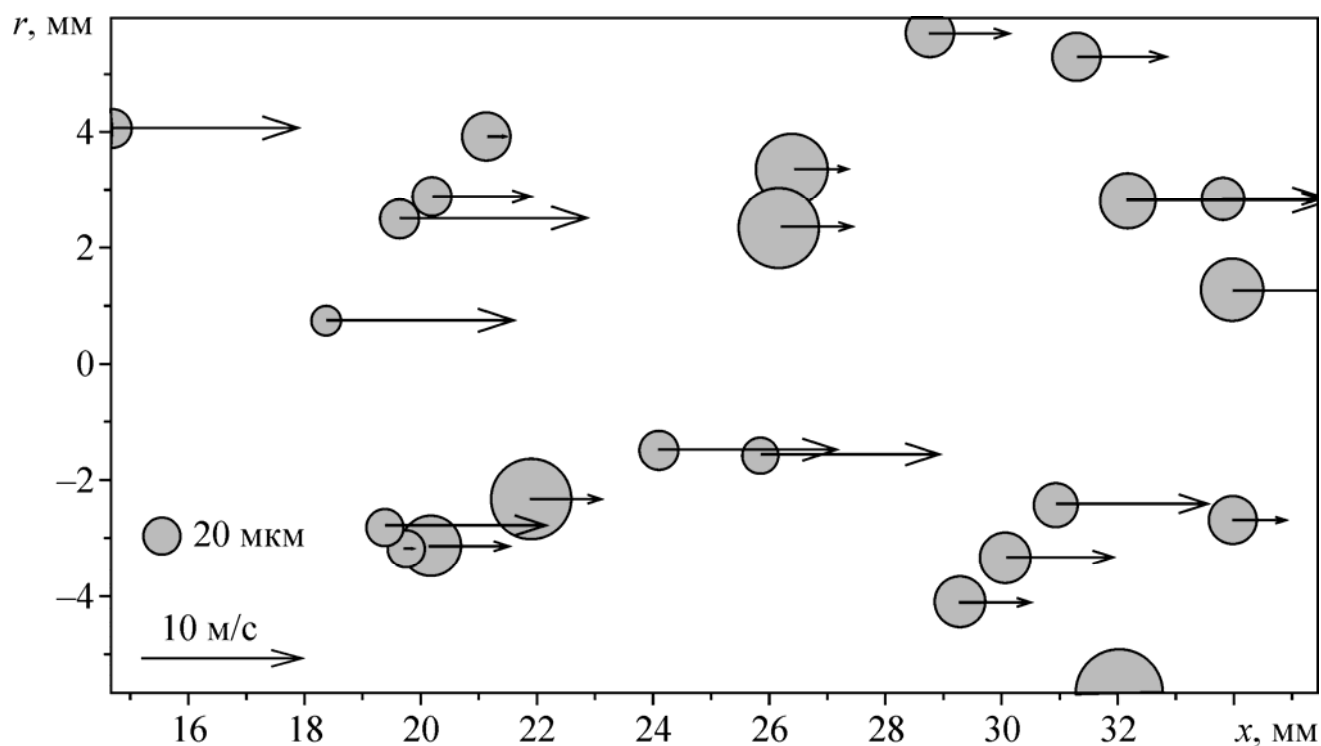


Рисунок 2.3.2.3. Мгновенное распределение капель в измерительной плоскости и их скорости [165]

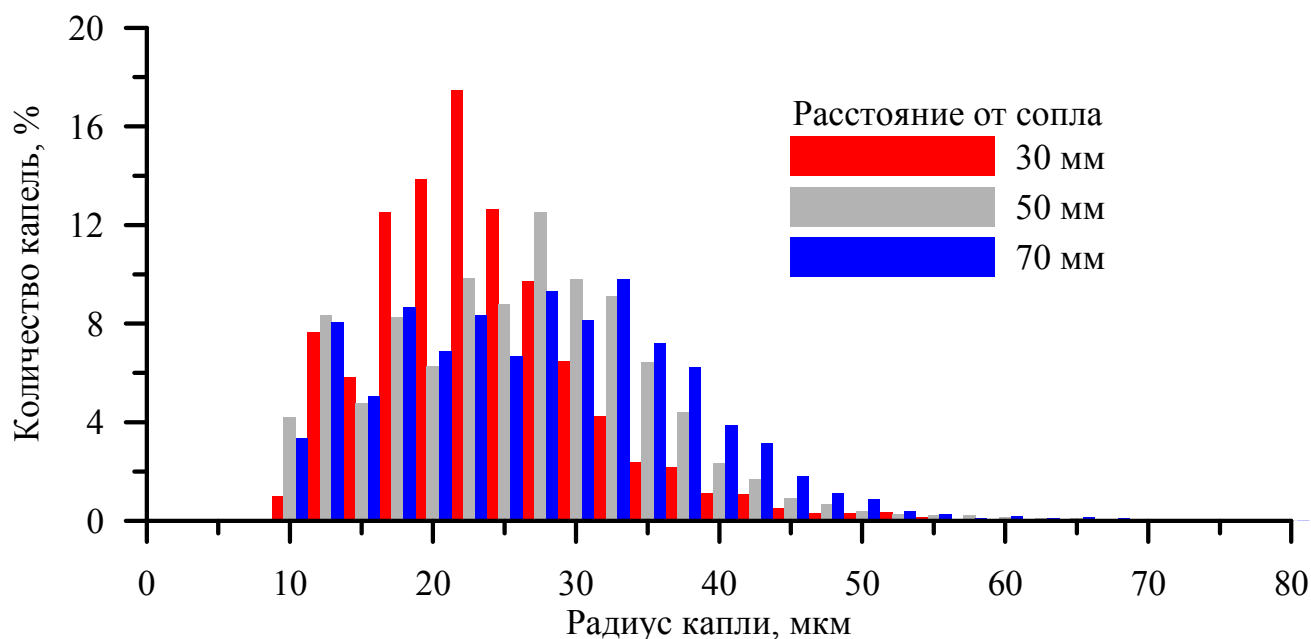


Рисунок 2.3.2.4. Распределение капель по размерам для различных расстояний от среза сопла [165]

2.4. Оценка достоверности результатов экспериментальных исследований

2.4.1 Оценка погрешности определения скоростей движения капель

Точность измерения скоростей движения может быть оценена несколькими способами. Один из них – это использование реальных PIV измерений, сделанных на физическом объекте с известными распределениями скоростей. Например, PIV измерения в стационарном потоке были использованы для оценки точности метода в работе [41], а также измерения в воздушной струе при ламинарном режиме движения [186]. Такой способ дает наиболее реальную оценку точности измерений. Однако он не позволяет исследовать полностью вклад в погрешность таких параметров, как диаметр частиц или уровень шума на изображении [180].

Другой способ оценки погрешности (используемый в настоящей работе) – применение алгоритмов обработки к искусственным изображениям, сгенерированным методом Монте-Карло [41, 186-189]. В прямоугольной области

пространства, моделирующей световой нож, создавалось случайное распределение частиц. После дискретизации и оцифровки изображений проводилась обработка данных при помощи PIV алгоритмов [166, 167] и сравнение результатов с известными распределениями скорости (это позволило оценить погрешность измерений). Изменение параметров тестовых изображений способствовало определению их вклада в погрешность по отдельности.

Использовался генератор искусственных изображений (PIV Standard Project) [180]. Программа-генератор создает изображения с заданными параметрами. Кроме того, вместе с изображениями пользователю предоставляются точные значения перемещений частиц, использованные для создания изображений. Поля скорости (перемещения), рассчитанные по изображениям, могут быть сравнены с известными значениями перемещений частиц.

Основой данного подхода является генерация адекватных изображений «трассеров» [180]. Генератор изображений позволяет задавать такие параметры, как диаметр частиц, распределение их по диаметру, форма частиц, пространственная плотность частиц и т.д. Для большинства представленных в главе 3 результатов моделирования распределение интенсивности каждой отдельной частицы представляется в виде Гауссовой функции с заданной шириной. Распределение интенсивности лазерного излучения в нормальном направлении по отношению к плоскости лазерного ножа также задается Гауссовым распределением. Генератор случайных чисел задает случайные координаты частиц внутри области лазерного ножа. Далее производится интегрирование интенсивности по области, соответствующей площади одного пикселя изображения. Для создания перемещений частиц внутри измерительной области используется искусственное поле скорости с заданным пространственным распределением и градиентами.

Ниже представлены результаты применения рассматриваемого подхода к оценке точности PIV измерений [187].

На рис. 2.4.1.1 представлены ошибки кросскорреляционного алгоритма расчета поля скорости в зависимости от диаметра частиц на изображении. Видно, что оптимальный размер изображения «трассера» равен 1,5 пикс.

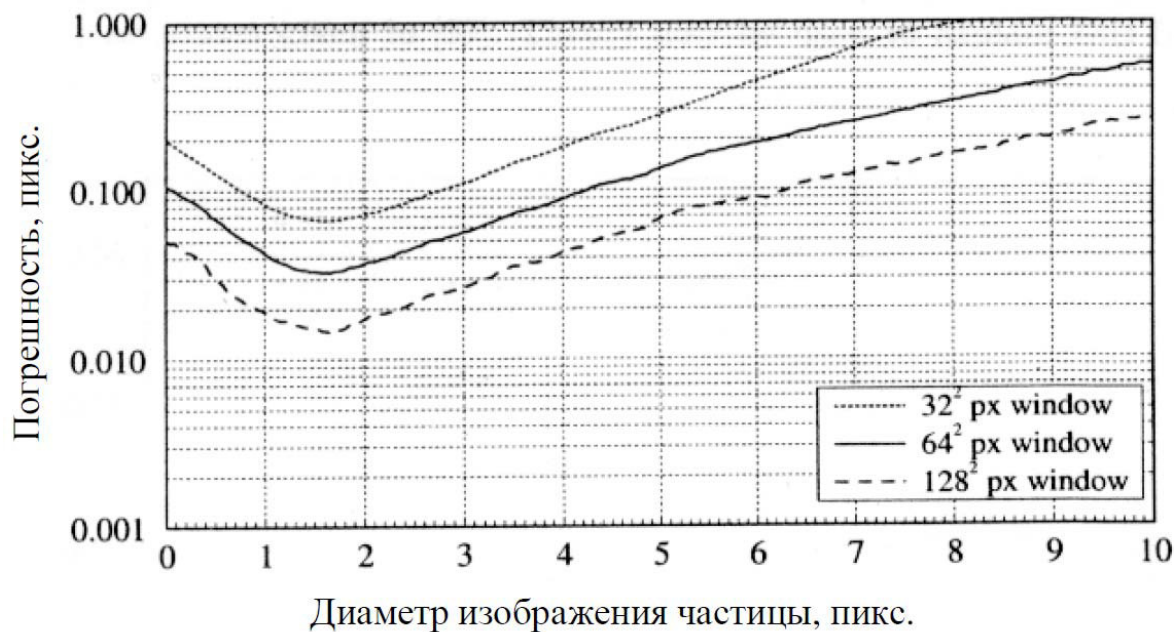


Рисунок 2.4.1.1. Типичные ошибки кросскорреляционного алгоритма расчета поля скорости в зависимости от диаметра частиц на изображении [180]

На рис. 2.4.1.2 приведены ошибки кросскорреляционного алгоритма в зависимости от смещения частиц для разного количества частиц в элементарной расчетной области (N_I). Видно, что при уменьшении смещения частиц точность расчета повышается. При использовании итерационных алгоритмов расчета поля скорости расчет перемещений частиц на всех итерациях кроме первой происходит с компенсацией смещения, что приводит к повышению точности метода, поскольку частицы в данном случае делают малые перемещения. Кроме того, на графике видно, что точность расчета повышается с увеличением счетной концентрации частиц N_I на элементарной расчетной области.

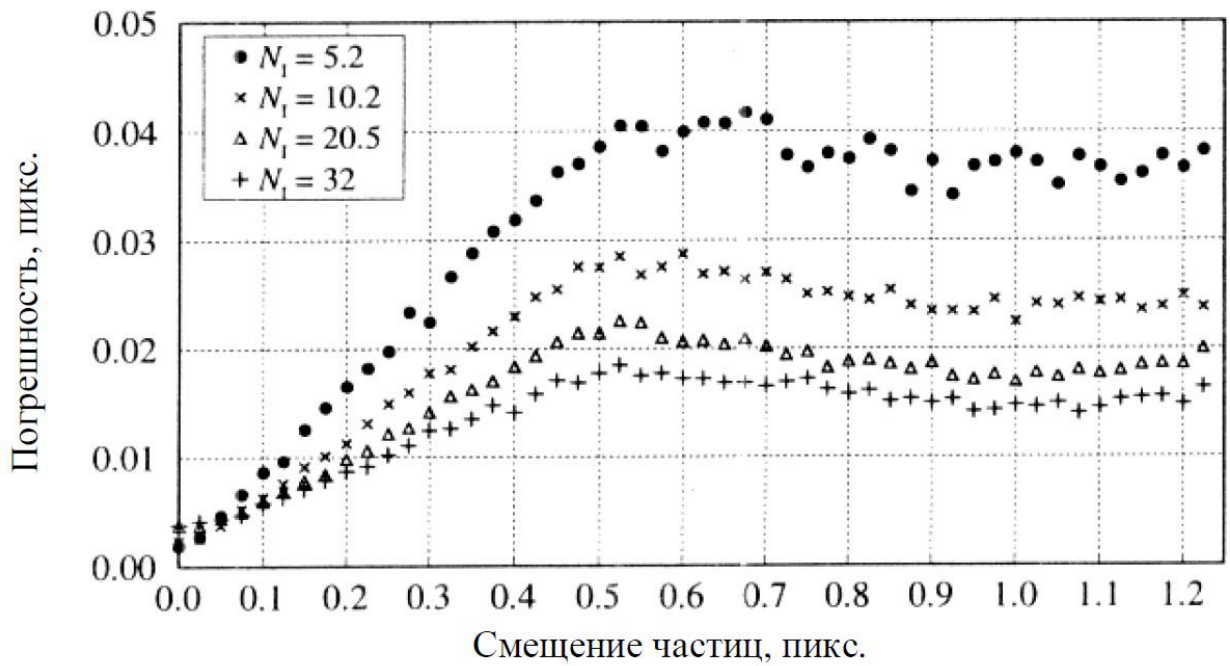


Рисунок 2.4.1.2. Типичные ошибки кросскорреляционного алгоритма в зависимости от смещения частиц для разного количества частиц в элементарной расчетной области (N_1) [180]

Поскольку метод PIV основан на статистическом расчете перемещений с использованием корреляций между частицами на изображении, наличие градиента скорости внутри расчетной области влияет на точность результатов обработки. В этом случае разные частицы на изображении делают разные перемещения, и, следовательно, на корреляционной функции возникает несколько пиков, соответствующих различным перемещениям частиц. Кроме того, некоторые частицы могут не иметь своей пары на втором изображении вследствие «эффекта потери пары». Для стандартного кросскорреляционного алгоритма без смещения областей наличие градиентов всегда приводит к недооценке значений скорости. Медленные частицы делают меньшие перемещения и, поэтому в меньшей степени подвержены «эффекту потери пары» и в среднем вносят больший вклад в истинные (не случайные) корреляции изображения.

На рис. 2.4.1.3 представлены среднеквадратичные ошибки расчета скорости как функция градиента скорости при различных концентрациях частиц и размерах элементарной расчетной области.

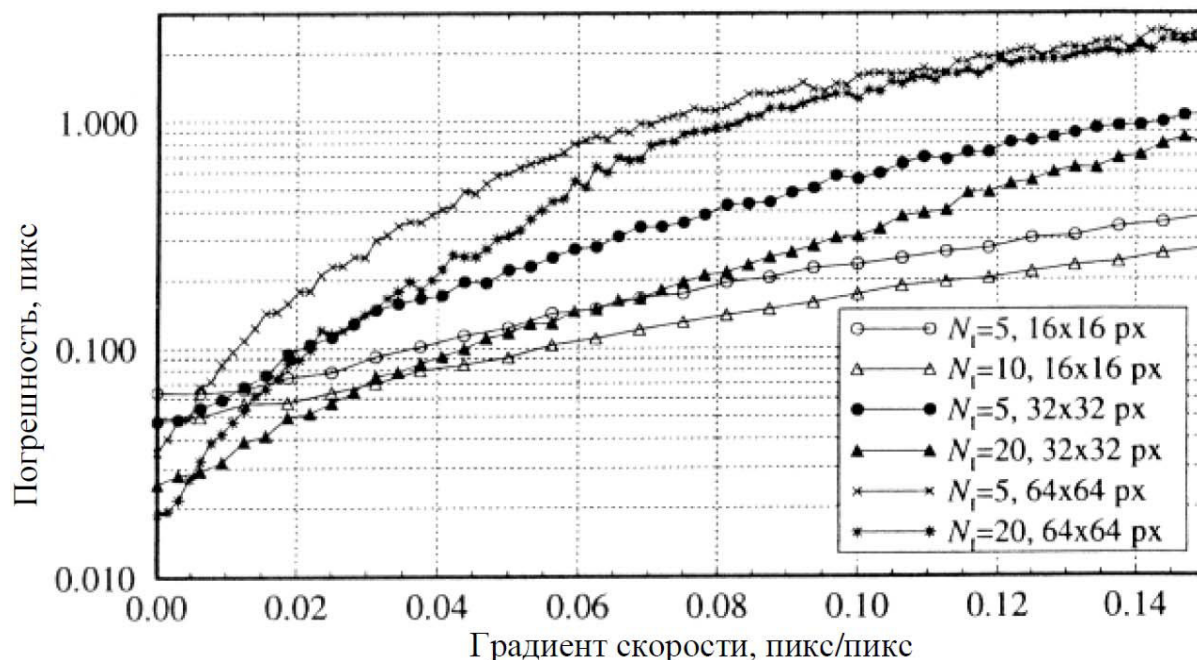


Рисунок 2.4.1.3. Типичные ошибки кросскорреляционного алгоритма как функция градиента скорости для различных концентраций частиц (N_I) и размеров элементарной области [180]

Анализ рис. 2.4.1.3 показывает, что расчет скорости с малым размером элементарной расчетной области дает более высокую точность. Даже при одинаковых (нормированных на площадь элементарной области) концентрациях расчет с использованием малых расчетных областей дает лучшую точность по сравнению со случаем больших расчетных областей.

Выполнив все подсчеты, учитывая рекомендации метода [180], определено, что с применением итерационных алгоритмов расчета при счетной концентрации «трассеров» $N_I \approx 20$, размере элементарной области $d_x \times d_y = 32 \times 32$ пикс., размере частиц на изображении и их смещении не более 2–3 и 1–1,5 пикс. погрешности

измерения скоростей капель в проведенных экспериментах не превысили 2 % [41, 186-189].

2.4.2 Оценка погрешности определения размеров капель

Погрешность измерения диаметра методом прямого наблюдения согласно методу IPI определяется оптическим увеличением M_0 , и пропорциональна размеру пикселя светочувствительного элемента камеры S_{pix} , оценочно погрешность составляет не менее S_{pix}/M_0 [181] (за погрешность измерения методом IPI принимается погрешность вследствие дискретизации измеряемой частоты интерференционных полос).

Существует ряд ограничений для параметров измерительной системы, работающей на основе метода IPI [181]: ограничения на концентрацию, размер и форму частиц. На точность измерений влияет угол наблюдения, показатель преломления, параметры лазерного излучения, точность калибровки.

Ограничение на концентрацию частиц связано с перекрытием их образов, что делает невозможным определение размера частицы по изображению. Формулы для оценки допустимой концентрации выведены в [190]. Ограничение на минимальный размер связано, с одной стороны, с ограничением используемой модели рассеяния света частицей, а с другой стороны – с необходимостью наблюдать на изображении минимум одну интерференционную полосу. Максимальный измеряемый размер частицы связан с необходимостью различать интерференционные полосы между собой. Формулы для такой оценки выведены также в [190].

Несферичность частиц существенно влияет на точность измерения диаметра. Согласно [191], погрешность измерений может достигать 6 % для капель и 10 % для пузырей при соотношении осей эллипса 0,9.

При проведении экспериментов отдельное внимание уделялось выбору угла наблюдения. Ошибка в определении угла наблюдения в 1° приводит к ошибке в

коэффициенте преобразования k до 0,4 %. Ошибка 0,01 в показателе преломления приводит к ошибке до 0,23 % в k .

Свой вклад вносит погрешность определения частоты полос на зашумленном изображении, которая возрастает с уменьшением числа наблюдаемых полос (уменьшение размера частицы или ее образа).

При проведении экспериментов, для минимизации погрешности, были соблюдены рекомендации [191] для проведения измерений диаметров капель. Угол наблюдения θ выбирался так, чтобы снизить погрешность из-за влияния ошибки в угле наблюдения и показателя преломления. После этого подбирались поляризация лазера для увеличения контраста интерференционной картины. Угол сбора подбирался исходя из минимального измеряемого диаметра. Размер образа частицы подбирался согласно максимальному измеряемому размеру капли. Фокусное расстояние объектива и положение матрицы камеры задавались из размера расфокусированного диска и минимизации ошибки калибровки. Когда все параметры были определены, вычислялась максимальная концентрация, в соответствии с рекомендациями [190].

Итоговая погрешность определения размеров мелкодисперсных капель, с учетом вышеперечисленных требований, не превысила 2,5 %.

Применение метода IPI при оценке размеров капель жидкости ограничена максимальным размером капли в 1000 мкм. Поэтому при исследовании закономерностей деформации и фазовых превращений, определяя размеры крупных капель в соответствии с алгоритмом из п. 2.2.1, при оценке погрешностей измерения размеров крупных ($d > 1$ мм) капель использовались методики [42-44].

Систематические погрешности измерения максимальных характерных размеров капель, определенные по методикам [42-44], составили 10^{-5} м. Случайные погрешности вычисления d_x , d_y и d_{\max} составили около 6 %.

Выводы по второй главе

5. Разработана схема и собран экспериментальный стенд для анализа особенностей испарения и характеристик деформации капель жидкости в газовой среде на базе панорамных оптических методов диагностики двухфазных газо- и парожидкостных потоков PIV и PPI.
6. Разработан новый подход к анализу макроскопических закономерностей фазовых превращений и деформации капель воды, движущихся в газовых и паровых средах при различных условиях теплообмена, отличающийся от известных применением оптических методов «трассерной» визуализации (PIV и PPI), кросскорреляционных видеокомплексов, а также импульсных твердотельных лазеров.
7. Циклы экспериментов с последовательным использованием скоростной (до 10^5 кадров в секунду) видеокамеры и кросскорреляционного видеокомплекса позволяют установить основные характеристики деформации капель жидкостей в газовой среде (форма и размеры капель, длительность и протяженность циклов деформации, времена перехода от одной формы к другой), фазовых превращений (скорости испарения капель и оттока паров с поверхности капель), смешения газового и паракапельного потоков (особенности перемещения капель воды и их разворот во встречном потоке высокотемпературных газов, влияние на интенсивность испарения капель их начальных размеров, температуры, скоростей движения в газовой среде, а также компонентного состава жидкости).
8. На базе анализа многочисленных публикаций с результатами экспериментальных исследований, основанных на применении методов PIV и PPI, разработаны рекомендации, а также установлены требуемые ограничения на использование предложенных оптических методов для разных условий теплообмена в системах «одионочная капля воды – газовая среда» и «капельный поток воды – газовая среда».
9. Проведена оценка достоверности результатов экспериментальных исследований.

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИИ КАПЕЛЬ ВОДЫ, ДВИЖУЩИХСЯ В ГАЗОВЫХ СРЕДАХ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ТЕПЛООБМЕНА

3.1. Определение основных характеристик процессов деформации капель жидкостей в газовых средах при различных условиях теплообмена

С использованием кросскорреляционной видеорегирующей аппаратуры выполнен цикл экспериментальных исследований [192, 193] по установлению основных особенностей деформации капель воды (характерные размеры 3–6 мм) при их движении в газовой среде с умеренными (0,5–5 м/с) скоростями при различных условиях теплообмена.

Выполненные эксперименты показали непрерывную деформацию капель воды (характеризуется циклическим изменением форм капель), несмотря на умеренные (менее 5 м/с) скорости их перемещения в газовой среде. Так, например, установлено, что капли могут принимать несколько десятков различных форм (сфера, эллипсоид, «блин» и другие конфигурации) при движении от дозатора *11* до уловителя *13* (рис. 2.2.1).

На рис. 3.1.1 представлены типичные для проведенных экспериментов изображения капель воды в пределах нескольких последовательных «циклов деформации» при движении в газовой среде в условиях умеренных температур. Установлено, что число индивидуальных форм капель с каждым последующим циклом уменьшается. Например, для первых циклов можно выделить около десяти индивидуальных форм (рис. 3.1.1), а при обработке видеogramм для десятого и последующих циклов число таких форм не превышает и пяти. Выявленный эффект обусловлен ростом скоростей движения капель в каждом последующем цикле и, как следствие, интенсификацией процесса деформации.

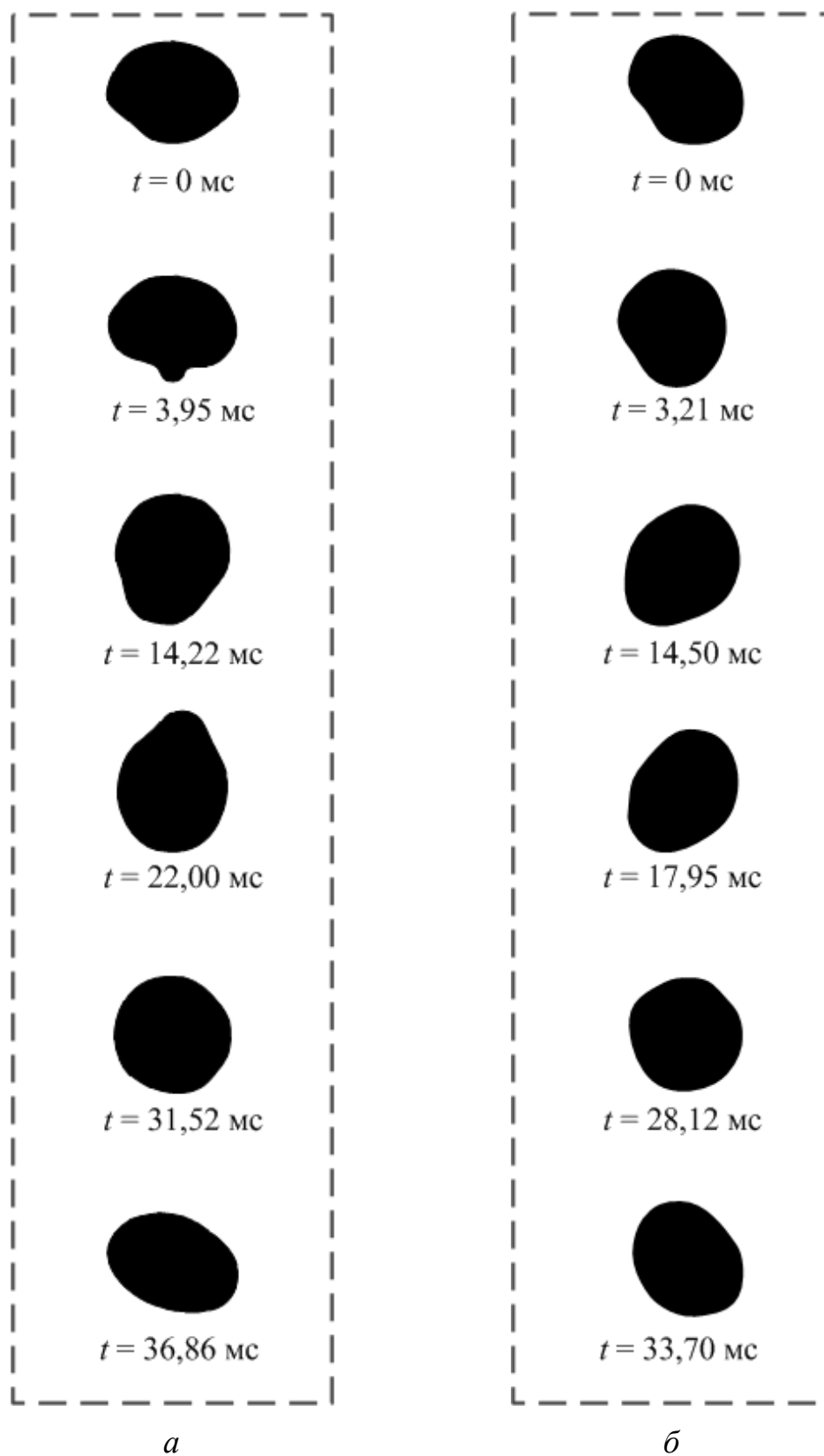


Рисунок 3.1.1. Изображения капель воды в первом (*a*) и третьем (*б*) «циклах деформации» при $d_0 \approx 5$ мм и $u_0 \approx 0,5$ м/с

Установленные устойчивые формы и характерное время первого «цикла деформации» капель воды с $d_0 \approx 5$ мм хорошо согласуются с результатами экспериментов [46]. Так, например, значения t_d в экспериментах [46] при идентичных начальных условиях составили около 38 мс при свободном падении (в проведенных опытах с каплями воды получено время $t_d \approx 36$ мс в первом цикле (рис. 3.1.1)). Анализ показывает, что установленные отличия t_d от данных экспериментов [46] могут быть вызваны как небольшим расхождением скоростей свободного падения капель в рамках исследованных первых циклов, так и существенно (практически на несколько порядков) отличающейся точностью регистрации параметров.

При обработке видеogramм выполненных экспериментов установлены два «режима деформации», отличающиеся последовательными формами капель (рис. 3.1.2). При реализации первого (рис. 3.1.2, а), капля из начального состояния, близкого к сферической, «сплющивается» и приобретает форму «блина», а затем вытягивается в направлении движения (далее эти формы циклически повторяются). Второй (рис. 3.1.2, б) режим можно назвать «вращательным» (зарегистрировано вращение капли в форме эллипсоида относительно своего центра масс в процессе движения).

Основной причиной реализации выявленных «режимов деформации» являются возможные варианты условий испускания капель жидкостей дозатором *11* (рис. 2.2.1) в проведенных экспериментах. При «идеальном» вертикальном испускании капель реализуется первый режим (рис. 3.1.2, а). При наличии даже небольшого отклонения (более 2°) угла наклона испускающего канала дозатора относительно нормали к основанию уловителя *13* реализуется второй режим (рис. 3.1.2, б). Кроме того, установлено, что при повышении давления в емкости *9* (рис. 2.2.1) и интенсификации подачи капель дозатором *11* до частоты более 1 капли в секунду во всех опытах капли приобретают формы в соответствии со вторым «режимом деформации». Так как в реальной практике капли в различных технологических процессах и приложениях (например, полидисперсные

капельные потоки тушащих жидкостей [119, 194, 195], газопарокапельные теплоносители [52, 115], газопарожидкостные смеси для размораживания сыпучих сред [117, 118]) испускаются, как правило, хаотично и достаточно интенсивно, то второй режим (рис. 3.1.2, б) должен реализовываться существенно чаще.

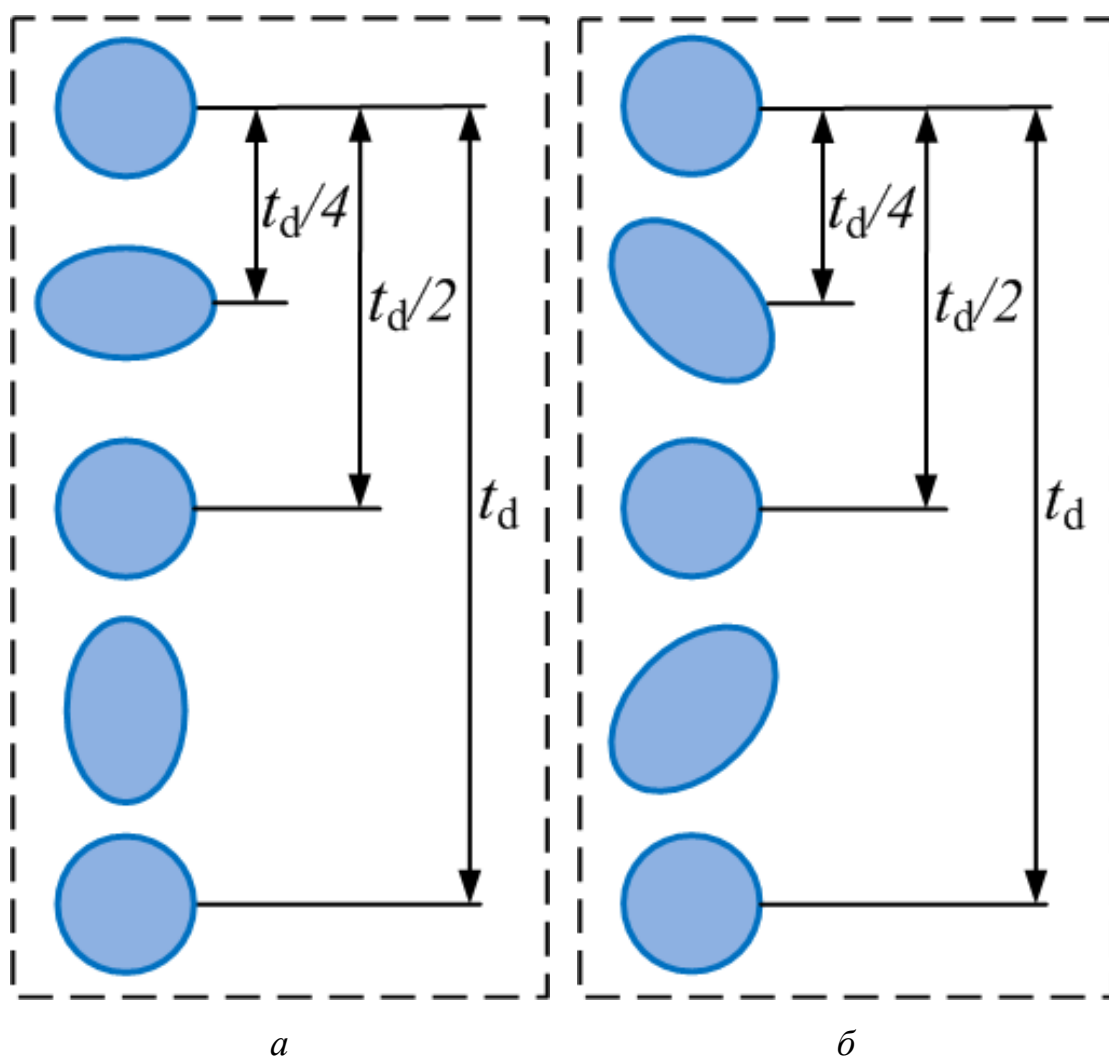


Рисунок 3.1.2. Условные изображения капель жидкости при реализации первого (а) и второго (б) «режимов деформации»

На рис. 3.1.3 и 3.1.4 приведены значения характерных времен t_d «деформационных циклов» в зависимости от размеров d_0 и скоростей u движения капель воды при реализации второго «деформационного режима». Установлено,

что при реализации любого из «режимов деформации» характерные времена «деформационных циклов» t_d изменяются с ростом размеров и скоростей движения капель.

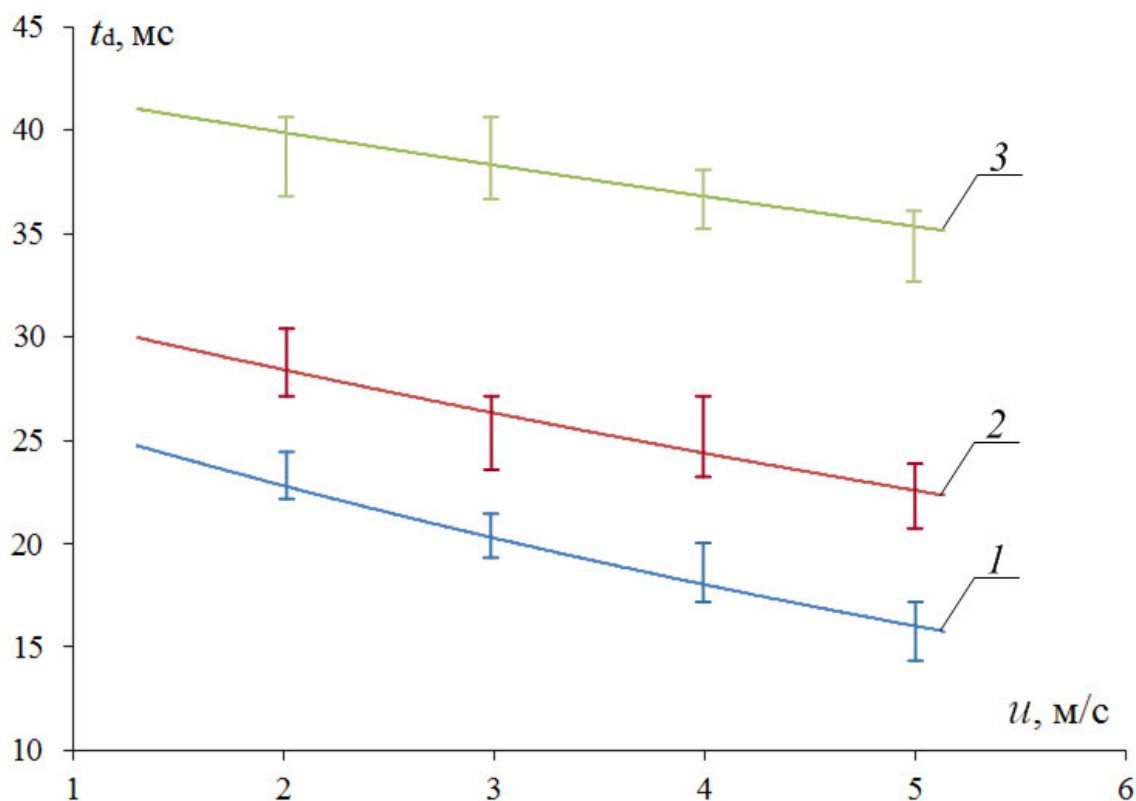


Рисунок 3.1.3. Зависимости времен t_d от скоростей капель при различных значениях d_0 : 1 – для $d_0 \approx 3,4$ мм; 2 – для $d_0 \approx 4,6$ мм; 3 – для $d_0 \approx 5,8$ мм

Так, при $u \approx 1$ м/с, $d_0 \approx 3$ мм времена t_d составляют около 0,025 с. С ростом u до 5 м/с ($d_0 \approx 3$ мм) значения t_d уменьшаются до 0,015 с. При повышении d_0 до 6 мм значения t_d увеличиваются (при $u \approx 1$ м/с они составляют около 0,045 с, а при $u \approx 5$ м/с – снижаются до 0,038 с). Этот результат можно объяснить тем, что при увеличении скоростей движения капель возрастает действие сил поверхностного трения и сопротивления. Эти силы сопоставимы с силами поверхностного натяжения (в экспериментах числа Вебера We не превышали 7). Как следствие, несмотря на рост значений скоростей капель, на видеogramмах не зафиксированы эффекты дробления капель. Возрастание массовых и инерционных сил,

действующих на каплю, приводит только к интенсификации процессов ее деформации. Это, в свою очередь вызывает снижение характерных времен t_d . Увеличение же размеров капель приводит к росту их массы и, как следствие, замедляет процессы изменения формы – времена t_d повышаются.

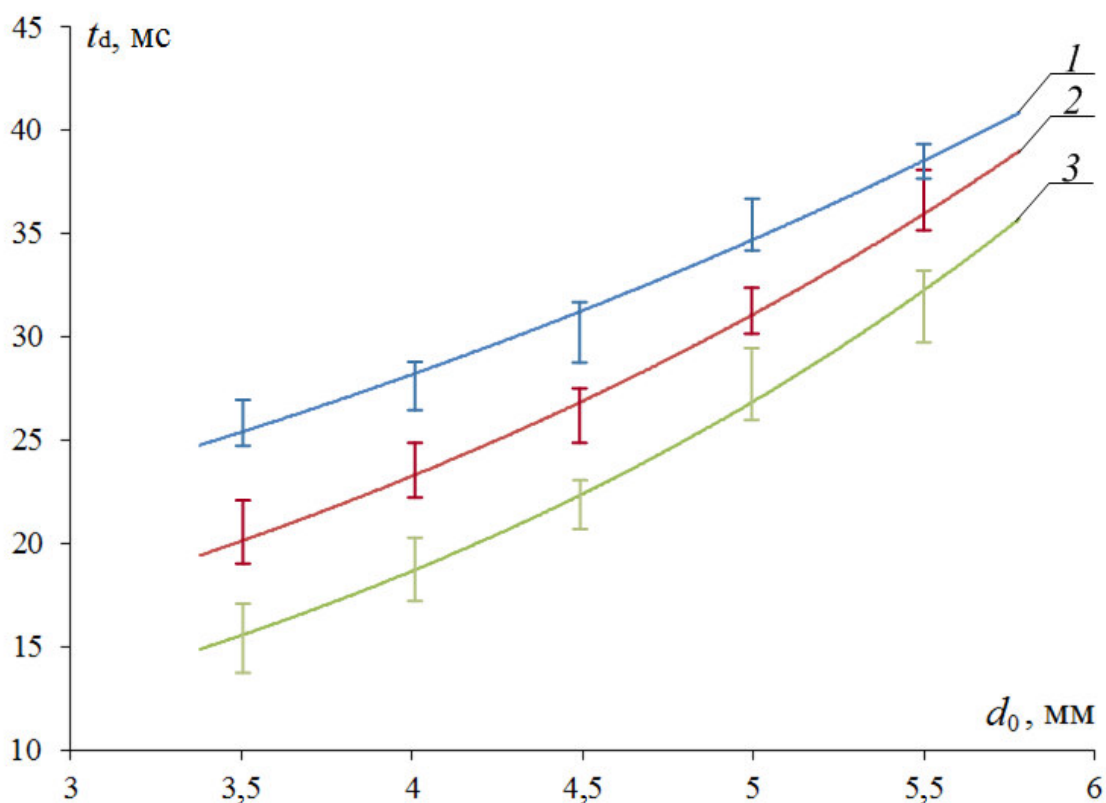


Рисунок 3.1.4. Зависимости времен t_d от размеров капель при различных значениях u : 1 – для $u \approx 1,3$ м/с; 2 – для $u \approx 2,9$ м/с; 3 – для $u \approx 4,7$ м/с

Зафиксировано некоторое различие в численных значениях между временами t_d «деформационных циклов» при реализации установленных «деформационных режимов». Анализ видеogramм проведенных экспериментов позволил установить, что характерные времена «деформационных циклов» t_d в рамках второго режима превышают аналогичный показатель для первого «режима деформации» на 10–15 % (при идентичных условиях). Выявленная особенность обусловлена различием масштабов действия сил сопротивления капель в формах, соответствующих исследуемым режимам. В [196] показано, что эти силы максимальны для капель в

форме «блинов» и минимальны для сфер. Для второго «режима деформации» наиболее типичной можно считать форму эллипсоида (рис. 3.1.2, б), вращающегося относительно своего центра масс. Для таких форм силы сопротивления имеют средние значения относительно сфер и «блинов». Так как средняя площадь поверхности капли, на которую направлены основные силы сопротивления, больше для второго (рис. 3.1.2, б) режима по сравнению с первым (рис. 3.1.2, а), то и характерные времена t_d превышают аналогичные параметры для первого режима.

При обработке результатов выполненных экспериментов получены аппроксимационные выражения, описывающие зависимости времен t_d от скоростей и размеров капель воды:

$$t_d = 0,0136 \cdot \exp(0,1932 \cdot d_0) \text{ при } u \approx 1 \text{ м/с, } 3 < d_0 < 6 \text{ мм;} \quad (3.1.1)$$

$$t_d = 0,0071 \cdot \exp(0,2905 \cdot d_0) \text{ при } u \approx 3 \text{ м/с, } 3 < d_0 < 6 \text{ мм;} \quad (3.1.2)$$

$$t_d = 0,0039 \cdot \exp(0,3752 \cdot d_0) \text{ при } u \approx 5 \text{ м/с, } 3 < d_0 < 6 \text{ мм;} \quad (3.1.3)$$

$$t_d = 0,0301 \cdot \exp(-0,11 \cdot u) \text{ при } d_0 \approx 4 \text{ мм, } 1 < u < 5 \text{ м/с;} \quad (3.1.4)$$

$$t_d = 0,0384 \cdot \exp(-0,073 \cdot u) \text{ при } d_0 \approx 5 \text{ мм, } 1 < u < 5 \text{ м/с;} \quad (3.1.5)$$

$$t_d = 0,0456 \cdot \exp(-0,045 \cdot u) \text{ при } d_0 \approx 6 \text{ мм, } 1 < u < 5 \text{ м/с.} \quad (3.1.6)$$

При анализе изменений форм капель в пределах каждого «цикла деформации» установлена закономерность, заключающаяся в различиях интервалов времени перехода от сферических форм к эллипсоидальным (и наоборот). Данная закономерность характерна как переходам к формам эллипсоидов, вытянутых в направлении движения капель, так и в поперечном направлении. Например, на рис. 3.1.5 представлены интервалы времени (Δt) между характерными формами (показаны условно) капли воды размером $d_0 \approx 5$ мм в одном из типичных «циклов деформации» (приведены результаты пяти экспериментов при идентичных условиях). Параметр n_d характеризует порядковый номер формы капли в цикле.

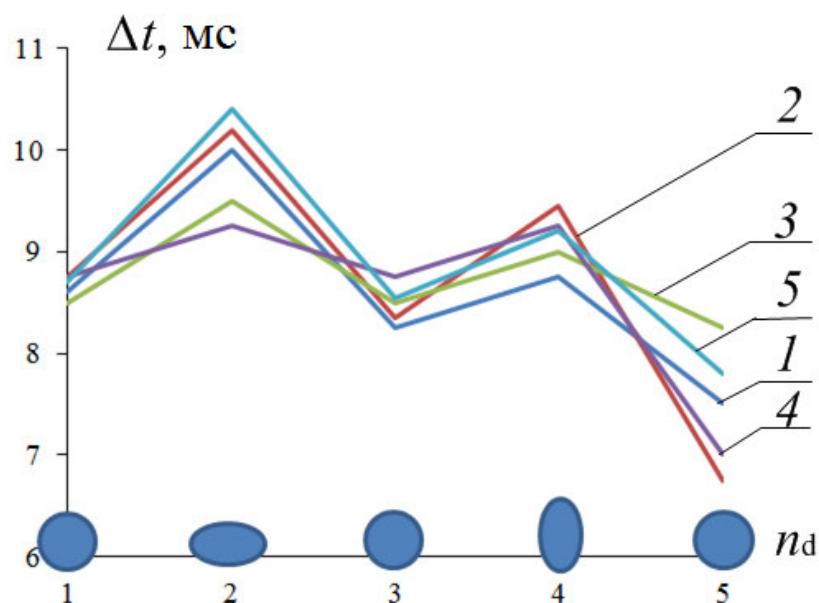


Рисунок 3.1.5. Интервалы времени между характерными формами капель воды в пределах четвертого «цикла деформации» при $u \approx 3$ м/с и $d_0 \approx 5$ мм (1–5 – порядковые номера экспериментов)

Видно (рис. 3.1.5), что времена переходов от сферических капель к эллипсоидальным на 18–30 % больше, чем времена, характеризующие обратные переходы. Можно сделать вывод о том, что капли приобретают форму эллипсоида за более длительный интервал времени по сравнению со сферами. Выявленный эффект обусловлен соответствующим действием массовых и инерционных сил. Известно [196–199], что силы сопротивления, действующие на капли или твердые частицы сферической формы при их движении в газовых средах, меньше, чем при «эллипсоподобных» конфигурациях капель и частиц. Как следствие, «торможение» газовой средой капель в форме эллипсоидов происходит интенсивнее, чем сфер. Это приводит к ослаблению эффекта ускорения движения капель под действием силы тяжести и росту Δt для перехода «сфера – эллипсоид». При обратном переходе сила сопротивления несколько снижается, и капля ускоряется – время Δt уменьшается. С увеличением числа пройденных «циклов деформации» установленная закономерность сохраняется. Однако интервалы времени Δt существенно снижаются, как и, в целом, значения t_d . Аналогичные

выводы можно сделать для всех трех исследованных жидкостей (воды, этилового спирта и керосина).

Для оценки влияния на характеристики процессов деформации капель физических и термодинамических свойств самой жидкости был проведен ряд аналогичных экспериментов, в которых в качестве рабочей жидкости использовались поочередно керосин и этиловый спирт. Так, например, для капель керосина выявлено, что при $u \approx 1$ м/с и $d_0 \approx 3$ мм времена t_d составляют около 23 мс. С ростом u до 5 м/с ($d_0 \approx 3$ мм) продолжительности циклов уменьшаются и не превышают 18 мс. При увеличении d_0 до 4 мм значения t_d возрастают (при $u \approx 1$ м/с они составляют около 35 мс, а при $u \approx 5$ м/с снижаются до 24 мс). Характер влияния скоростей движения на условия деформации капель этилового спирта аналогичен. На рис. 3.1.6 приведены зависимости времен «деформационных циклов» от начальных размеров капель рассматриваемых жидкостей в условиях умеренных температур.

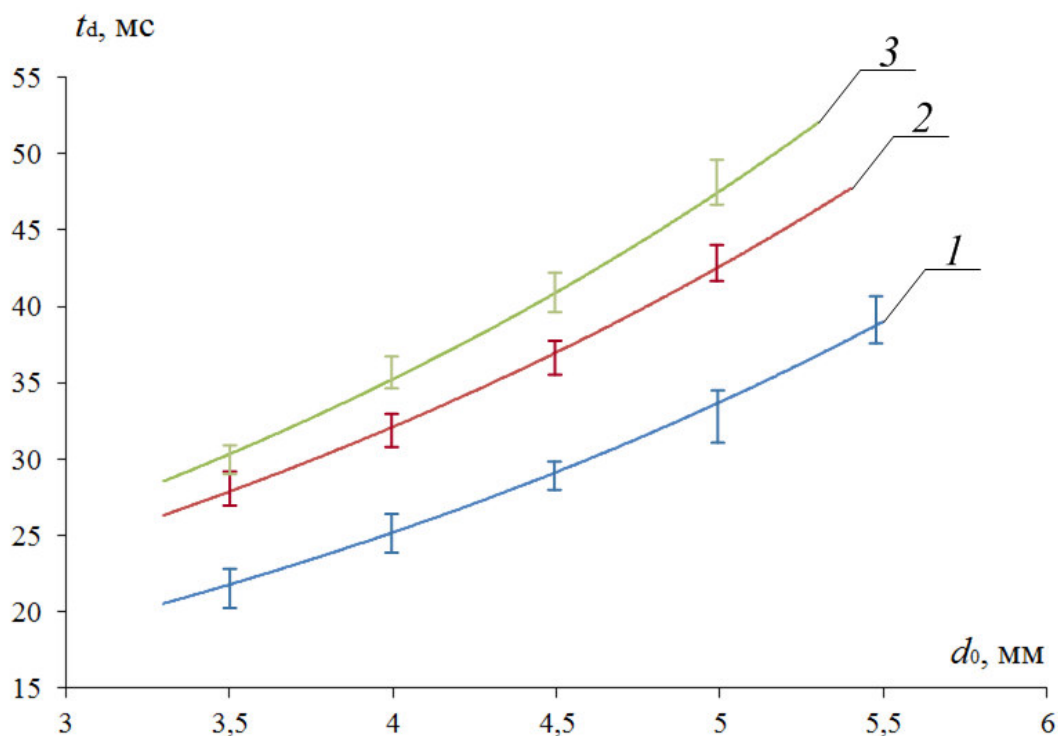
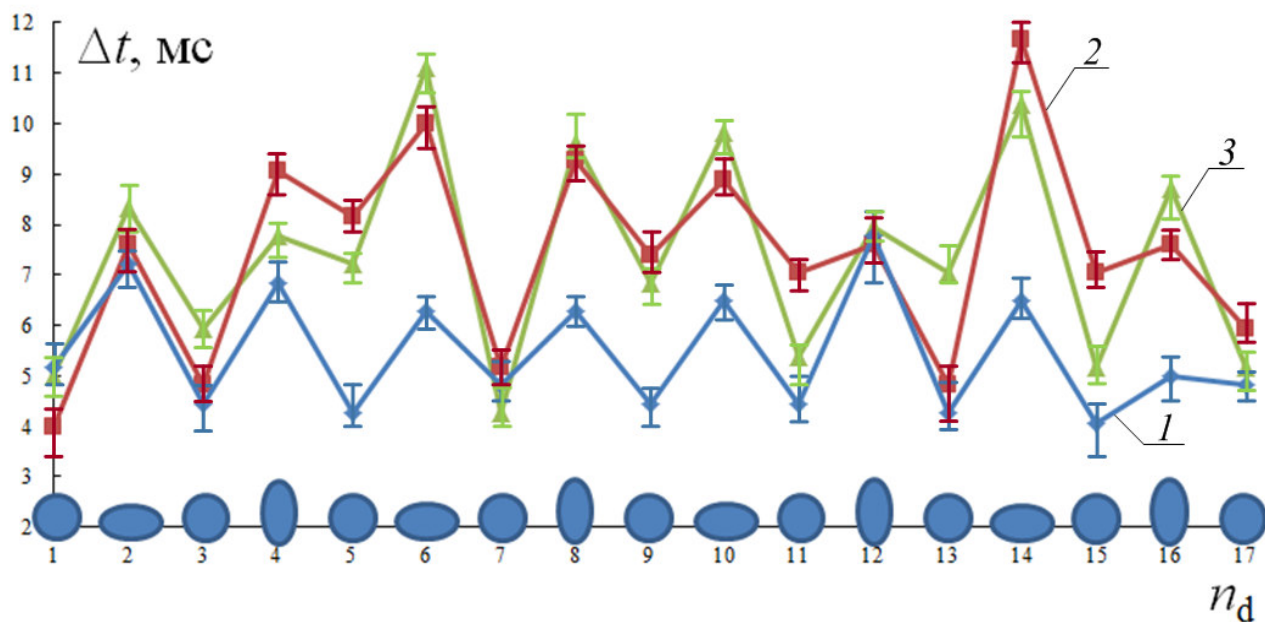
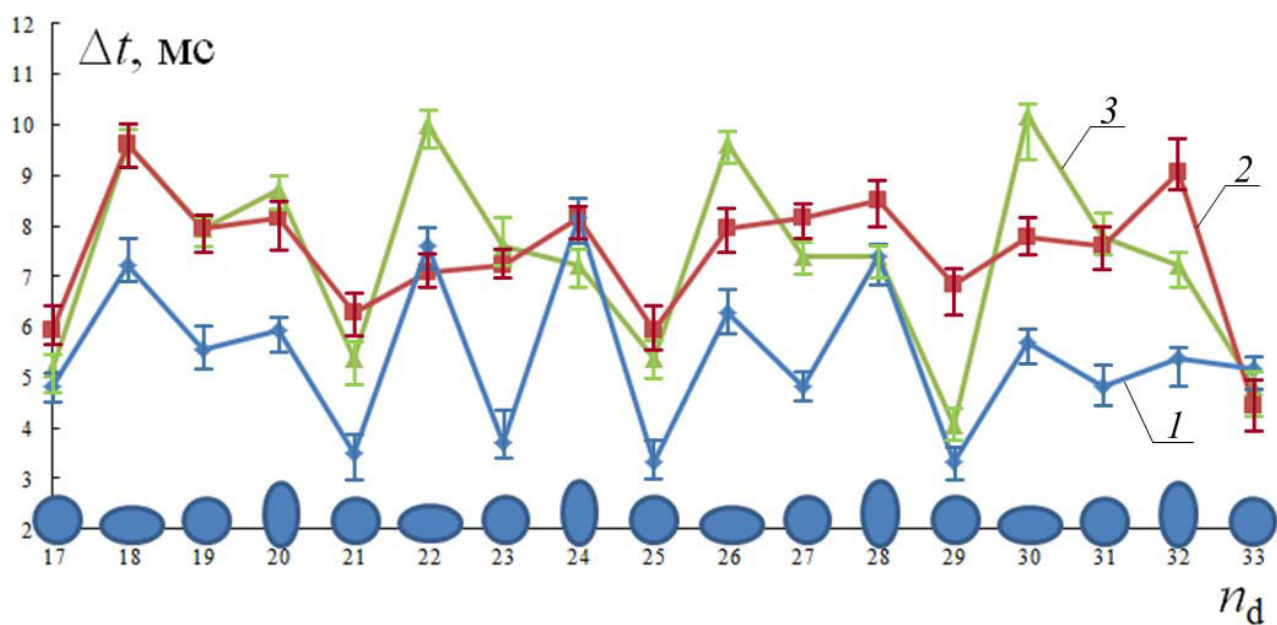


Рисунок 3.1.6. Зависимости времен t_d от размеров капель при $u \approx 2$ м/с: 1 – вода, 2 – керосин, 3 – этиловый спирт

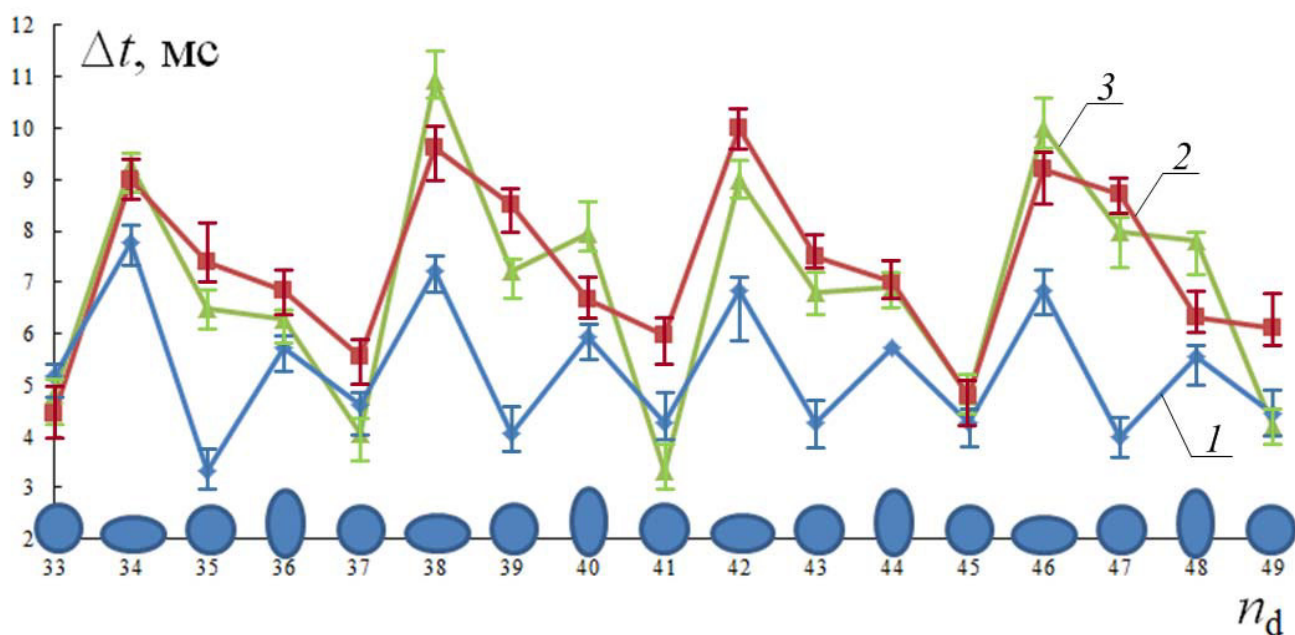
На рис. 3.1.7 представлены характерные времена переходов от одной формы каплей исследованных жидкостей к другой в рамках нескольких последовательных «циклов деформации».



a



б



в

Рисунок 3.1.7. Характерные времена переходов от одной формы каплей воды (1), керосина (2) и этилового спирта (3) к другой при прохождении ими в воздухе расстояния 1 м ($d_0 \approx 4$ мм и $u_0 \approx 0,5$ м/с): а – «начальный участок», б – «срединный участок», в – «конечный участок»

Кроме того, в ходе анализа полученных результатов в качестве функций цели при обработке видеogramм экспериментов помимо характерных времен t_d приняты еще 3 параметра, характеризующие изменение размеров каплей в процессе движения: d_x – максимальный поперечный (относительно направления движения) размер капли, мм; d_y – максимальный продольный размер капли, мм; d_{\max} – абсолютный максимальный размер капли, мм. При этом вычислялись изменения d_x , d_y и d_{\max} относительно значения d_0 :

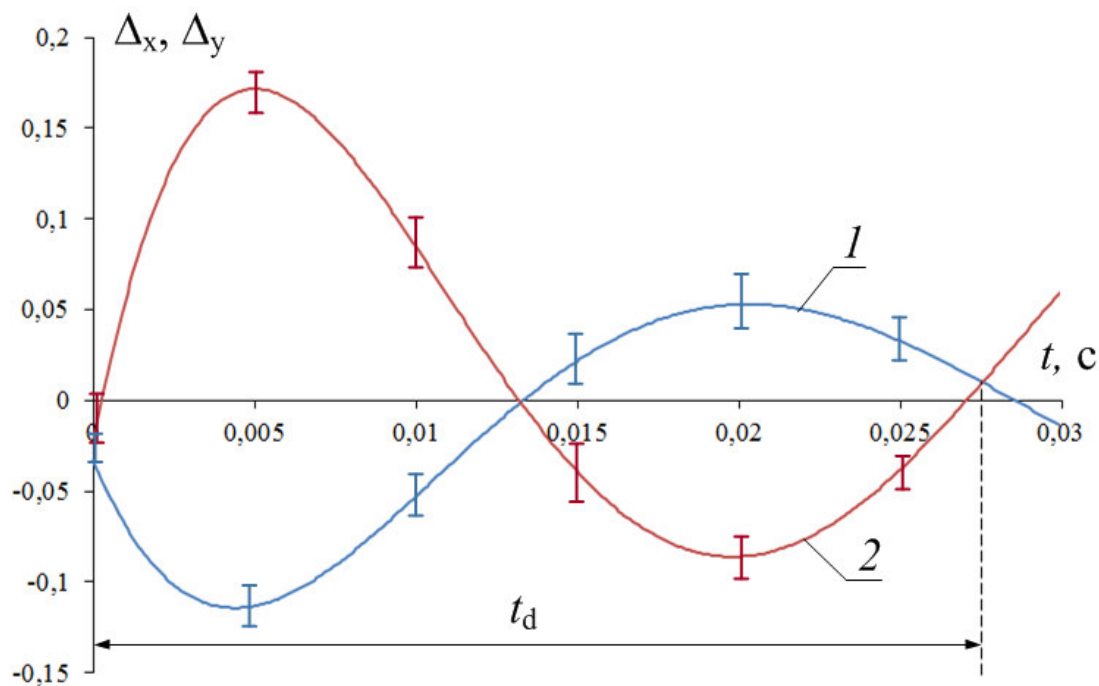
$$\Delta_x = (d_x - d_0) / d_0,$$

$$\Delta_y = (d_y - d_0) / d_0,$$

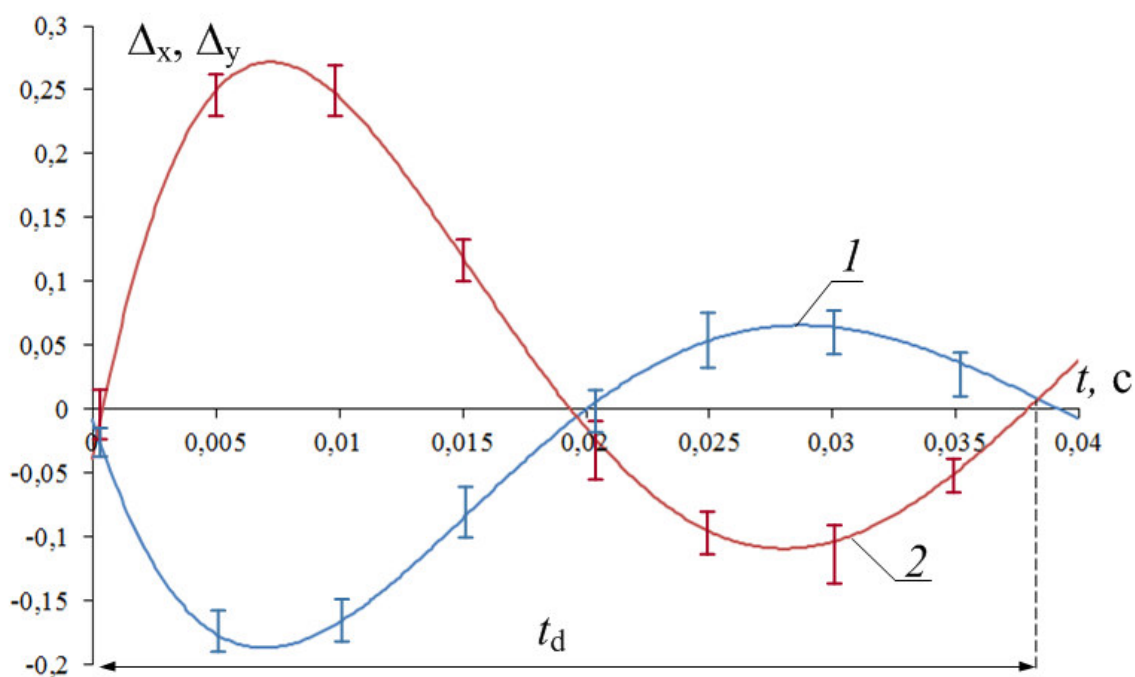
$$\Delta_{\max} = (d_{\max} - d_0) / d_0.$$

На рис. 3.1.8 и 3.1.9 представлены типичные для проведенных экспериментов значения амплитуд Δ_x , Δ_y и Δ_{\max} в пределах одного «цикла деформации» каплей исследованных жидкостей. В первую очередь следует

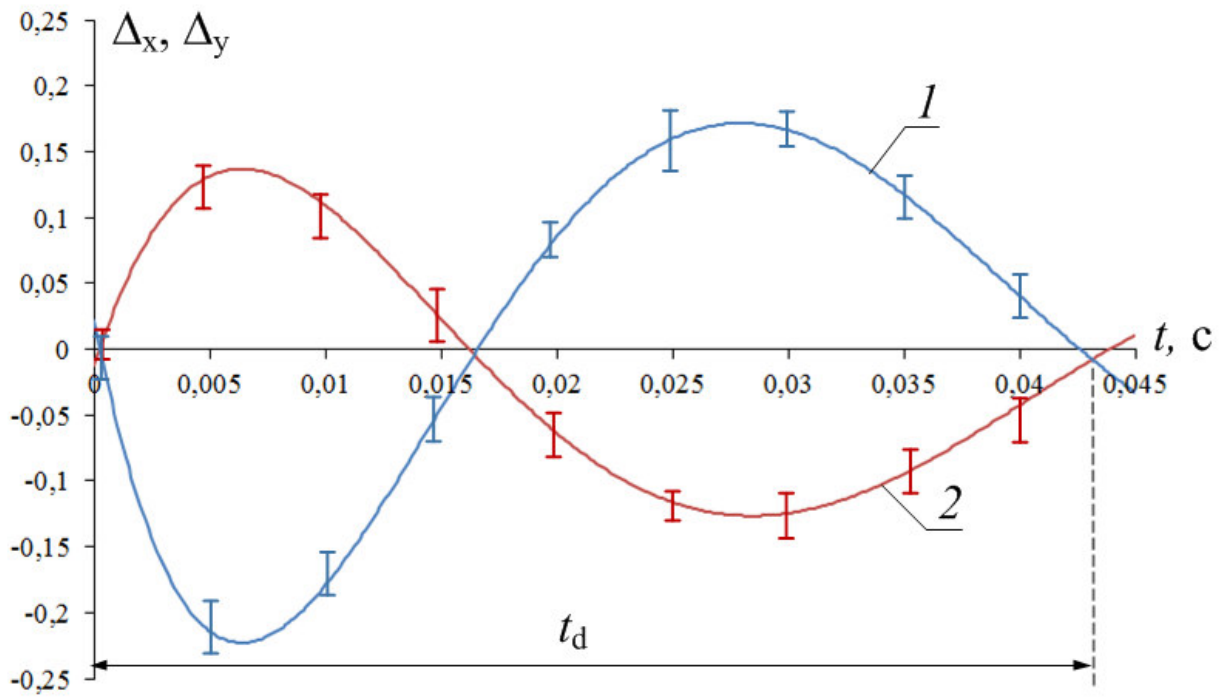
отметить асимметричный характер трансформации поверхности капле ($\Delta_x \neq \Delta_y$) – реализуется пространственная (трехмерная) деформация. Этот результат позволяет объяснить довольно большое число индивидуальных форм капель в зарегистрированных циклах (рис. 3.1.1).



a

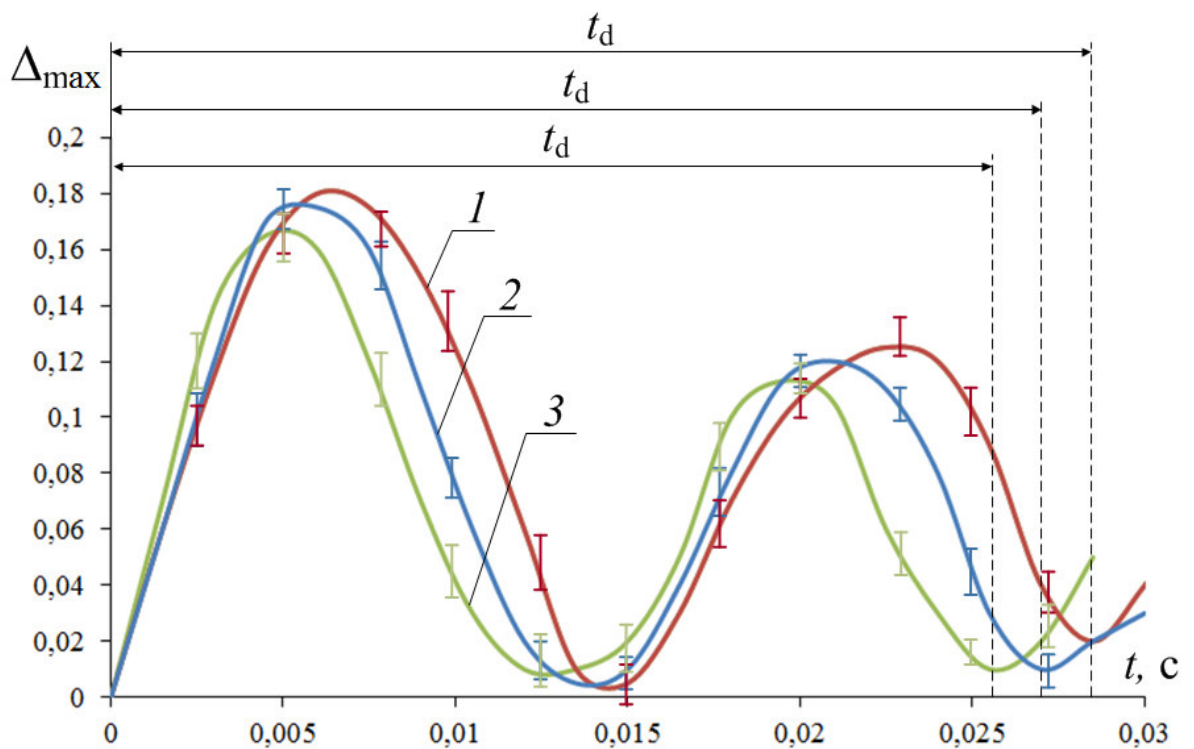


б



v

Рисунок 3.1.8. Значения Δ_x (1) и Δ_y (2) в первом «цикле деформации» каплей жидкостей при $d_0 \approx 4,5$ мм и $u_0 \approx 1$ м/с: *a* – вода, *b* – керосин, *v* – этиловый спирт



a

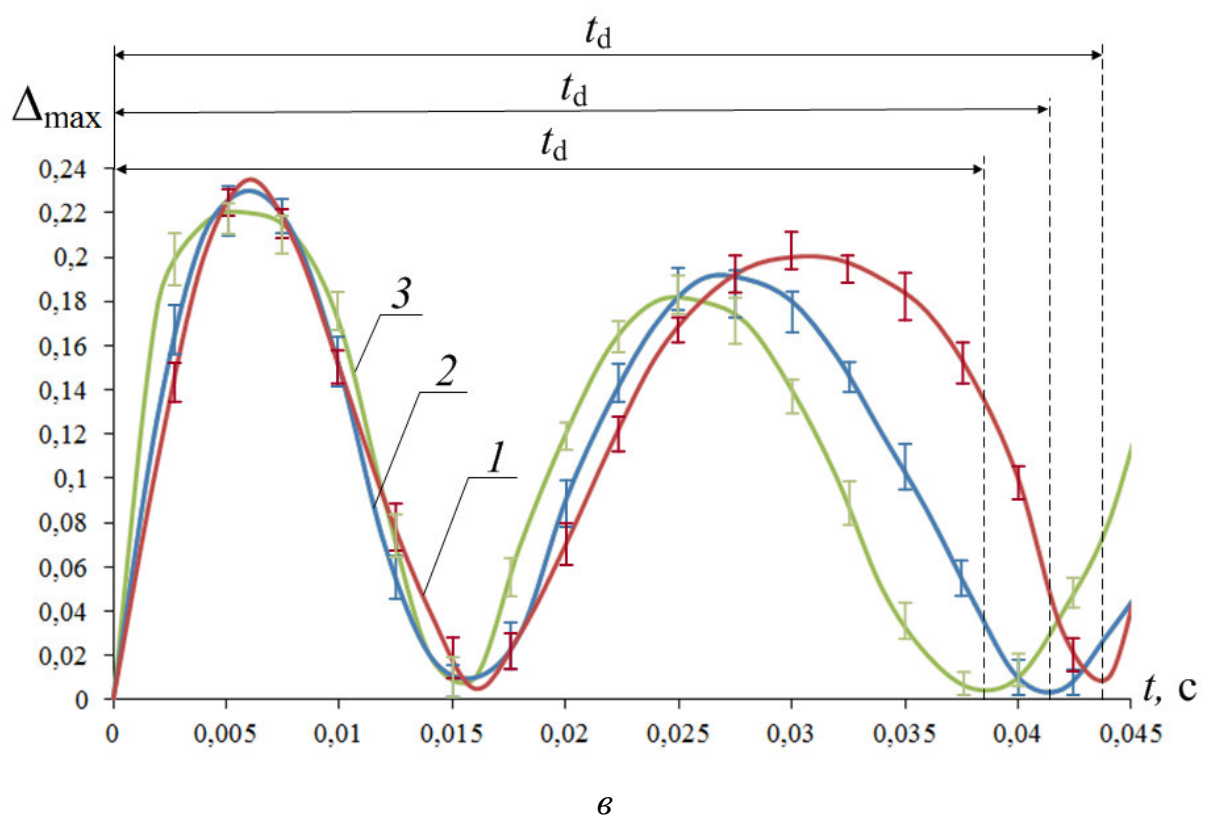
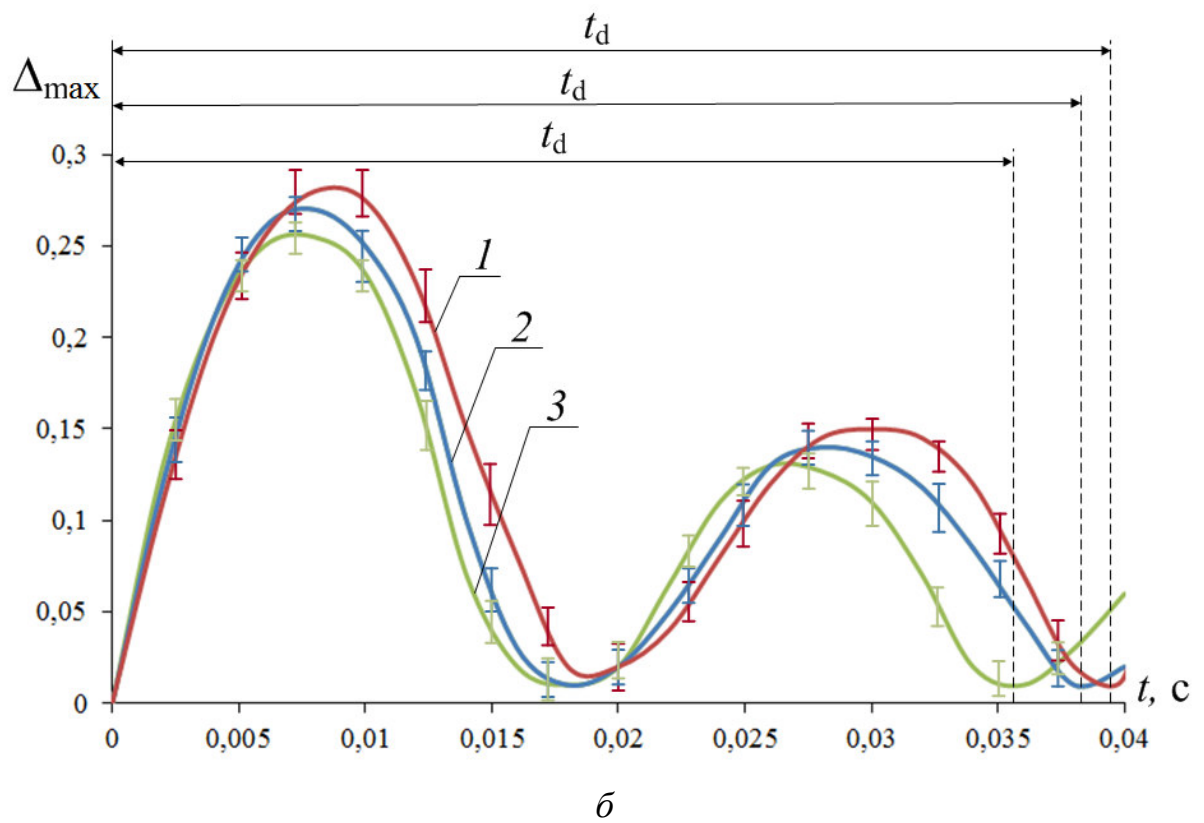


Рисунок 3.1.9. Значения Δ_{\max} в первом (1), третьем (2) и пятом (3) «циклах деформации» капель жидкостей при $d_0 \approx 5$ мм и $u_0 \approx 0,5$ м/с: а – вода, б – керосин, в – этиловый спирт

Установленные эффекты, связанные с выполнением условия $\Delta_x \neq \Delta_y$, позволяют объяснить колебательный характер снижения времен перехода от одной формы капель к другой на рис. 3.1.7. При этом из анализа изменения амплитуд Δ_x , Δ_y и Δ_{\max} в пределах группы последовательных «циклов деформации» можно сделать вывод о том, что при реализации второго «режима деформации» роль асимметрии более значима (вследствие вращения капли) в отношении изменения параметра t_d .

На рис. 3.1.8 и 3.1.9 также видно, что амплитуды процессов деформации исследованных жидкостей (вода, керосин, этиловый спирт) довольно значительно отличаются. Параметр Δ_{\max} (рис. 3.1.9) для воды достигал величины 0,2, керосина – 0,28, этилового спирта – 0,24.

Выполненные эксперименты также показали, что с ростом скоростей движения капель (как следствие, числа пройденных «циклов деформации») значения Δ_x , Δ_y и Δ_{\max} возрастают. При увеличении же начальных размеров значения Δ_x , Δ_y и Δ_{\max} несколько снижаются вследствие возрастания массы капель и замедления процесса их деформации в целом.

Установленные при обработке результатов экспериментов отличия основных характеристик (Δ_x , Δ_y , Δ_{\max} , t_d) «деформационных циклов» (рис. 3.1.6 – 3.1.9) для капель воды, керосина и этилового спирта при идентичных скоростях движения и размерах капель обусловлены различием [200-202] физических свойств этих жидкостей (в частности, динамической вязкости μ , плотности ρ и поверхностного натяжения σ). Так, например, установлено, что значения t_d и l_d для капель керосина и этилового спирта отличаются не более, чем на 5 %. В тоже время можно отметить, что времена t_d для керосина ниже и, как следствие, значения l_d больше, чем для этилового спирта во всех экспериментах (т.е. можно сделать вывод о некоторой закономерности). Вязкости и плотности этих жидкостей довольно близки (отличия 4–7 %). Небольшое снижение t_d для капель керосина по сравнению с этиловым спиртом можно объяснить тем, что спирт имеет коэффициент поверхностного натяжения σ на 17–25 % больше, чем у

керосина. Для воды параметр σ в два–три раза превышает значения σ керосина и этилового спирта. Как следствие, времена t_d в экспериментах с водой существенно меньше, чем значения t_d для капель спирта и керосина при идентичных условиях (рис. 3.1.6).

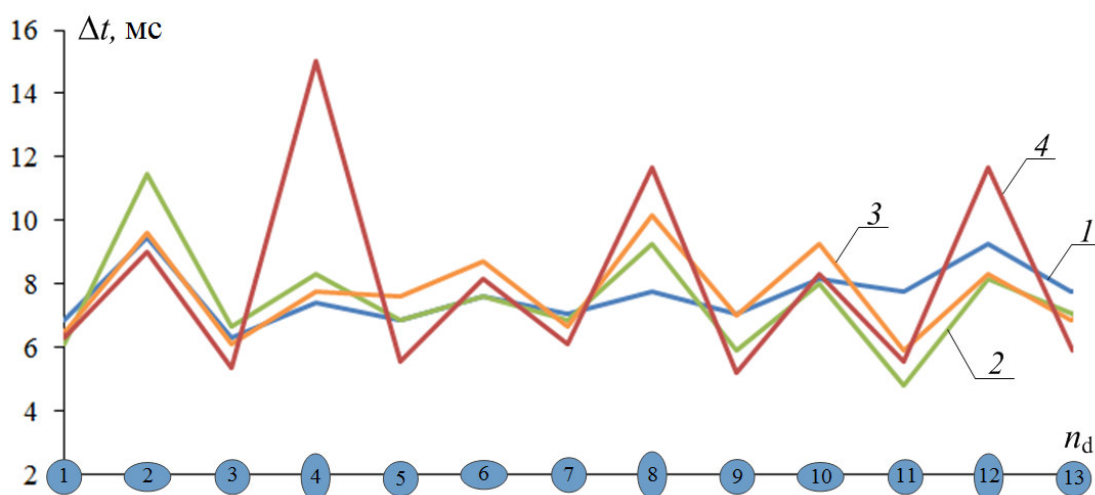
При сравнении амплитуд деформации капель рассматриваемых трех жидкостей (рис. 3.1.8, 3.1.9) также можно сделать вывод о довольно близких значениях Δ_x , Δ_y и Δ_{\max} для керосина и спирта, а также меньших по сравнению с этими жидкостями значениях амплитуд деформации водяных капель. Установленная закономерность также обусловлена кратно большими значениями σ воды по сравнению со спиртом и керосином [200-202].

Достаточно умеренное влияние вязкости и плотности жидкостей на характерные времена «циклов деформации» было установлено в экспериментах [46] с водоглицериновыми каплями (плотность изменялась в 1,5 раза, а вязкость на несколько порядков за счет повышения массовой концентрации частиц глицерина в каплях воды). Поэтому, исходя из анализа результатов выполненных исследований и данных [203], можно сделать вывод о том, что определяющую роль в процессе деформации капель играют силы поверхностного натяжения жидкости.

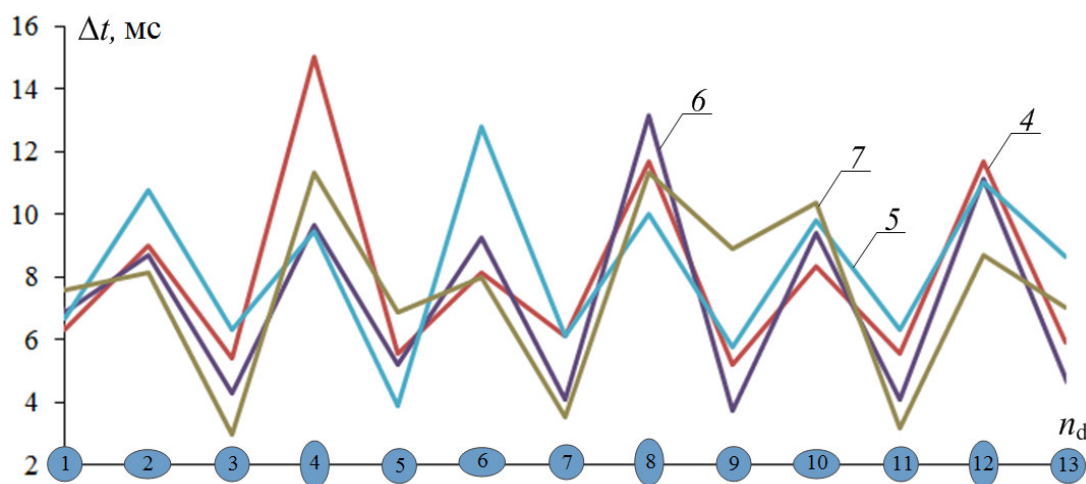
На рис. 3.1.10 приведены характерные времена переходов Δt от одной формы капель к другой (представлены условные изображения капель) для разных температур в системе «капля воды – газовая среда».

Переходы от сферической формы капель к эллипсоидальной довольно существенно отличаются (особенно если сравнивать времена переходов «сфера – эллипсоид» и «эллипсоид – сфера») при различных температурах (рис. 3.1.10). Причины соответствующих отличий связаны с различным действием сил сопротивления для рассматриваемых форм капель. Для эллипсоидальных форм эти силы кратно выше, чем для сфер. При возрастании площади поверхности капель силы сопротивления увеличиваются. Поэтому движение капель в форме эллипсоидов, вытянутых в направлении, поперечном относительно движения

капель, существенно интенсивнее замедляется внешней газовой средой. Это приводит к росту времен перехода «сфера – эллипсоид» (рис. 3.1.10). Обратный переход характеризуется меньшими временами вследствие снижения силы сопротивления. Следует отметить, что установленная особенность характерна всем рассмотренным температурам в системе «капля воды – газовая среда» (рис. 3.1.10).



а



б

Рисунок 3.1.10. Аппроксимационные значения экспериментальных времен переходов от одной формы каплей ($d_0 \approx 5,3$ мм) к другой при различных начальных температурах газов и воды (n_d – последовательный номер характерной формы каплей): 1 – $T_g=300$ К, $T_w=298$ К; 2 – $T_g=300$ К, $T_w=313$ К; 3 – $T_g=300$ К, $T_w=333$ К; 4 – $T_g=300$ К, $T_w=363$ К; 5 – $T_g=285$ К, $T_w=363$ К; 6 – $T_g=1100$ К, $T_w=363$ К; 7 – $T_g=1100$ К, $T_w=298$ К

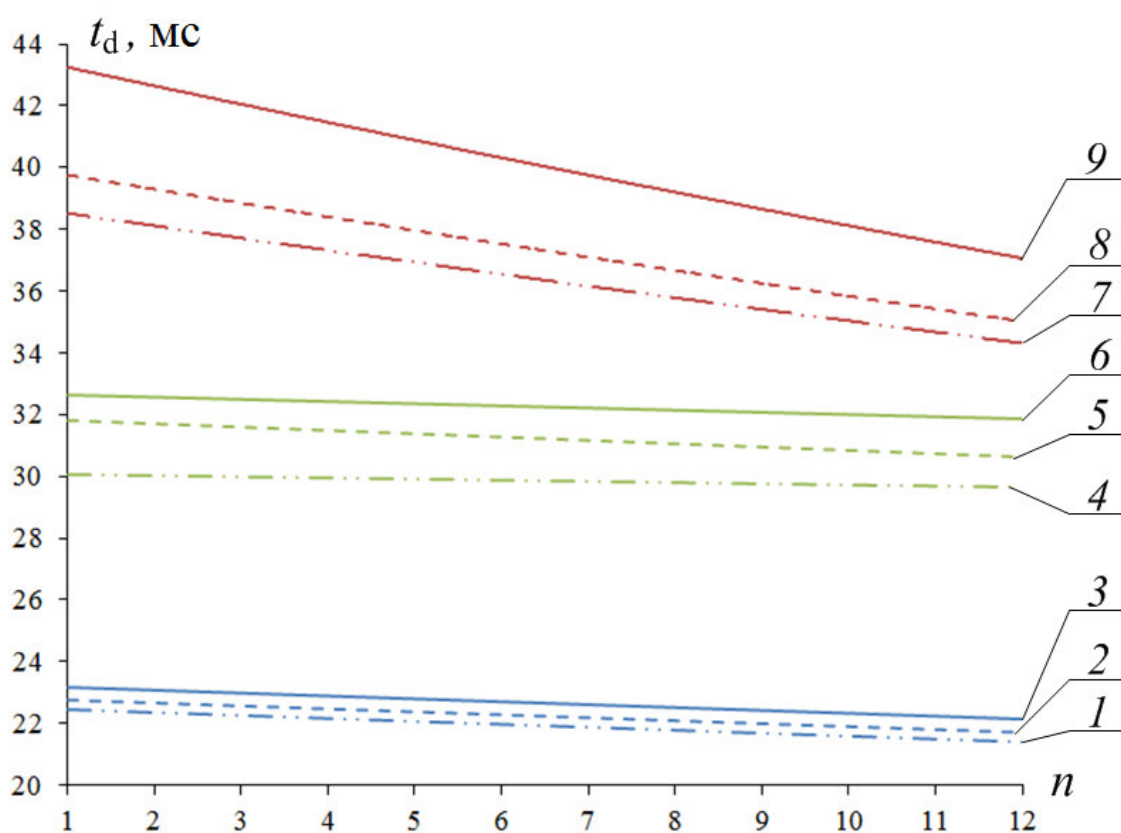
Зависимости, приведенные на рис. 3.1.10, также позволяют оценить характерные времена существования капель в той или иной форме в процессе перемещения через газовые среды. Так, например, если включить до 4–6 % времен перехода к временам нахождения капли в соответствующей форме, то можно сделать вывод о том, что капли принимают сферическую форму не более 15 % времени каждого «цикла деформации». Времена сохранения каплями форм эллипсоидов, вытянутых в продольном и поперечном направлениях, составили 18–20 % и 9–12 %. Около половины времени каждого характерного «цикла деформации» капли имеют «переходные» (относительно условных, представленных на рис. 3.1.2) формы. Этот результат позволяет сделать вывод о правомерности выбора при численном исследовании процессов движения капель жидкостей в газовых средах (например, [143, 146, 149]) моделей капель в форме сферы, эллипсоида и любых других конфигураций. При этом представляется целесообразным, исходя из полученных экспериментальных результатов, учитывать непрерывное изменение конфигураций капель [154, 155]. Это, в первом приближении, можно сделать при учете изменения коэффициента сопротивления движению капель c_χ . Для каждой из известных конфигураций капель значения c_χ установлены [196].

Повышение температуры капель воды T_w и внешней газовой среды T_g приводит к увеличению характерных времен переходов от одной формы капель к другой (рис. 3.1.10). При этом можно отметить более существенное влияние T_w по сравнению с T_g . Этот результат хорошо согласуется с данными экспериментов [204, 205], в которых показано, что увеличение начальной температуры капель воды (в диапазоне от 300 К до 360 К) перед вхождением в высокотемпературную газовую среду приводит к значительному (нередко даже кратному) увеличению скоростей испарения. Это обусловлено нелинейной зависимостью [79, 86, 122, 131] скорости парообразования от температуры поверхности капли жидкости. Установленная закономерность иллюстрирует существенное влияние фазовых превращений на характеристики процесса деформации капель. При

интенсификации фазовых превращений в малой окрестности капле формируются паровые «буферные» зоны, которые увеличивают действие сил сопротивления движению (усиливается «торможение» капле и замедляется прирост скоростей перемещения последних под действием гравитационных сил). Это приводит к возрастанию характерных длительностей установленных «циклов деформации» и уменьшению протяженностей (рис. 3.1.11).

Выполненные эксперименты показали, что с ростом числа пройденных «циклов деформации» влияние температур T_w и T_g на t_d и l_d усиливается. Это обусловлено изменяющейся в процессе движения капле скоростью u и, как следствие, усилением влияния рассматриваемых эффектов.

Важно отметить, что с повышением начальных размеров капле влияние температур T_w и T_g на t_d и l_d усиливается (рис. 3.1.11). Очевидно, что это обусловлено инерционностью прогрева капле. С ростом d_0 инерционность прогрева капле нелинейно возрастает [143, 146, 149].



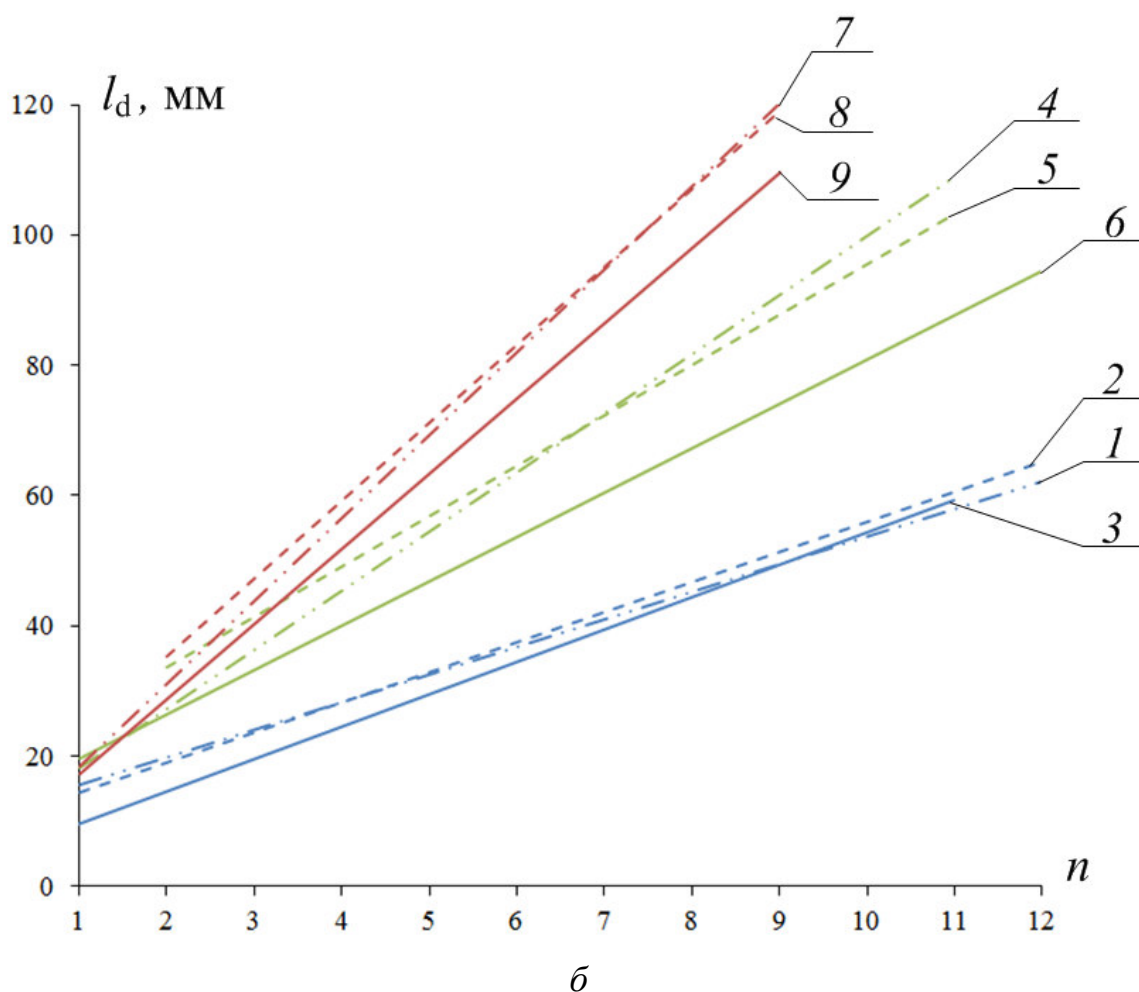
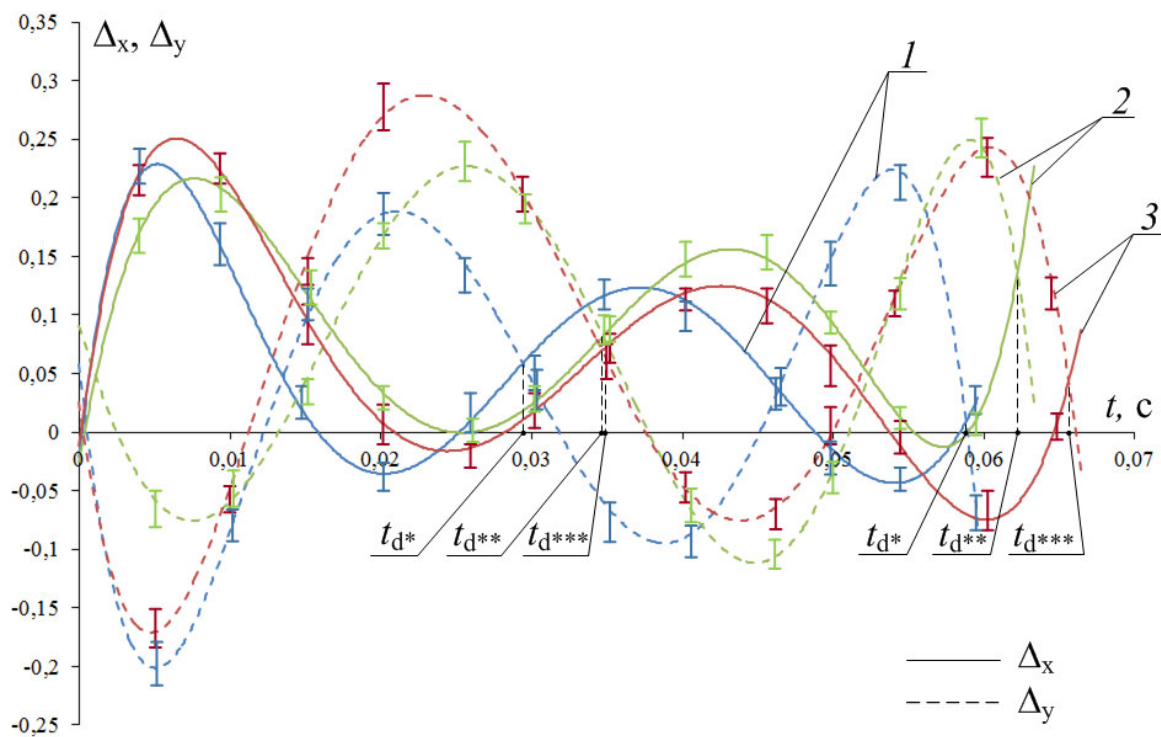
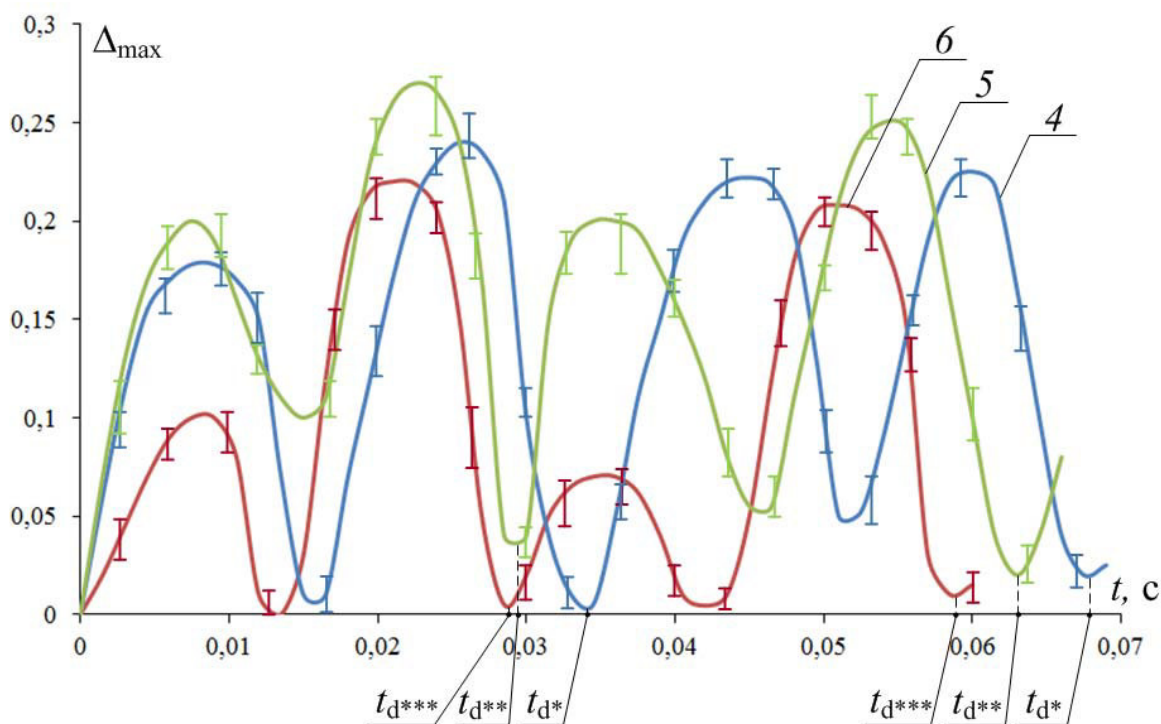


Рисунок 3.1.11. Аппроксимационные значения экспериментальных времен «циклов деформации» (*a*) и их протяженностей (*б*) при разных начальных размерах и температурах капель воды (*n* – номер «цикла деформации»): 1 – $d_0=4,3$ мм, $T_w=298$ К; 2 – $d_0=4,3$ мм, $T_w=313$ К; 3 – $d_0=4,3$ мм, $T_w=363$ К; 4 – $d_0=5,2$ мм, $T_w=298$ К; 5 – $d_0=5,2$ мм, $T_w=313$ К; 6 – $d_0=5,2$ мм, $T_w=363$ К; 7 – $d_0=5,8$ мм, $T_w=298$ К; 8 – $d_0=5,8$ мм, $T_w=313$ К; 9 – $d_0=5,8$ мм, $T_w=363$ К

На рис. 3.1.12 приведены характерные амплитуды деформации капель воды при различных значениях T_w и T_g . Можно отметить достаточно умеренное влияние этих параметров для первых «циклов деформации». При анализе 10–15 характерных циклов установлено, что размеры капель уменьшаются вследствие испарения с разной скоростью. Поэтому можно прогнозировать, что для протяженных каналов с газами влияние T_w и T_g можеткратно усиливаться.



a

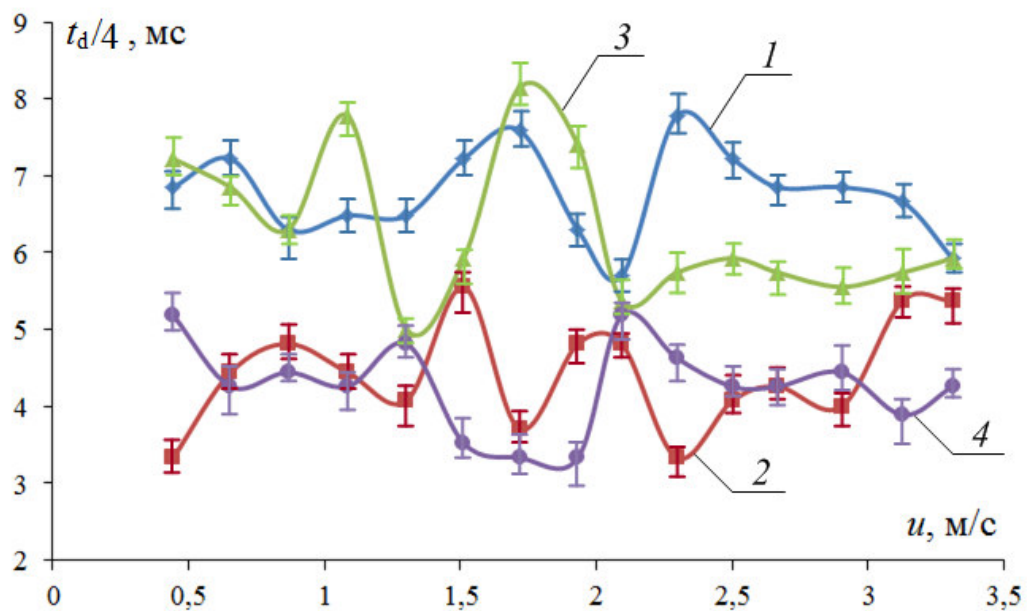


б

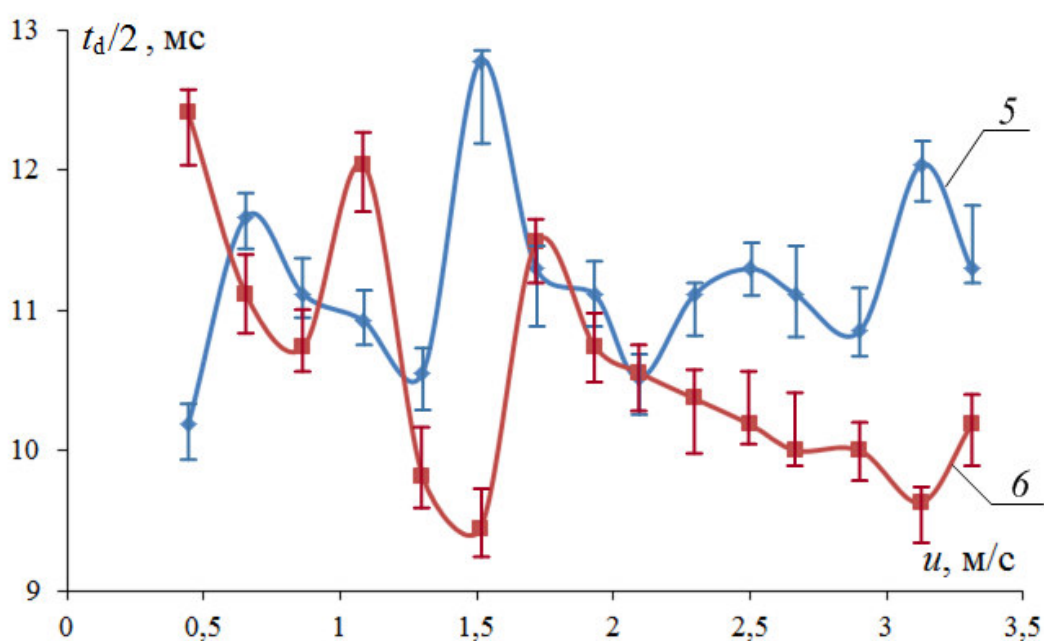
Рисунок 3.1.12. Амплитуды деформации (*a* – Δ_x , Δ_y , *б* – Δ_{\max}) капле воды ($d_0 \approx 5$ мм) в пределах нескольких циклов при различных температурах:

1 – $T_g = 300$ К, $T_w = 298$ К; 2 – $T_g = 300$ К, $T_w = 313$ К; 3 – $T_g = 300$ К, $T_w = 363$ К; 4 – $T_g = 285$ К, $T_w = 363$ К; 5 – $T_g = 298$ К, $T_w = 363$ К; 6 – $T_g = 1100$ К, $T_w = 363$ К

На рис. 3.1.13 приведены характерные времена каждого «четверть-цикла» и «полуцикла» (рис. 3.1.2), соответственно, процесса деформации при различных скоростях перемещения каплей воды.



a



б

Рисунок 3.1.13. Времена «четверть-циклов» (*a*) и «полуциклов» (*б*) деформации каплей воды при росте скоростей их движения ($d_0 \approx 4$ мм): 1, 2, 3, 4 – первый, второй, третий и четвертый «четверть-циклы»; 5, 6 – первый и второй «полуциклы»

По результатам обработки результатов экспериментов получены аппроксимационные выражения для основных характеристик деформации водяных капель. Например, для длительностей и протяженностей «циклов деформации» при различных температурах можно отметить следующие:

$$t_d=1,5151 \cdot d_0^{1,8476}; l_d=1,5067 \cdot d_0^{1,8426} \quad (3.1.7)$$

при $4 < d_0 < 6$ мм, $u=1$ м/с, $T_g=298$ К, $T_w=313$ К;

$$t_d=1,6469 \cdot d_0^{1,7786}; l_d=5,8347 \cdot d_0^{1,6698} \quad (3.1.8)$$

при $4 < d_0 < 6$ мм, $u=2$ м/с, $T_g=298$ К, $T_w=313$ К;

$$t_d=1,7179 \cdot d_0^{1,7395}; l_d=10,146 \cdot d_0^{1,6307} \quad (3.1.9)$$

при $4 < d_0 < 6$ мм, $u=3$ м/с, $T_g=298$ К, $T_w=313$ К;

$$t_d=22,647 \cdot \exp(-0,021 \cdot u); l_d=22,08 \cdot u^{0,9935} \quad (3.1.10)$$

при $0,5 < u < 4$ м/с, $d_0=4,3$ мм, $T_g=298$ К, $T_w=313$ К;

$$t_d=32,093 \cdot \exp(-0,015 \cdot u); l_d=31,868 \cdot u^{0,9637} \quad (3.1.11)$$

при $0,5 < u < 4$ м/с, $d_0=5,2$ мм, $T_g=298$ К, $T_w=313$ К;

$$t_d=39,922 \cdot \exp(-0,033 \cdot u); l_d=38,722 \cdot u^{0,9424} \quad (3.1.12)$$

при $0,5 < u < 4$ м/с, $d_0=5,8$ мм, $T_g=298$ К, $T_w=313$ К.

При анализе характеристик процессов движения капель жидкостей в газовых средах используют [196, 198, 199], как правило, два безразмерных критерия – числа Вебера и Рейнольдса (при этом последнее рассчитывают как для капли, так и газовой среды). Так как численные значения We и Re зависят, в первую очередь, от скоростей движения капель и их размеров, то представляет интерес определение зависимостей безразмерных времен «циклов деформации» τ_d от We и Re .

Число Рейнольдса для капли, движущейся в газовой среде, может быть вычислено по формуле [196]:

$$Re=u \cdot d_0 / (2\nu).$$

В качестве безразмерного времени характерных «циклов деформации» в проведенных экспериментах, скорее всего, целесообразно использовать «период собственных колебаний» капель [46]:

$$\tau=(d_0/g)^{0,5}.$$

При безразмерной обработке результатов экспериментов установлены характерные области изменения времен «циклов деформации», как функций от We и Re . В частности, на рис. 3.1.14 приведены результаты для капель воды.

Можно отметить достаточно большие диапазоны изменения безразмерных времен «циклов деформации» τ_d для идентичных значений We и Re (рис. 3.1.14). Это обусловлено разным влиянием скоростей движения и размеров капель (определяющих, главным образом, числа подобия We и Re) на характеристики деформации. Например, изменение чисел Вебера вследствие роста скорости движения капли приводит к уменьшению τ_d . При росте числа Вебера вследствие повышения скорости движения капли времена τ_d уменьшаются. Произвольный выбор характерных экспериментальных значений u и d_0 позволяет установить колебательную зависимость $\tau_d=f(We)$. Аналогичную закономерность можно выделить и для зависимостей $\tau_d=f(Re)$. При этом следует отметить, что выделенные особенности характерны для жидкостей с разными свойствами (вода, керосин, этиловый спирт).

Серии проведенных экспериментов показали, что времена существования капель в рассматриваемых формах (в соответствии с разработанными оценочными методиками на основе результатов анализа изменения амплитуд процессов деформации) становятся сопоставимыми при росте скоростей капель. Так, например, при максимальных (для проведенных экспериментов) скоростях движения капель ($u \rightarrow 5$ м/с) и сформулированных выше условиях для Δ_x , Δ_y , Δ_{xm} и Δ_{ym} установлено, что капли воды могут принимать форму сферы в течение периодов, составляющих 27–32% от времен t_d . Близкие диапазоны времени зарегистрированы для «блинов», а также эллипсоидов, вытянутых в направлении движения капель. Очевидно, что некоторый рост значений t_{ex} , t_{ey} и t_c обусловлен

рассмотренным выше уменьшением амплитуд деформации Δ_x и Δ_y при увеличении скоростей u .

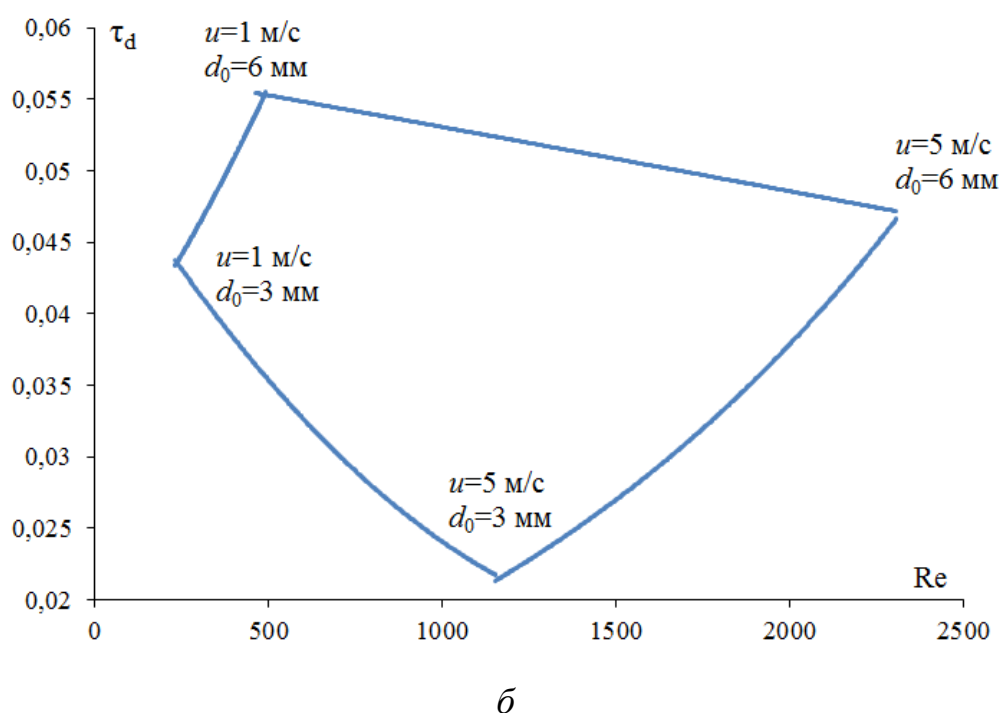
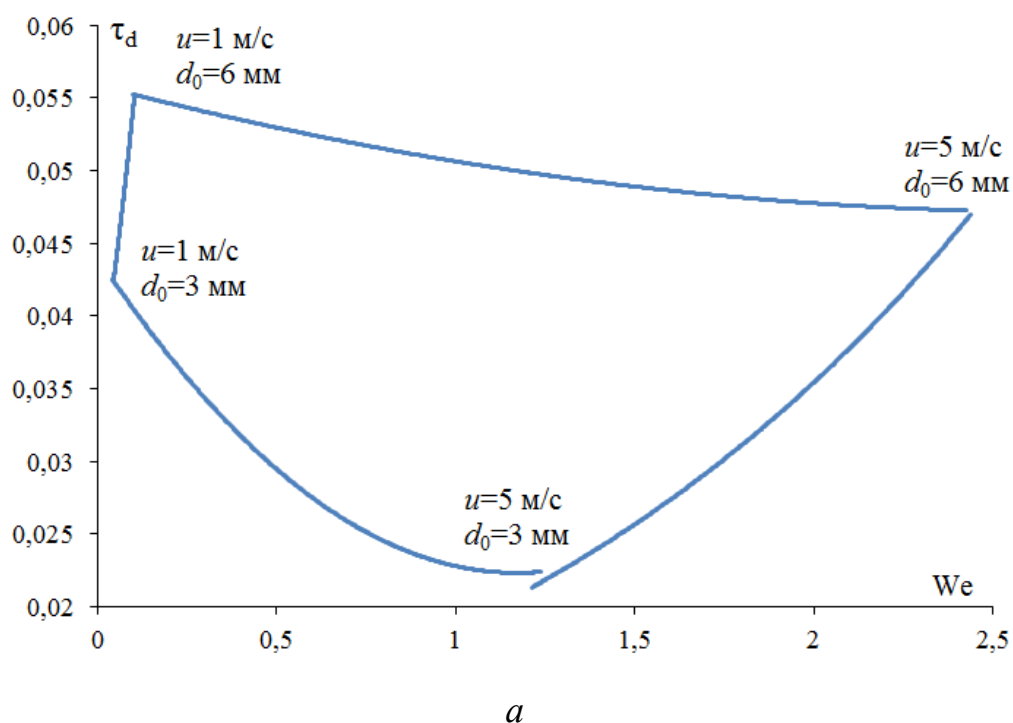


Рисунок 3.1.14. Области характерных значений безразмерных времен «циклов деформации» каплей воды при варьировании We (a) и Re (b) в диапазонах, соответствующих условиям проведенных экспериментов

Выявленные особенности иллюстрируют, что при моделировании процессов движения капель в газовых средах целесообразно учитывать не только нелинейное изменение скоростей u (как, например, представлено в монографиях [196, 206, 207]), но и влияние этого изменения на характеристики деформации.

Следует отметить, что приведенные выше оценки времен существования капель в рассматриваемых формах характеризуют верхний диапазон реальных параметров t_{ex} , t_{ey} и t_c . Это обусловлено тем, что вычислялись амплитуды деформации по двум характерным координатам (Δ_x и Δ_y). Полученные в экспериментах результаты (в частности, рис. 3.1.7–3.1.9, 3.1.13) иллюстрируют асимметрию процессов трансформации капель. Как следствие, учет пространственного эффекта трансформации может привести к росту времен существования капель в переходных формах и снижению времен, соответствующих сферам, «блинам» и эллипсоидам, приведенным на рис. 3.1.2.

Вычисленные времена переходов от одной формы капель к другой, длительности характерных «циклов деформации» и условные времена принятия каплями той или иной конфигурации можно использовать для уточнения моделей тепломассопереноса при движении капель воды и эмульсий на ее основе через газовые среды (в частности, высокотемпературные газы [146, 149, 155]). Так, например, исходя из известных времен t_d при различных скоростях движения и размерах капель, целесообразно определить число характерных «циклов деформации» (например, при расстоянии 1 м для капель воды, керосина и этилового спирта установлено от 12 до 16 циклов). Для каждого цикла при соответствующих значениях скоростей движения капель на входе в него u можно определить число характерных форм и выбрать типичные конфигурации (рис. 3.1.1). Известны [196, 206, 207] значения коэффициентов аэродинамического сопротивления c_χ каждой конфигурации (сфера, эллипсоид, «блин», цилиндр и другие). В зависимости от числа таких форм и характерных времен «существования» капель с такими конфигурациями для каждого «цикла деформации» возможно определение зависимости $c_\chi=f(t)$ при $0 < t < t_d$. Например,

для одного «цикла деформации» коэффициент аэродинамического сопротивления, в первом приближении, можно вычислить по формуле:

$$c_{\chi} = \frac{1}{t_d} [t_c c_{\chi c} + t_{ef} c_{\chi ex} + t_{ep} c_{\chi ey} + \dots],$$

где $c_{\chi c}$, $c_{\chi ex}$, $c_{\chi ey}$ – коэффициенты аэродинамического сопротивления для тел в форме сферы, эллипсоида, «блина» и других.

Развитие такой модели для группы из более чем, например, десяти последовательных «циклов деформации» позволит разработать подход, максимально приближающий представления о форме капель жидкости к реальным при их колебательном движении через газовые среды. В частности, в первом приближении, с учетом известных времен t_d и протяженностей l_d возможно последовательное изменение значений c_{χ} для каждого «цикла деформации» при численном моделировании процессов тепломассопереноса и гидродинамики, соответствующих условиям перемещения капель жидкостей в газовых средах с существенно дозвуковыми скоростями:

$$c_{\chi} = [c_{\chi 1}, c_{\chi 2}, c_{\chi 3}, \dots, c_{\chi n}],$$

где $c_{\chi 1} \dots c_{\chi n}$ – коэффициенты сопротивления для каждого из n циклов.

Таким образом, геометрическая модель капли в форме сферы является не более обоснованной, чем любая другая из установленных в экспериментах. Можно рекомендовать при теоретических исследованиях использовать любую из наиболее типичных моделей форм капель, например, сферу, эллипсоид, «блин» или цилиндр, но при этом учитывать непрерывное изменение c_{χ} в соответствии с установленными «циклами деформации». В первом приближении возможно изменение c_{χ} в соответствии с численными значениями времен Δt , t_d , t_{ex} , t_{ey} и t_c для соответствующих жидкостей. Установленные особенности изменения Δt , t_d , Δ_x и Δ_y в процессе движения капель иллюстрируют определяющую роль не столько начальных значений d_0 и u_0 , сколько значения скоростей в пределах каждого «цикла деформации». Поэтому целесообразно учитывать не только нелинейное

изменение скоростей u при моделировании процессов движения капель в газовых средах, но и влияние этого изменения на характеристики деформации.

Полученные результаты целесообразно использовать при численном исследовании следующих процессов: тепломассоперенос при движении парокапельных потоков воды в газовых трактах теплоэнергетического оборудования (теплообменные аппараты, градирни ТЭС), способы термической (испарительной) очистки воды, генерация парокапельных потоков воды при полидисперсном водяном пожаротушении.

3.2. Анализ интегральных характеристик испарения капель при различной начальной температуре воды

При проведении серии экспериментов в соответствии с представленной в п. 2.2 методикой исследовалось влияние начальной температуры жидкости на характеристики ее испарения в высокотемпературной газовой области [208, 209].

При обработке видеogramм в рабочей области капли распыленной жидкости разделены по начальным размерам на несколько групп: 1 – при $0,09 \leq R_m < 0,16$ мм, 2 – при $0,16 \leq R_m \leq 0,23$ мм, 3 – при $0,23 < R_m \leq 0,3$ мм, 4 – при $0,3 < R_m \leq 0,37$ мм. Для каждой из этих групп определялись средние значения доли испарившейся жидкости (введен параметр ΔR , характеризующий изменение размеров капель при движении через пламя ($\Delta R = (R_{\text{inp}} - R_{\text{out}}) / R_{\text{inp}} \cdot 100$, %)), скорости движения u и концентрации водяных капель α в рабочей области (на входе и выходе из зоны горения).

На рис. 3.2.1 и 3.2.2 представлены зависимости параметра ΔR от усредненного характерного размера капель распыленного потока R_m при варьировании начальной температуры жидкости в диапазоне от 293 К до 323 К.

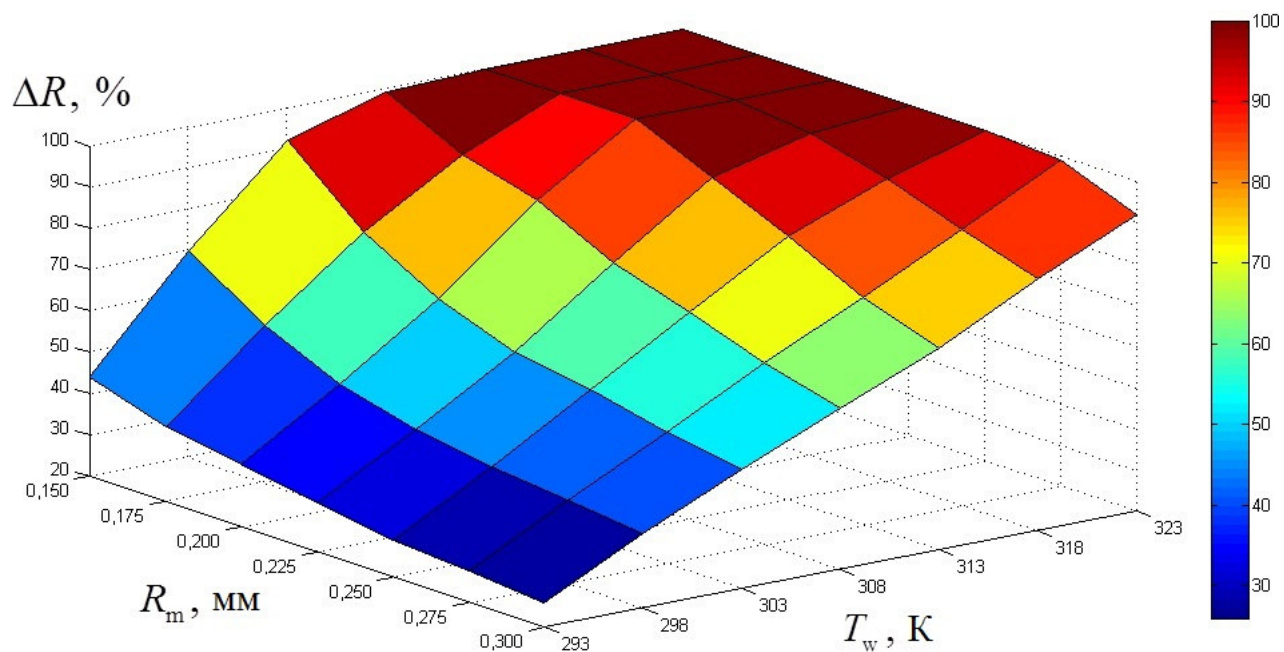
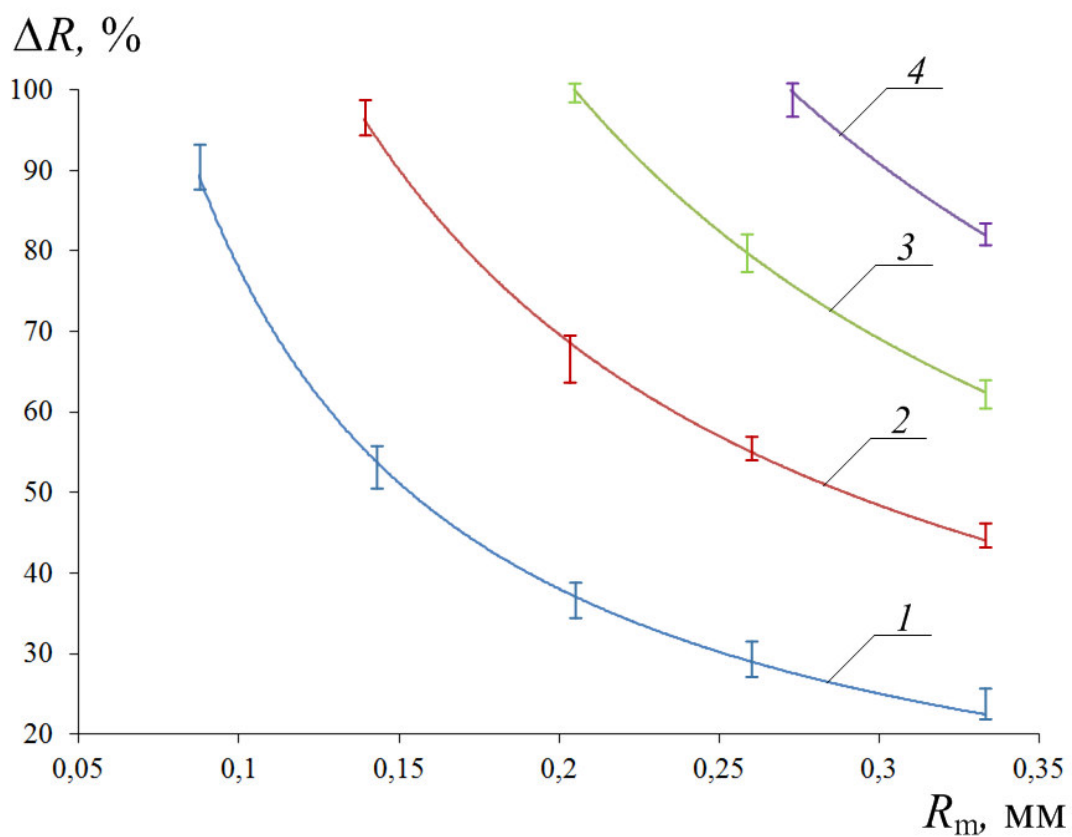
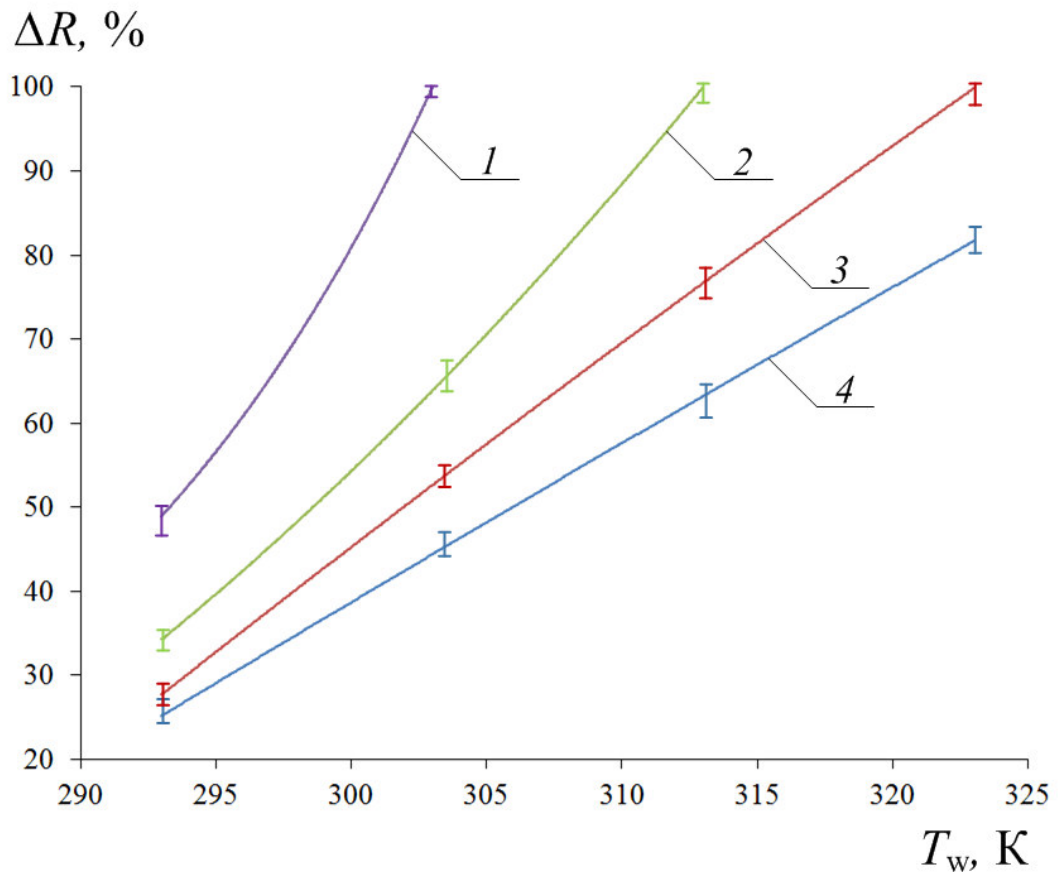


Рисунок 3.2.1. Зависимости параметра ΔR от начального размера R_m и начальной температуры T_w распыленной жидкости



a



б

Рисунок 3.2.2. Зависимости параметра ΔR : а - от начального размера капель R_m (1 – при $T_w=293$ К, 2 – при $T_w=303$ К, 3 – при $T_w=313$ К, 4 – при $T_w=323$ К); б - от начальной температуры распыленной жидкости T_w для выделенных групп капель (1 – при $0,09 \leq R_m < 0,16$ мм, 2 – при $0,16 \leq R_m \leq 0,23$ мм, 3 – при $0,23 < R_m \leq 0,3$ мм, 4 – при $0,3 < R_m \leq 0,37$ мм)

Видно (рис. 3.2.2), что с повышением T_w значения параметра ΔR существенно увеличиваются (возрастает интенсивность парообразования в зоне пламени). Важно также отметить, что при увеличении T_w кривые 1–4 несколько сближаются (рис. 3.2.2, а). Эта особенность показывает, что с повышением начальной температуры жидкости интегральные характеристики ее испарения меняются достаточно умеренно при варьировании параметров распыления.

Также получены зависимости параметра ΔR для выделенных групп капель от начальной температуры распыленной жидкости (рис. 3.2.2, б). Следует отметить более существенное влияние T_w на интенсивность испарения малых капель ($R_m < 0,15$ мм). Это хорошо видно по наклону кривой 1 (рис. 3.2.2, б). Установленную закономерность можно объяснить, используя теоретические следствия [210]. В процессе испарения жидкости определяющую роль [210] играет время прогрева ее приповерхностного слоя до температур, при которых реализуются условия интенсивного парообразования. Вследствие эндотермического фазового перехода температура вблизи поверхности жидкости снижается. Для предварительно нагретых (особенно малых по размерам – $R_m < 0,15$ мм) капель воды это снижение T невелико. Для относительно крупных капель ($R_m > 0,3$ мм), в зависимости от значения T_w , уменьшение температуры играет важную роль (несмотря на высокие температуры внешней среды (пламени) – до 1170 К). Поэтому при $R_m < 0,15$ мм доля испарившейся жидкости существенно (в несколько раз) меняется при росте T_w на 10 К (кривая 1 на рис. 3.2.2, б).

Для приведенных на рис. 3.2.1, 3.2.2 зависимостей получены аппроксимационные выражения, которые можно использовать при прогностической оценке доли испарившейся жидкости в зоне пламени при различных начальных значениях ее температуры и параметрах распыления:

$$\Delta R = 7,22R_m^{-1,033} \text{ при } 0,09 < R_m < 0,34 \text{ мм, } T_w = 293 \text{ К;} \quad (3.2.1)$$

$$\Delta R = 16,47R_m^{-0,896} \text{ при } 0,14 < R_m < 0,34 \text{ мм, } T_w = 303 \text{ К;} \quad (3.2.2)$$

$$\Delta R = 21,53R_m^{-0,969} \text{ при } 0,21 < R_m < 0,34 \text{ мм, } T_w = 313 \text{ К;} \quad (3.2.3)$$

$$\Delta R = 27,75R_m^{-0,985} \text{ при } 0,27 < R_m < 0,34 \text{ мм, } T_w = 323 \text{ К;} \quad (3.2.4)$$

$$\Delta R = 10^{-51} T_w^{21,293} \text{ при } 0,09 \leq R < 0,16 \text{ мм, } 293 < T_w < 323 \text{ К;} \quad (3.2.5)$$

$$\Delta R = 0,032T_w^2 - 16,432T_w + 2055,12 \quad (3.2.6)$$

при $0,16 \leq R \leq 0,23$ мм, $293 < T_w < 323$ К;

$$\Delta R = -0,004T_w^2 + 5,119T_w - 1094,21 \quad (3.2.7)$$

при $0,23 < R \leq 0,3$ мм, $293 < T_w < 323$ К;

$$\Delta R = -0,002T_w^2 + 3,067T_w - 708,58 \quad (3.2.8)$$

при $0,3 < R \leq 0,37$ мм, $293 < T_w < 323$ К.

Нелинейность функций $\Delta R = f(T_w, R_m)$ можно объяснить несколькими причинами. В первую очередь, нелинейной зависимостью скорости парообразования от температуры поверхности жидкости [79, 86, 122]. Во-вторых, эксперименты [211] и теоретические следствия [58, 144, 153] позволили установить условия, при которых совместное влияние капель парожидкостного потока на интегральные характеристики его испарения может быть определяющим. В частности, в [58, 144, 153] показано, что с ростом размеров капель их совместное влияние усиливается. Особенно это важно для капель, перемещающихся друг за другом в потоке высокотемпературных газов. Капли, идущие первыми, при интенсивном парообразовании создают условия для снижения температуры в окрестности последующих. Так как капли в потоке перемещаются, как правило, хаотично, то влияние этого эффекта нелинейно сказывается на характеристиках испарения, в частности, значениях ΔR [58, 144, 153]. Для относительно малых ($R_m < 0,2$ мм) капель влияние этого фактора несколько умеренно, так как для них характерны небольшие по размерам температурные и концентрационные следы (области в следе капли с существенно пониженной температурой и концентрацией продуктов сгорания) [58, 144, 153].

Также проведен ряд экспериментов для крупных одиночных монолитных капель жидкости. На рис. 3.2.3 приведена зависимость параметра ΔR от начальной температуры воды T_w для крупных капель со средним начальным радиусом $R_d \approx 2,9$ мм.

Для крупных (2,9 мм) капель установлено значительное влияние начальной температуры капель жидкости на интегральные характеристики фазовых превращений при их движении через «горячие» продукты сгорания. Так, повышение температуры T_w от 293 К до 323 К вызывает увеличение параметра ΔR

на 10 %. Данный результат хорошо коррелирует с результатами, полученными для мелких (менее 0,5 мм) капель.

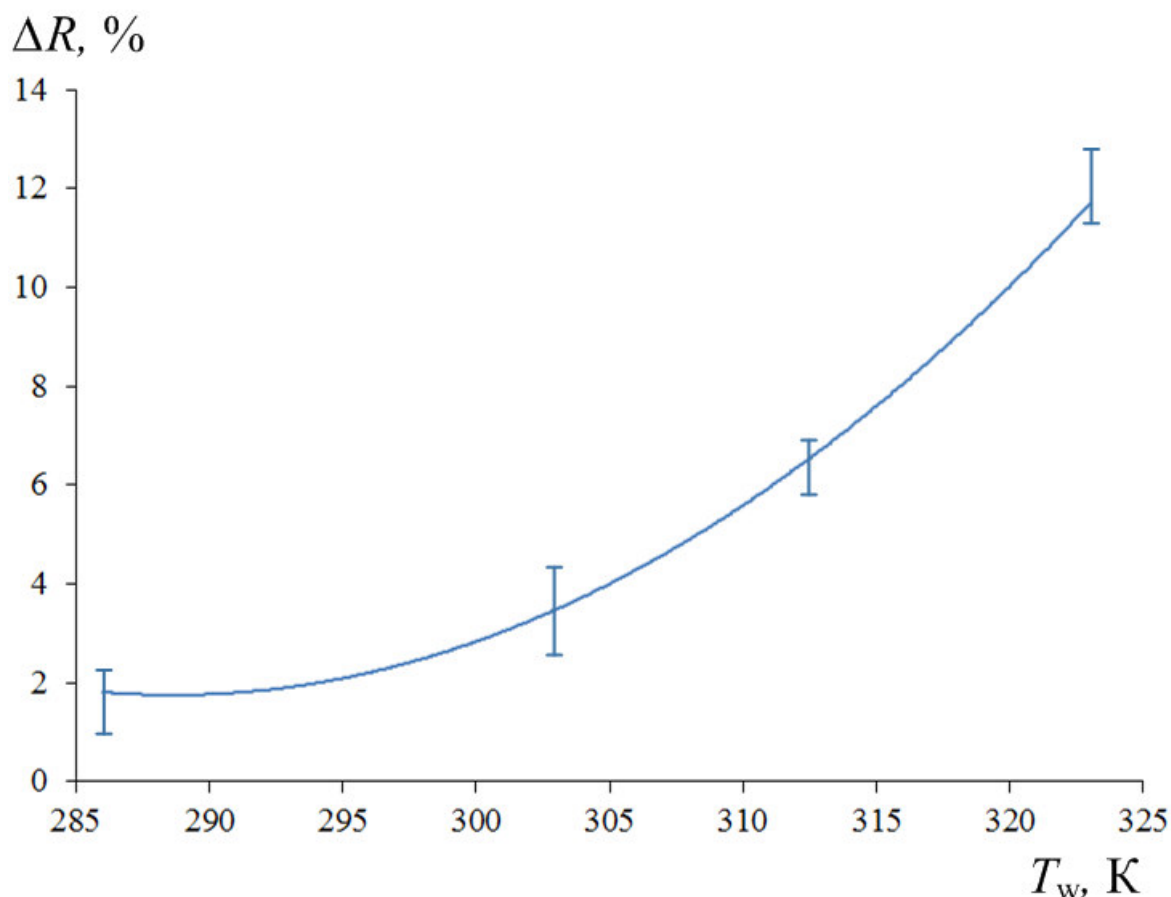


Рисунок 3.2.3. Зависимость параметра ΔR от начальной температуры воды T_w для одиночных капель с начальным средним радиусом $R_d \approx 2,9$ мм

Установленные зависимости $\Delta R = f(R_m)$ и $\Delta R = f(T_w)$ показывают (рис. 3.2.1), что для обеспечения некоторой заданной полноты испарения распыленной жидкости [52, 115, 212-216], например, в системах высокотемпературной очистки воды от примесей и включений, можно относительно умеренно (ΔT_w до 50 К) повысить ее начальную температуру без существенного измельчения капель. Кроме того, проведенные исследования показывают существенное влияние начальной температуры распыленной жидкости на интенсивность процессов теплопереноса, что следует обязательно учитывать в таких приложениях,

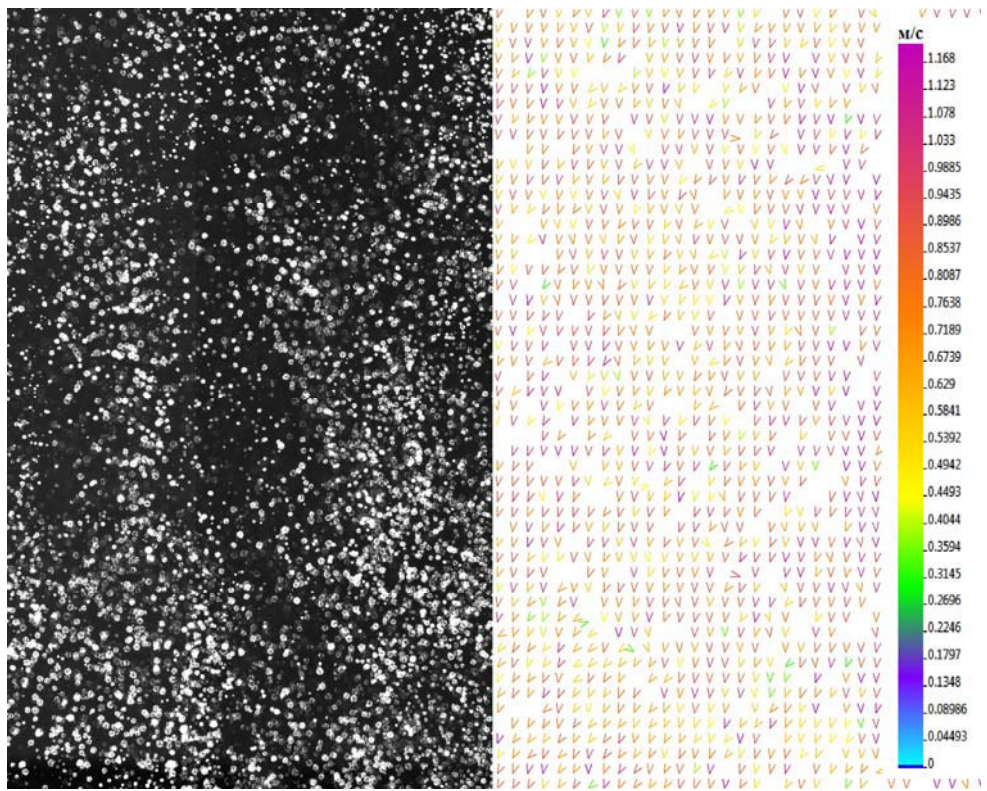
как охлаждение циркуляционной воды в градирнях ТЭС. Возможно, по материальным затратам этот подход в ряде практических приложений, например, [52, 115, 212-216], будет даже более экономически выгоден и относительно просто реализуем. Так, при использовании распыленной воды в процессе тушения пожаров в зданиях и сооружениях с целью обеспечения ее полного испарения в пламенной зоне горения и ликвидации очага возгорания (эффективного использования жидкости [154, 211]), а также в технологиях термической (испарительной) очистки воды представляется целесообразным, в первую очередь, повышать начальную температуру T_w в относительно небольшом диапазоне (вместо создания распылителей с размерами капель до нескольких десятков микрон).

3.3. Влияние размеров капель воды на интегральные характеристики их испарения при движении через высокотемпературные газы

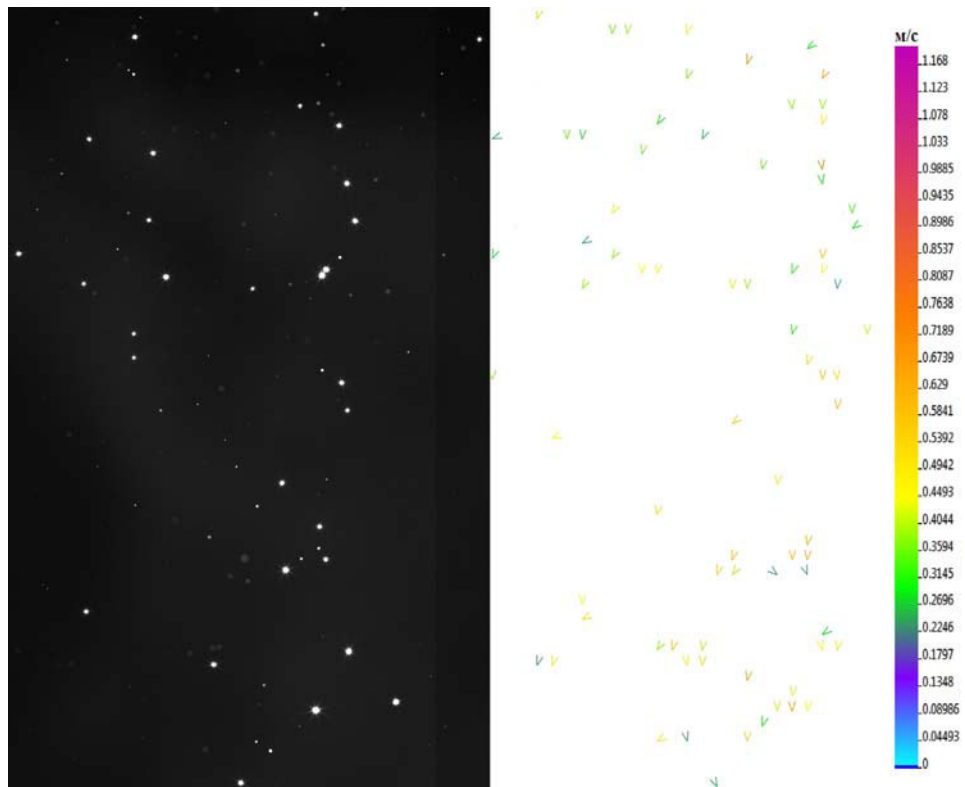
Задачей исследования являлось экспериментальное определение влияния размеров капель воды на интегральные характеристики их испарения при движении через высокотемпературный газовый поток [211, 217, 218].

Полученные при проведении опытов типичные видеокadres распыленной жидкости и соответствующие им поля скоростей совокупности капель приведены на рис. 3.3.1. Видно, что после прохождения жидкостью высокотемпературной зоны пламени общая концентрация капель значительно (в несколько раз) снижается. При этом скорость двухфазного пароводяного потока уменьшается более чем на 30 % (рис. 3.3.1, б) относительно начальной (рис. 3.3.1, а).

По полученным видеограммам и полям скоростей (рис. 3.3.1) выполнен численный анализ основных параметров испарения распыленной жидкости, движущейся в виде совокупности капель через пламя. Результаты приведены в таблице 3.1 (группа 1 – «малые» капли, группа 2 – «средние» капли, группа 3 – «большие» капли).



a



б

Рисунок 3.3.1. Видеogramма и поле скорости потока капель на входе (*a*) и выходе (*б*) канала с высокотемпературными газами

Для удобства оценки изменения характеристик испарения капель последние при обработке видеogramм условно разделены на три группы: «малые» – $0,075 < R_m < 0,175$ мм; «средние» – $0,175 < R_m < 0,275$ мм; «большие» – $0,275 < R_m < 0,375$ мм.

Установлено, что при прохождении совокупностью рассматриваемых капель ($0,075 < R_m < 0,375$ мм) расстояния в 1 м (высота пламени) концентрация их в потоке α_m существенно снижается (рис. 3.3.1, б) относительно начальной (рис. 3.3.1, а). Среди прошедших через пламя капель жидкости практически отсутствуют крупные капли с размерами $R_m > 0,275$ мм, а поток на 94,3 % (суммарная концентрация α_m для капель групп 1 и 2) состоит из «малых» и «средних» капель (рис. 3.3.1). Этот результат можно объяснить тем, что в процессе испарения при прохождении зоны продуктов сгорания радиус «больших» капель R_m уменьшается на 33 % (таблица 3.3.1). Радиус «средних» капель R_m уменьшается на 47 %. «Малые» капли испаряются полностью ($R_m \rightarrow 0$).

Выполненные эксперименты показали, что некоторая часть «малых» и «средних» капель, движущихся во фронте потока, уносится с уходящими дымовыми газами на входе в канал (не попадают в область горения). Это можно объяснить установленными относительно высокими (до 0,3 м/с) скоростями восходящих продуктов сгорания и достаточно малой массой рассматриваемых капель.

По полученным значениям R_m и α_m , приведенным в таблице, можно сделать вывод о существенном изменении структуры двухфазного парожидкостного потока при движении через высокотемпературные продукты сгорания. Так, например, на входе в канал 14 (рис. 2.2.1) зарегистрирована следующая относительная концентрация капель α_m : группа 1 – 44,27 %, группа 2 – 40,13 %, группа 3 – 15,47 %. На выходе соответствующие значения α_m составили: группа 1 – 43,07 %, группа 2 – 51,20 %, группа 3 – 5,73 %. Этот результат показывает, что при увеличении длины пути распыленной жидкости в области высокотемпературных газов значительно возрастает концентрация α_m для группы

«малых» капель, а для «больших» и «средних» $\alpha_m \rightarrow 0$. Поэтому для ряда практических приложений для обеспечения полноты испарения распыленной жидкости целесообразно параметры распыления (в частности, R_m) выбирать исходя из характерных размеров областей, заполненных высокотемпературными газами. Полученные результаты особенно важно учитывать при выборе параметров полидисперсного парок капельного потока и режимов работы оборудования в системах высокотемпературной (термической) очистки воды [49-51].

Таблица 3.3.1.

Основные интегральные характеристики испарения капель рабочей жидкости

Наименование параметра	№ группы	На входе в канал	На выходе из канала
R_m , мм	1	0,132	-
	2	0,215	0,114
	3	0,302	0,204
α_m , %	1	44,27	-
	2	40,13	43,07
	3	15,47	56,93
γ_m , ед/см ³	1	54,864	-
	2	49,331	1,039
	3	18,948	1,372
γ_v , ед/см ³		123,333	2,401
u_m , м/с		0,697	0,479

R_m – средний радиус, мм; α_m и γ_m – средняя относительная концентрация в % и ед/см³, соответственно; γ_v – общая концентрация в рабочей области, ед/см³; u_m – средняя скорость, м/с.

Установлено, что скорости капель на выходе из области горения u_m снижаются на 0,217 м/с относительно скоростей на входе в канал (таблица 3.3.1). Это обусловлено как движением продуктов сгорания, так и интенсивными фазовыми превращениями при парообразовании. Полученный результат хорошо коррелирует с зависимостями, полученными для скоростей и времен существования водяных капель при проведении численного моделирования с использованием постановок [58-61, 141-144, 154].

Для данных, приведенных в таблице 3.3.1, получена аппроксимационная зависимость:

$$\Delta R = 6,0212 \cdot R_m^{-1,374} \text{ при } 0,1 < R_m < 0,35 \text{ мм и } u_m \approx 0,7 \text{ м/с.} \quad (3.3.1)$$

По результатам численных исследований ранее [59, 61, 142] было показано, что большую роль при движении капель рабочей жидкости через высокотемпературные газы играет их положение относительно друг друга. Из анализа изотерм и изолиний концентраций продуктов сгорания установлено [61], что при последовательном движении нескольких капель первые из них создают условия для существенного снижения скоростей испарения последующих капель. В выполненных экспериментах также выявлена аналогичная закономерность. На рис. 3.3.2 приведена видеограмма, на которой видно, что относительно большие капли рабочей жидкости располагаются в следе существенно меньших капель.

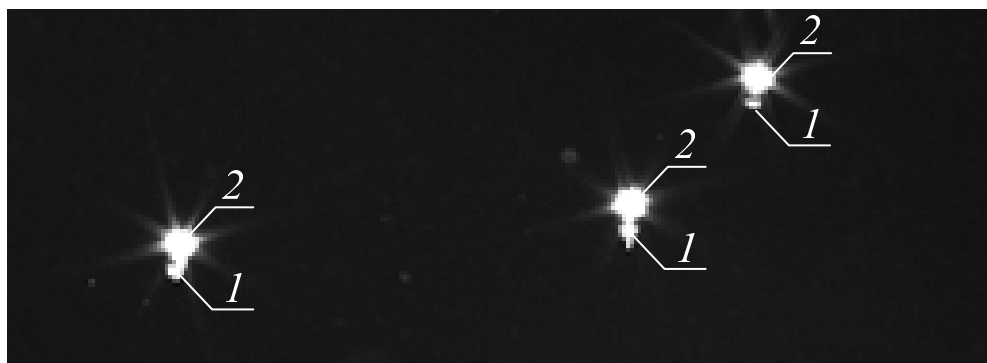


Рисунок 3.3.2. Видеограмма с «тандемами» капель на выходе из зоны пламени

Полученный результат можно объяснить тем, что капли при испарении значительно снижают температуру (рис. 3.3.3) смеси продуктов сгорания и водяных паров в своем следе [61]. Процессы парообразования в окрестности последующих капель в таких условиях замедляются. В условиях высоких температур при интенсивных эндотермических фазовых превращениях скорости движения капель (особенно во фронте потока) снижаются (рис. 3.3.1, б). Как следствие, расстояния между предыдущей и последующей каплями уменьшаются. Этим можно объяснить то, что на рис. 3.3.2 некоторые предыдущие и последующие капли практически «сливаются» в одну (зарегистрировано несколько «объединенных» фрагментов). Серии экспериментов показали, что, скорее всего, по сформулированным причинам каждая последующая капля потока рабочей жидкости медленнее испаряется и проходит существенно больший путь относительно предыдущей.

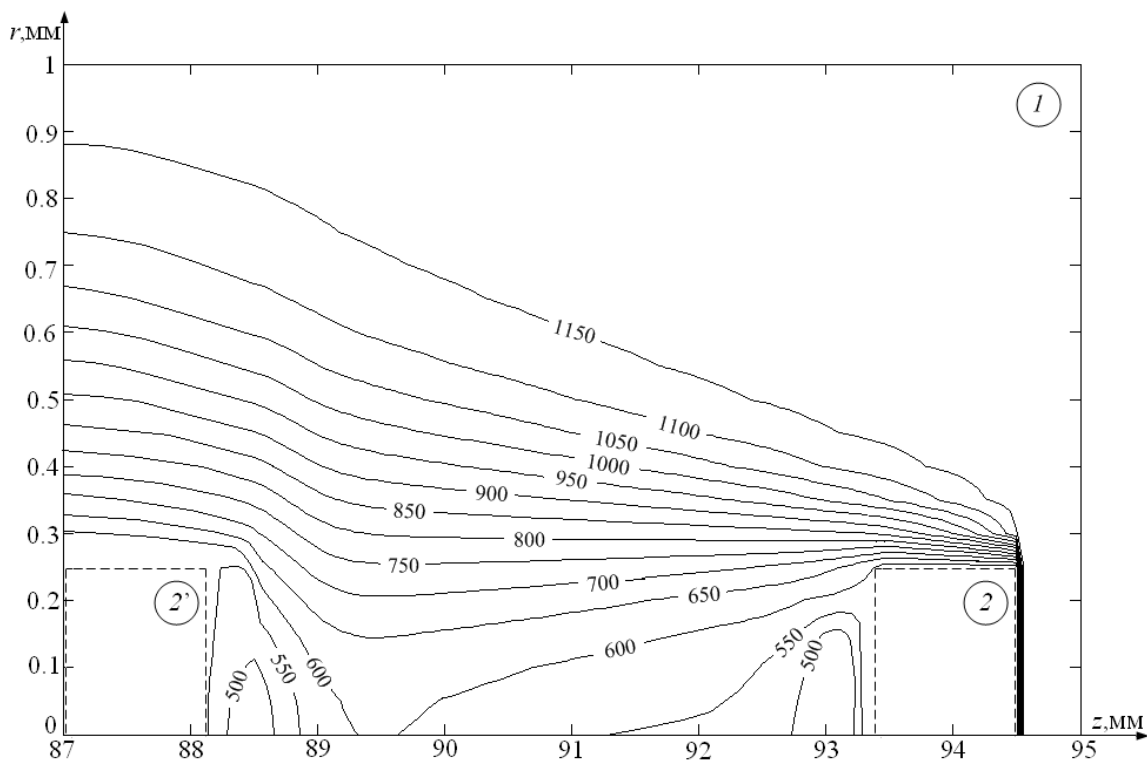


Рисунок 3.3.3. Изотермы в окрестности «тандема» капель, движущихся через пламя: 1 – высокотемпературная газовая среда, 2 – первая капля, 2' – вторая капля

[61]

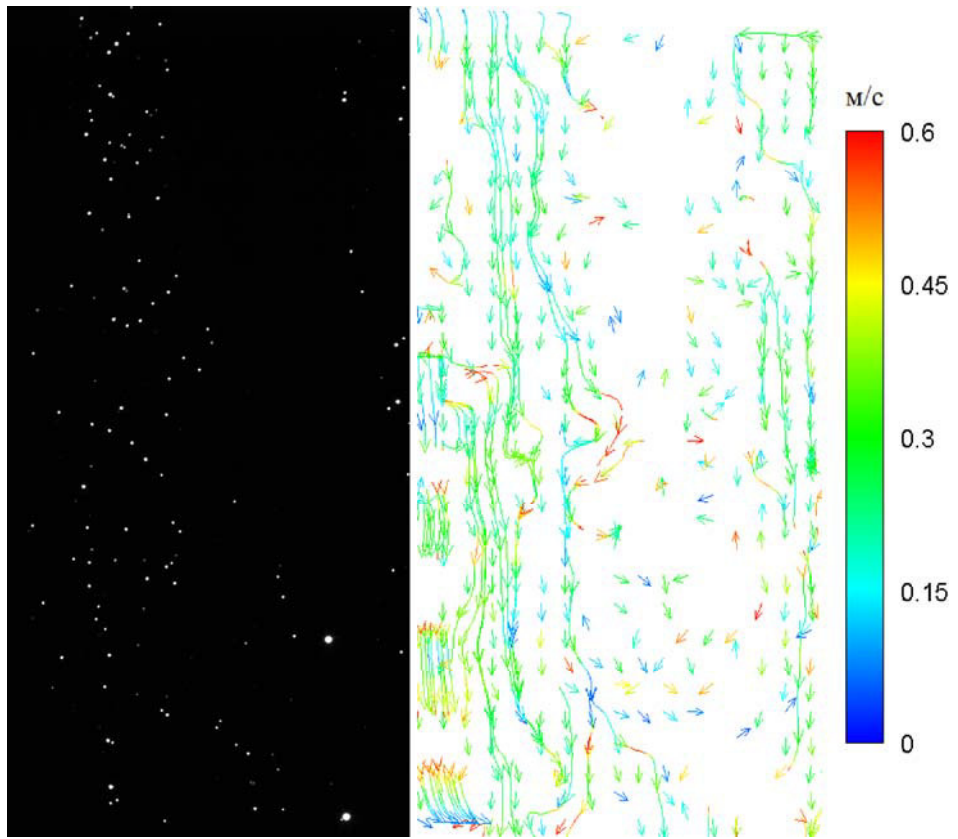
Также выполнен сопоставительный анализ влияния размеров капель на интенсивность фазовых превращений для капельных потоков распыленной жидкости ($0,05 \leq R_m \leq 0,5$ мм) и крупных капель ($1 \leq R_d \leq 5$ мм). Результаты исследований показали, что первостепенное влияние на процесс испарения капель жидкости оказывает, прежде всего, начальный размер самих капель. Так, с увеличением размера капли, доля испарившейся жидкости значительно снижается при прочих равных условиях (для крупных капель до 15 %, тонкораспыленной воды – доходит до 100 %).

Полученные результаты особенно важны для объяснения закономерностей процессов тепломассообмена при движении большой совокупности капель воды в высокотемпературной газовой среде, например в технологиях высокотемпературной очистки воды [49-51] и при использовании газопарокапельных смесей в качестве теплоносителей [52-54].

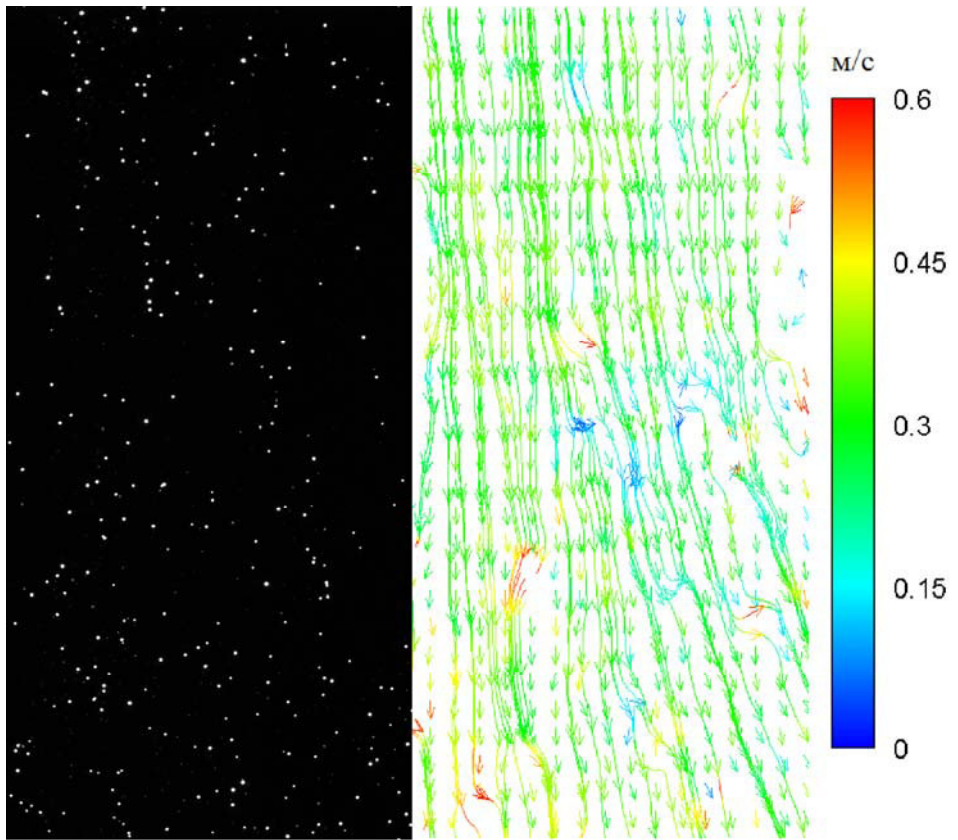
3.4. Влияние начальных скоростей капель воды на интегральные характеристики их испарения при движении через высокотемпературные газы

При проведении экспериментов [219, 220] в соответствии с описанной в главе 2 методикой регистрировались видеоизображения совокупности капель распыленной жидкости на входе и выходе из высокотемпературной газовой области (цилиндрического канала 14, заполненного продуктами сгорания). На рис. 3.4.1 приведены типичные видеогаммы совокупности капель распыленной жидкости и поля скоростей «трассирующих» частиц на выходе из области высокотемпературных газов для различных значений начальных скоростей u_m .

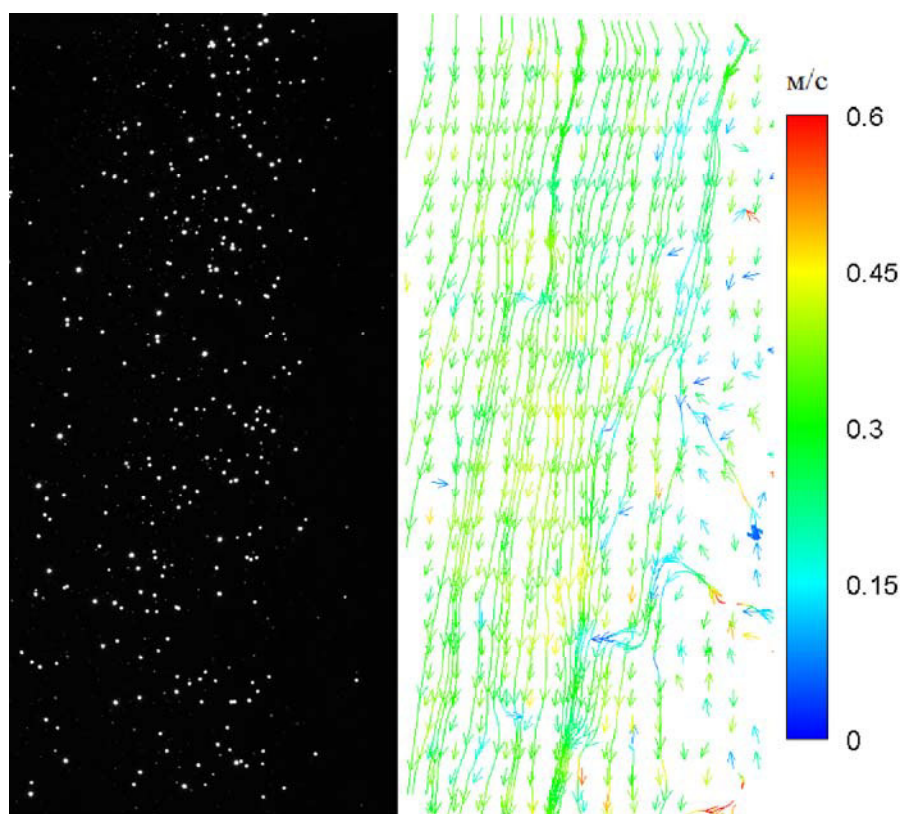
Типичные видеогаммы капель распыленной воды и соответствующие им поля скоростей «трассеров» на выходе канала с высокотемпературными газами приведены на рис. 3.4.1.



a



b



в

Рисунок 3.4.1. Видеограммы капель распыленной жидкости и поля скоростей «трассирующих» частиц на выходе канала с высокотемпературной газовой средой при $u_m \approx 0,8$ м/с (а), $u_m \approx 1,2$ м/с (б) и $u_m \approx 1,5$ м/с (в)

На основании анализа видеограмм, подобных приведенным на рис. 3.4.1, можно сделать вывод о существенном снижении относительной объемной концентрации капель α_m после прохождения ими зоны пламени. Установленная закономерность хорошо коррелирует с результатами опытов [221, 222]. При этом выявлено умеренное влияние начальных скоростей u_m на значения α_m . Средняя относительная объемная концентрация капель выделенных (по размерам) групп на входе α_m составила: $0,09 < R_m \leq 0,16$ мм (группа 1) – 25 %, $0,16 < R_m \leq 0,23$ мм (группа 2) – 45 %, $0,23 < R_m \leq 0,3$ мм (группа 3) – 25 %, $0,3 < R_m \leq 0,37$ мм (группа 4) – 5 %. При варьировании начальной скорости u_m в достаточно широком диапазоне (от 0,5 м/с до 1,5 м/с) на выходе из канала 14 происходило существенное изменение внутренней структуры газопарожидкостного

(газопарокапельного) потока. Так, для соответствующих групп каплей при $u_m=0,8$ м/с относительные объемные концентрации равны: группа 2 – 6 %, группа 3 – 64 %, группа 4 – 30 %. Для $u_m=1,2$ м/с: группа 2 – 3 %, группа 3 – 52 %, группа 4 – 45 %. При $u_m=1,5$ м/с значения α_m составили: группа 2 – 1 %, группа 3 – 39 %, группа 4 – 60 %. Эксперименты показали, что капли с начальными размерами $0,09 < R_m \leq 0,16$ мм (группа 1) испаряются полностью. В результате анализа значений α_m для соответствующих групп каплей установлено, что объемная концентрация последних в целом на выходе из зоны пламени незначительно (менее 5 %) изменяется с ростом начальных скоростей распыленной жидкости в диапазоне от 0,5 м/с до 1,5 м/с.

На рис. 3.4.2 представлена зависимость интегрального параметра, характеризующего изменение размеров каплей при испарении в высокотемпературной газовой области (ΔR), от начальных размеров каплей для различных u_m .

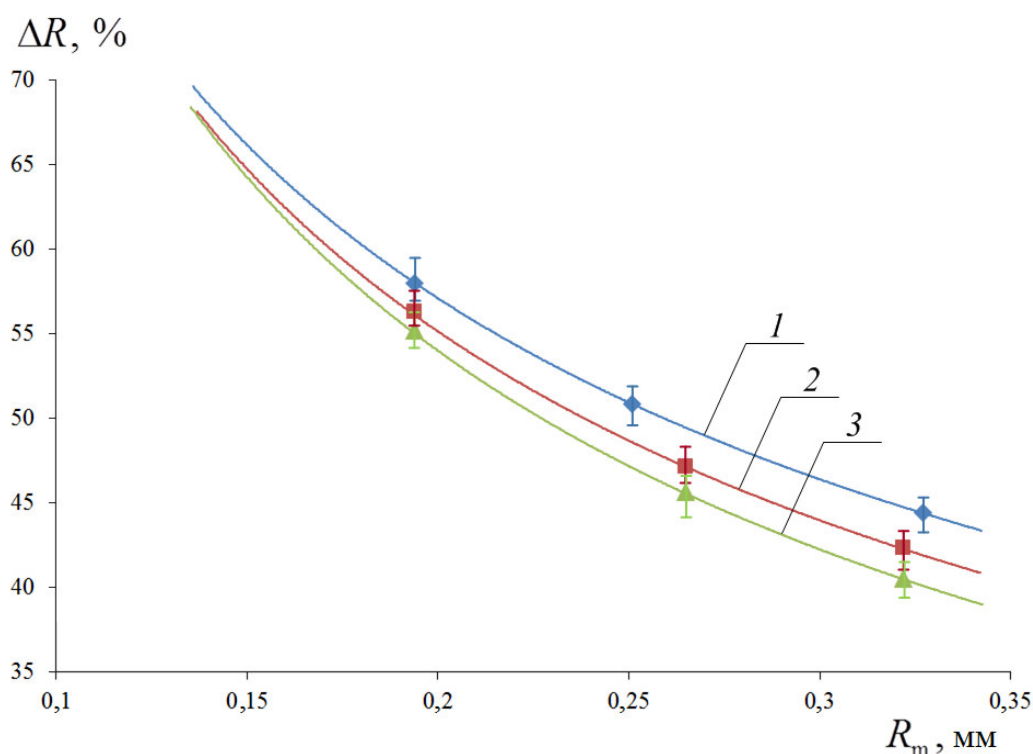


Рисунок 3.4.2. Зависимости параметра ΔR от начальных размеров каплей распыленной жидкости R_m для различных начальных скоростей u_m :

1 – $u_m=0,8$ м/с, 2 – $u_m=1,1$ м/с, 3 – $u_m=1,4$ м/с

На рис. 3.4.3 приведена зависимость параметра ΔR от начальной скорости движения капле для нескольких выделенных (по начальным размерам) групп. Видно, что при изменении u_m от 0,8 до 1,4 м/с значение параметра ΔR для капле с начальными размерами $0,16 < R_m \leq 0,23$ мм меняется в среднем на 2,5 %, $0,23 < R_m \leq 0,3$ мм – на 3 %, $0,3 < R_m \leq 0,37$ мм – на 3,5 %.

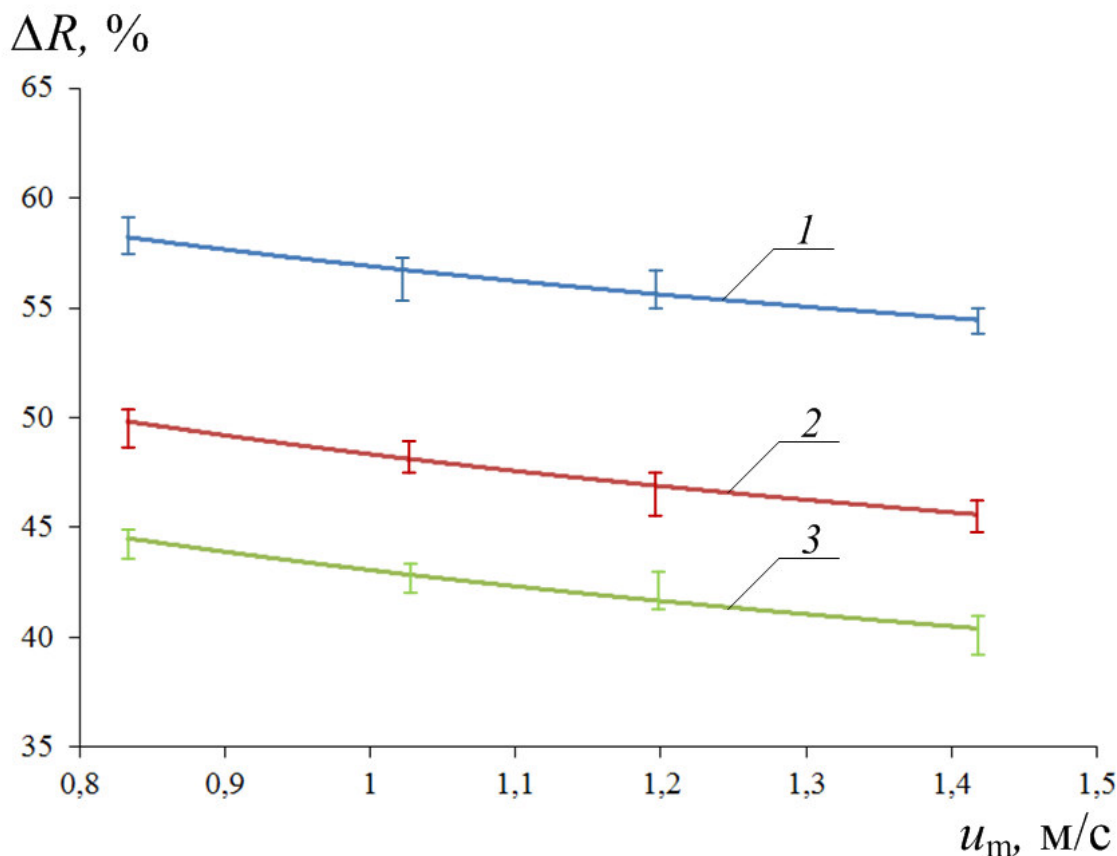


Рисунок 3.4.3. Зависимости параметра ΔR от начальных скоростей движения u_m капле распыленной жидкости для выделенных групп капле: 1 – при $0,16 \leq R_m \leq 0,23$ мм, 2 – при $0,23 < R_m \leq 0,3$ мм, 3 – при $0,3 < R_m \leq 0,37$ мм

Установленные (рис. 3.4.2, 3.4.3) зависимости $\Delta R=f(R_m)$ и $\Delta R=f(u_m)$ можно объяснить тем, что при снижении начальной скорости перемещения капле возрастают характерные времена нахождения их в высокотемпературной области, прогрева приповерхностного слоя жидкости, и, соответственно, несколько

увеличивается масса испарившейся в процессе движения через газовую среду жидкости.

В то же время следует отметить, что при относительно небольших временах (от 1 до 3 с) движения капель жидкости (t_d) через высокотемпературные газы (прохождения канала *14*), влияние начальной скорости перемещения капель достаточно умеренное. Анализ рис. 3.4.2 и 3.4.3 позволяет заключить, что с ростом времен t_d влияние выделенного эффекта может существенно усилиться. Этот вывод хорошо согласуется с заключениями теоретических исследований [61, 146]. Так, установлено [61, 146], что при размерах высокотемпературной газовой области от 15 м до 25 м (и, соответственно, временах движения капель жидкости не менее 10 с) возможно испарение одиночных капель на 20–25 %. При этом показано, что, несмотря на интенсивное испарение и действие соответствующих сил сопротивления, происходит ускорение капель (в основном за счет силы тяжести). Это, в свою очередь, приводит к изменению массовых скоростей испарения капель и линейных скоростей вдува продуктов парообразования. Следует отметить, что проведение экспериментальных исследований с высокотемпературными каналами, подобными цилиндру *14* установки (рис. 2.2.1) и имеющими длину более 3 м, затруднительно как вследствие сложностей обеспечения относительно равномерного распределения температуры в канале, так и требуемых скоростей видеосъемки перемещения «трассеров». Поэтому можно только прогнозировать влияние u_m на ΔR при длинах высокотемпературных каналов, больших используемого в экспериментах (рис. 2.2.1).

Для приведенных на рис. 3.4.2 и 3.4.3 зависимостей получены аппроксимационные выражения, которые можно использовать при прогностической оценке массы испарившейся жидкости (по изменению размеров [221] или массы [222] капель) в зоне пламени при различных начальных значениях ее скорости и параметрах распыления (дисперсности):

$$\Delta R = 25,023R_m^{-0,512} \text{ при } u_m = 0,8 \text{ м/с, } 0,15 < R_m < 0,35 \text{ мм;} \quad (3.4.1)$$

$$\Delta R = 20,371R_m^{-0,606} \text{ при } u_m = 1,4 \text{ м/с, } 0,15 < R_m < 0,35 \text{ мм;} \quad (3.4.2)$$

$$\Delta R = 56,896u_m^{-0,126} \text{ при } 0,16 < R_m \leq 0,23 \text{ мм, } 0,8 < u_m < 1,4 \text{ м/с;} \quad (3.4.3)$$

$$\Delta R = 48,336u_m^{-0,167} \text{ при } 0,23 < R_m \leq 0,3 \text{ мм, } 0,8 < u_m < 1,4 \text{ м/с;} \quad (3.4.4)$$

$$\Delta R = 43,062u_m^{-0,182} \text{ при } 0,3 < R_m \leq 0,37 \text{ мм, } 0,8 < u_m < 1,4 \text{ м/с.} \quad (3.4.5)$$

Также установлено, что масштабы влияния начальной скорости движения одиночных капель на характеристики их испарения в области высокотемпературных продуктов сгорания сопоставимы с выявленными для распыленной жидкости. Так, на рис. 3.4.4 приведены зависимости параметра ΔR от начальной скорости движения одиночных капель u_d при различных условных радиусах R_d .

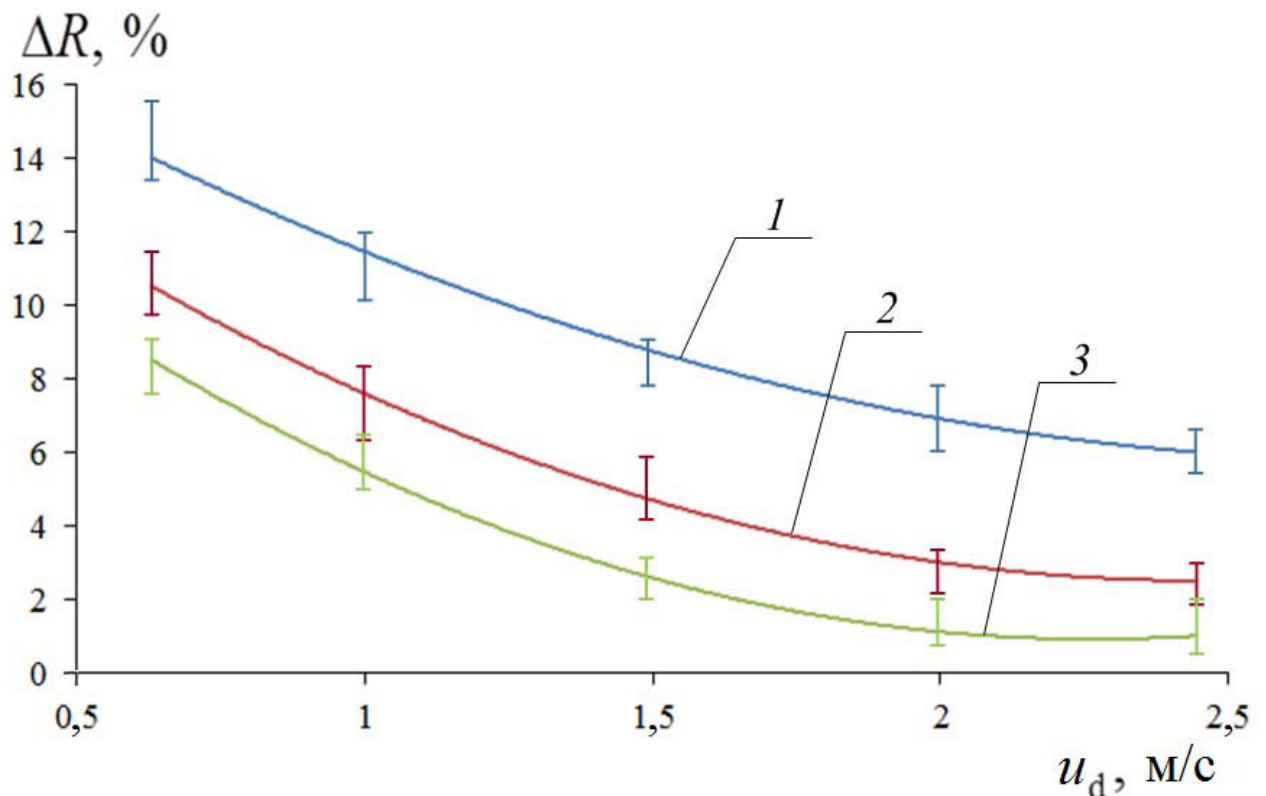


Рисунок 3.4.4. Зависимости параметра ΔR от начальной скорости движения одиночных капель жидкости u_d : 1 – при $R_d \approx 1,5$ мм, 2 – при $R_d \approx 2$ мм, 3 – при $R_d \approx$

Показано, что при варьировании u_d от 0,8 до 1,4 м/с значение интегрального параметра ΔR для капель с начальными размерами $R_d = 1,5-3$ мм изменяется на 4–5 %. Несколько (1–2 %) более значительное влияние начальных скоростей движения одиночных капель (рис. 3.4.4) по сравнению с каплями распыленной жидкости (рис. 3.4.2, 3.4.3) можно объяснить тем, что более существенно меняются условия теплообмена одиночной капли с внешней газовой средой при ее ускорении [175]. Результаты экспериментальных исследований закономерностей испарения одиночных капель хорошо согласуются с теоретическими зависимостями [146, 147, 221] и основными заключениями [61, 154].

Для приведенных на рис. 3.4.4 зависимостей также получены аппроксимационные выражения, позволяющие оценить изменение размеров одиночных капель при варьировании их начальной скорости:

$$\Delta R = 10,58u_d^{-0,617} \text{ при } R_d = 1,5 \text{ мм, } 0,5 < u_d < 2,5 \text{ м/с;} \quad (3.4.6)$$

$$\Delta R = 6,4665u_d^{-1,055} \text{ при } R_d = 2 \text{ мм, } 0,5 < u_d < 2,5 \text{ м/с;} \quad (3.4.7)$$

$$\Delta R = 4,028u_d^{-1,597} \text{ при } R_d = 3 \text{ мм, } 0,5 < u_d < 2,5 \text{ м/с.} \quad (3.4.8)$$

Проведенные эксперименты показали, что изменение начальной скорости перемещения капель распыленной жидкости в диапазоне 0,8–1,4 м/с при прохождении пламени высотой около 1 м не оказывает значительного влияния на полноту их испарения (изменение параметра ΔR не превышает 4 %). В тоже время, в результате экспериментов установлено, что при небольших скоростях движения капель имеет место явление частичного или даже полного разворота группы малых по размерам капель распыленной жидкости на входе в пламя и их последующего уноса высокотемпературными продуктами сгорания (т.е. возможно существенное изменение траектории движения и относительной объемной концентрации капель). Выявленный эффект особенно важен при высоких

встречных скоростях газового потока, характерных, например, для пожаров на открытых достаточно больших площадях (в частности, лесных). Так, установлено, что относительно небольшая начальная скорость (менее 0,5 м/с) распыленной жидкости приводит к уносу его существенной части (до 40 %) восходящими продуктами сгорания (при их скоростях около 2–3 м/с – типичных для возгораний и пожаров в помещениях [119, 222, 223]) еще на входе в зону пламени. При этом высока вероятность также уноса определенной массы жидкости при наличии «вдува» по поперечному направлению (например, при работе вентиляционных систем). Как следствие, значение $u_m=0,5$ м/с можно считать нижней границей возможного диапазона изменения скоростей распыления жидкости в системах пожаротушения помещений при соответствующей степени дисперсности последней (рис. 3.4.2, 3.4.3). Экспериментальные исследования показали, что при начальных скоростях газопарокапельного потока более 5 м/с возможна реализация условий, при которых вся масса тушащего состава проходит через пламя, практически не испарившись. Таким образом, возрастает влияние начальной скорости распыления жидкости в зоне пламени на интенсивность испарения. Полученные аппроксимационные выражения для приведенных на рис. 3.4.2 и 3.4.3 зависимостей могут быть использованы при оценке параметров настройки типичных распылительных систем пожаротушения, а также при разработке и проектировании новых.

Анализируя зависимости $\Delta R=f(R_m)$, $\Delta R=f(u_m)$ и $\Delta R=f(u_d)$ и результаты [213, 224] можно заключить, что определяющее влияние на характеристики испарения как одиночных, так и большой совокупности капель распыленной жидкости оказывают их начальные размеры. Эксперименты показали, что можно обеспечить условия, при которых даже относительно небольшое (15–20 %) изменение размеров капель воды приводит к росту ΔR в несколько раз при адекватных значениях u_m и u_d . Изменение же начальных скоростей u_m и u_d в несколько раз приводит к умеренным отклонениям ΔR (рис. 3.4.2, 3.4.3). Поэтому можно сделать вывод о целесообразности учета возможных диапазонов

изменений u_m и R_m при разработке, проектировании, настройке и эксплуатации распылительных устройств в системах высокотемпературной очистки воды [49-51], при подаче капельного потока для охлаждения в градирнях ТЭС [4-16], а также в системах полидисперсного пароводяного пожаротушения [119, 194]. Использование полученных аппроксимационных выражений (3.4.1-3.4.8) позволит существенно интенсифицировать процессы теплообмена между водными каплями и газовой средой.

3.5. Исследование закономерностей испарения капель воды с примесями солей

Для исследования влияния примеси солей [225-229] на интегральные характеристики испарения капель воды применялась рабочая жидкость, представляющая воду с примесью NaCl. Относительная массовая концентрация NaCl (γ) в воде варьировалась в диапазоне 0–10 %.

В потоке распыленной жидкости размеры капель изменялись в диапазоне $0,04 \leq R_m \leq 0,4$ мм. При обработке видеogramм для оценки изменения интегральных характеристик испарения капель последние условно разделены по размерам на пять групп: 1 – $0,04 \leq R_m \leq 0,09$ мм; 2 – $0,09 < R_m \leq 0,16$ мм, 3 – при $0,16 < R_m \leq 0,23$ мм, 4 – при $0,23 < R_m \leq 0,3$ мм, 5 – при $0,3 < R_m \leq 0,4$ мм.

В результате серии экспериментов (при варьировании доли солей в воде γ в диапазоне 0–10 %) получены видеogramмы с изображениями капель распыленной жидкости на входе и выходе из пламенной зоны горения, а также соответствующие им поля скоростей «трассирующих» частиц в области движения двухфазного парожидкостного потока.

В процессе обработки видеogramм вычислялись значения характерных размеров капель R_m , их концентрации α_m в зоне высокотемпературных газов, а также скоростей движения u_m . В данном разделе основное внимание уделено

отличиям полноты испарения «соленых» (γ до 10 %) и «пресных» ($\gamma=0$ %) вод в высокотемпературной газовой среде.

На рис. 3.5.1 и 3.5.2 приведены зависимости параметра ΔR от среднего начального характерного размера R_m для выделенных согласно экспериментальной методике групп капель воды при варьировании параметра γ .

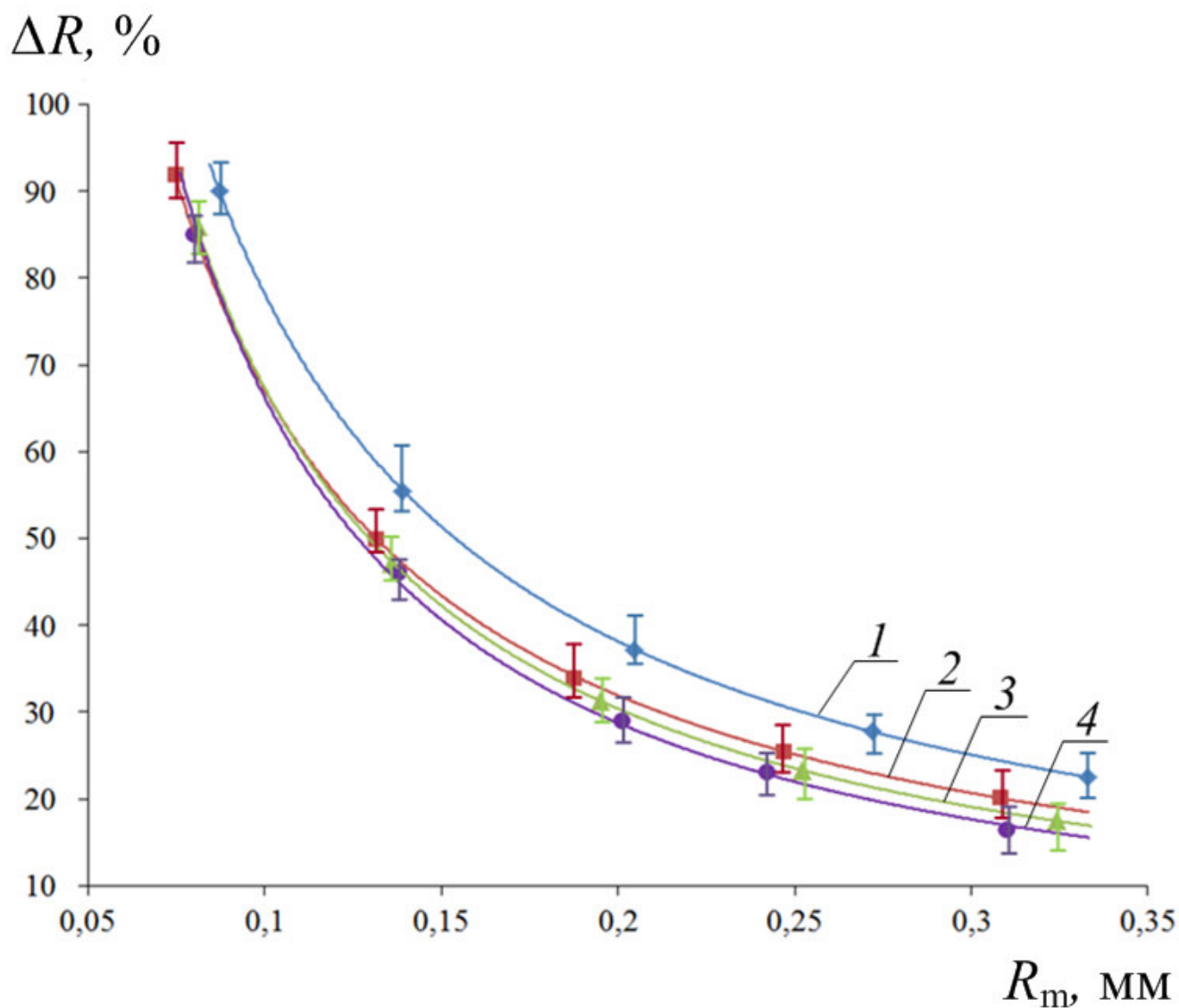


Рисунок 3.5.1. Зависимости параметра ΔR от начального размера капель R_m :

1 — при $\gamma=0$ %, 2 — при $\gamma=2,5$ %, 3 — при $\gamma=5$ %, 4 — при $\gamma=10$ %

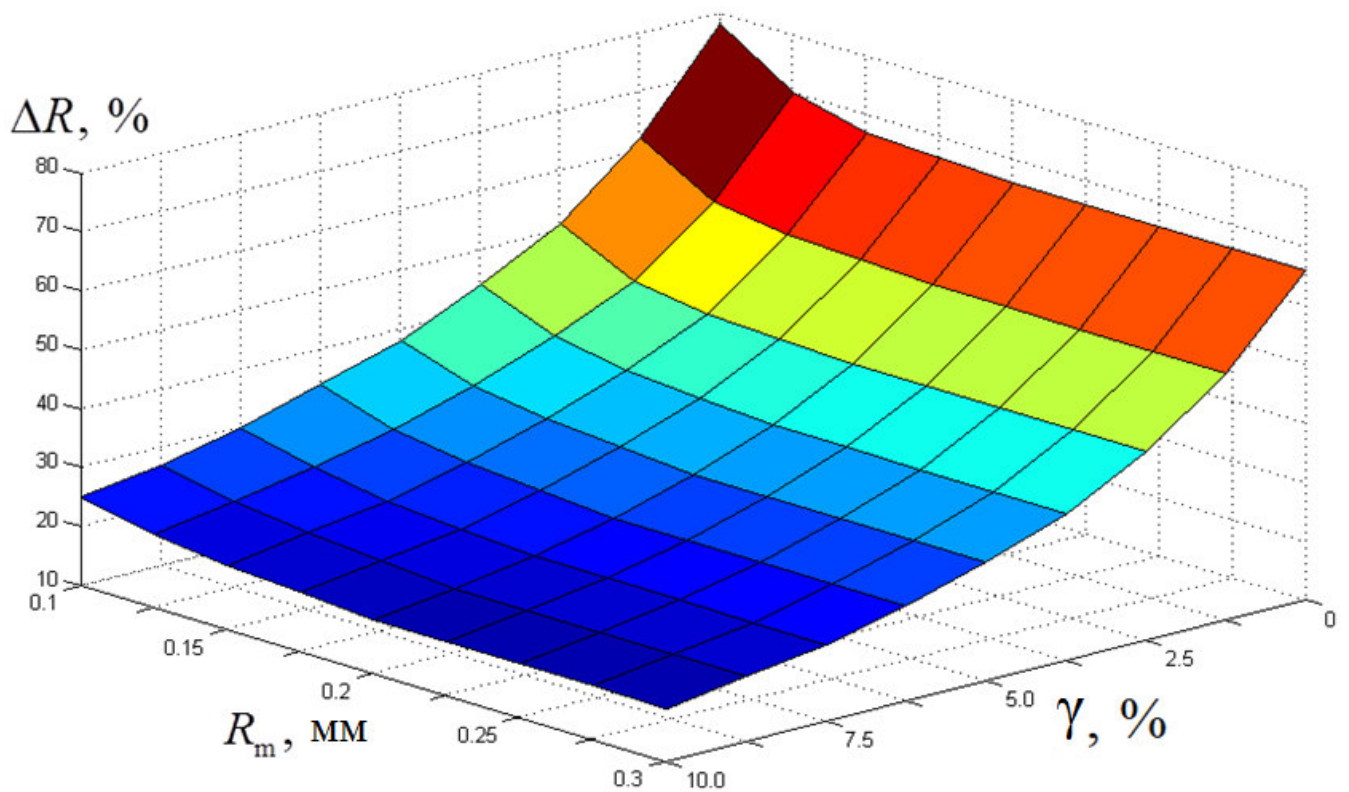


Рисунок 3.5.2. Зависимость параметра ΔR от начального размера R_m капель и доли солей γ

Видно, что при $R_m < 0,4$ мм влияние солей на интегральные характеристики парообразования (как следствие, убыли массы жидкости) незначительно (отличие параметра ΔR при изменении γ от 0 до 10 % не превышает 6 %). Для кривых 1–4, приведенных на рис. 3.5.1, получены следующие аппроксимационные выражения:

$$\Delta R = 7,228 \cdot R_m^{-1,032} \text{ при } \gamma = 0 \text{ \%}; \quad (3.5.1)$$

$$\Delta R = 5,742 \cdot R_m^{-1,061} \text{ при } \gamma = 2,5 \text{ \%}; \quad (3.5.2)$$

$$\Delta R = 4,768 \cdot R_m^{-1,145} \text{ при } \gamma = 5 \text{ \%}; \quad (3.5.3)$$

$$\Delta R = 4,659 \cdot R_m^{-1,155} \text{ при } \gamma = 10 \text{ \%}. \quad (3.5.4)$$

Можно сделать вывод не только о малых отклонениях, приведенных на рис. 3.5.1 кривых 1–4, но и о незначительных отличиях коэффициентов аппроксимационных выражений (3.5.1)–(3.5.4).

На рис. 3.5.3 приведена зависимость параметра ΔR от относительного содержания примесей NaCl в рабочей жидкости для монокристаллических больших капель с $R_m \approx 2,9$ мм. Установлено, что значения параметра ΔR при изменении γ в диапазоне от 0 до 10 % также меняется в пределах 6 %.

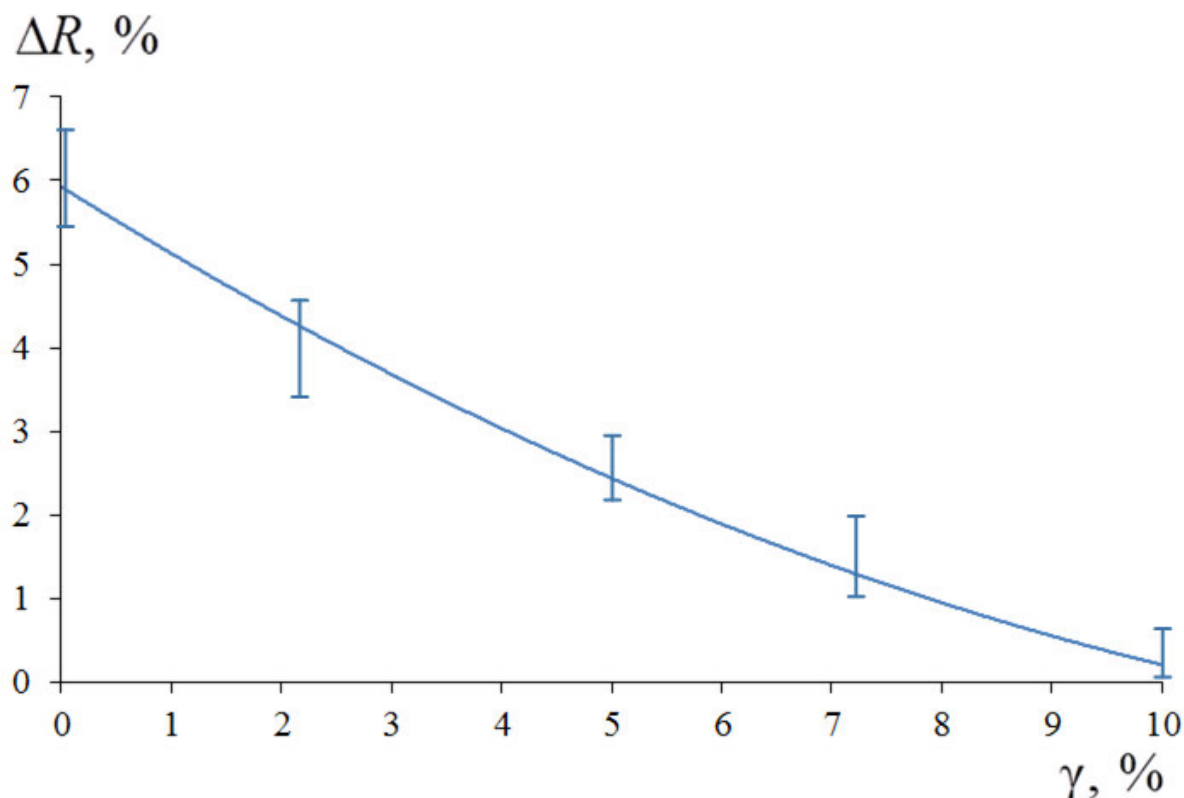


Рисунок 3.5.3. Зависимость параметра ΔR от доли солей γ для одиночных капель с начальным средним радиусом $R_m \approx 2,9$ мм

Выявленные закономерности процессов испарения распыленной и нераспыленной воды с типичным содержанием солей можно объяснить значительным [200, 230, 231] отличием теплофизических характеристик (в первую очередь, теплоемкости и теплопроводности) водяных капель и капель воды с включениями NaCl. Установлено, что повышение относительной концентрации соли в воде приводит к снижению характеристик испарения. Этот результат можно объяснить достаточно сложным влиянием большой группы факторов. В частности, теплоемкость воды с частицами NaCl, как системы

«H₂O+NaCl»), ниже воды без включения соли. При добавлении наночастиц NaCl в воду изменяется не только теплоемкость, но и теплопроводность, а также плотность. Вследствие добавления соли в воду возрастает доля энергии внешней среды, проходящая вглубь капли. Как следствие, увеличивается толщина прогретого слоя капли. Этот эффект должен приводить к ускорению процесса прогрева и испарения капли. Однако частицы NaCl растворяются в воде и интегральные характеристики процессов испарения системы «H₂O+NaCl»), как и любого раствора, существенно зависят от межмолекулярных связей. Молекулы воды связываются с ионами соли. Происходит процесс гидратации. Известно, что связь между молекулами воды слабее, чем связь, образовавшаяся в результате гидратации. Поэтому молекула пресной воды при более низкой температуре быстрее испаряется. А для того, чтобы молекула воды с растворенной солью разорвала связь с соседними молекулами, требуется больше энергии. Поэтому система «H₂O+NaCl») испаряется медленнее, чем вода без соли. С ростом концентрации γ энергия анализируемых межмолекулярных связей возрастает. В целом анализ установленных закономерностей позволяет сделать вывод о том, что процессы испарения капель без включений и с твердыми нерастворяемыми включениями (например, углеродистыми частицами) существенно проще с точки зрения объяснения влияния возможных факторов. Для растворов определяющее влияние помимо теплофизических свойств могут иметь и различные аспекты молекулярной физики (особенно в условиях нестационарного нагрева и фазовых превращений).

Выявленные макроскопические закономерности позволяют оценить влияние солесодержания в воде на интенсивность фазовых превращений. В частности, для интенсификации процессов теплообмена в системах высокотемпературной очистки воды [49-51] или пожаротушения [119, 194] можно, в первую очередь, рекомендовать мелкодисперсную подачу воды, так как без специального распыления характеристики испарения «соленой» и «пресной» воды существенно отличаются.

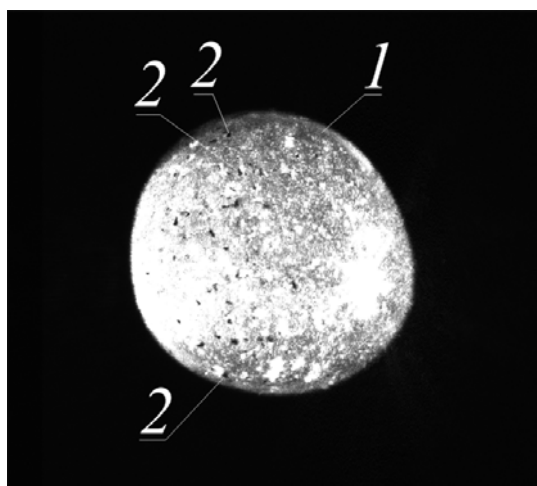
3.6. Анализ интегральных характеристик испарения неоднородных (с твердыми инородными включениями) капель воды

В данном разделе приведены результаты экспериментальных исследований процессов испарения капель жидкости, содержащих в своем составе твердые включения [232].

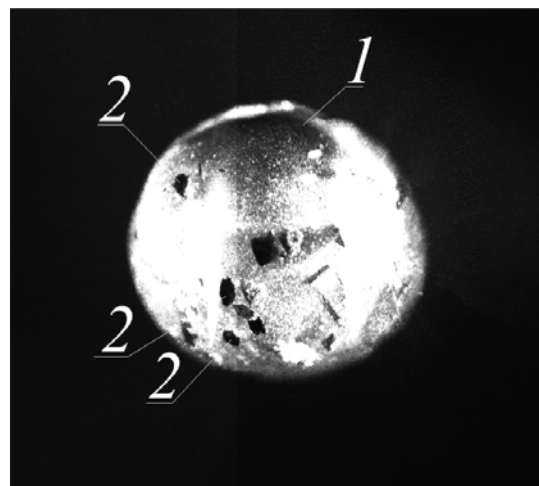
Проведенные опыты с типичными неметаллическими (углерод) и металлическими (алюминий) включениями показали, что их распределения в каплях воды при равной относительной массовой концентрации и достаточно малых (около 50 мкм) размерах частиц существенно отличаются. Так, для металлических частиц при значительно (в несколько раз) большей плотности относительно воды наблюдались процессы «осаждения» включений в каплях. Формировались общие центры твердых включений в малой окрестности поверхности капель. Происходила существенная деформация поверхности капель и их последующее разрушение (дробление). Установлено, что при снижении плотности твердых включений влияние выделенных эффектов ослабляется. Так, например, эксперименты показали, что для неметаллических частиц (углеродистых) при варьировании их размеров L_m и относительной концентрации γ_c в широких диапазонах ($50 < L_m < 500$ мкм, $0 < \gamma_c < 1$ %) можно реализовать достаточно равномерное распределение включений в каплях размерами более 1 мм.

На рис. 3.6.1 приведены типичные видеогаммы с изображением одиночных капель воды (условные радиусы $R_d \approx 3$ мм) и твердых включений (углеродистые частицы размерами от 50 мкм до 500 мкм). Видно (рис. 3.6.1, б и в), что при $L_m > 200$ мкм частицы в форме неправильных многоугольников хаотичным образом ориентированы относительно друг друга, но достаточно равномерно распределены в каплях жидкости. Это, в первую очередь, можно объяснить их перемещениями в каплях воды вследствие конвекции. При $L_m \leq 70$ мкм следует

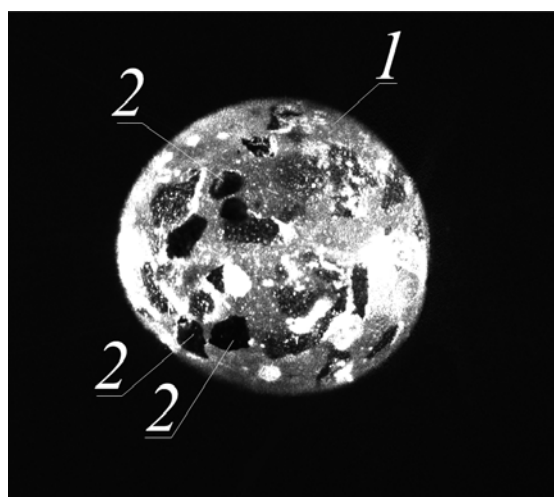
отметить достаточно равные удаления частиц относительно друг друга и близкие формы последних (рис. 3.6.1, *a*).



a



б



в

Рисунок 3.6.1. Видеограммы одиночных капель жидкости ($R_d \approx 3$ 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

На рис. 3.6.2 представлена зависимость параметра ΔR от относительной массовой концентрации углеродистых частиц в каплях воды (γ_C) с условным

начальным радиусом $R_d \approx 3$ мм (характерный размер включений L_m варьировался в диапазоне 50–70 мкм).

Установлено (рис. 3.6.2), что с ростом γ_C от 0 до 1 % существенно (почти в 3 раза) увеличивается параметр ΔR (как следствие, значительно возрастает доля испарившейся жидкости и интенсивность парообразования) при движении капель воды через высокотемпературную газовую среду. Этот эффект можно объяснить тем, что при даже относительно небольшом увеличении γ_C в несколько раз возрастает теплопроводность неоднородной системы «капля воды – твердые включения». Как следствие, значительно снижается время, необходимое для прогрева приповерхностного слоя капли воды и последующего эндотермического фазового превращения.

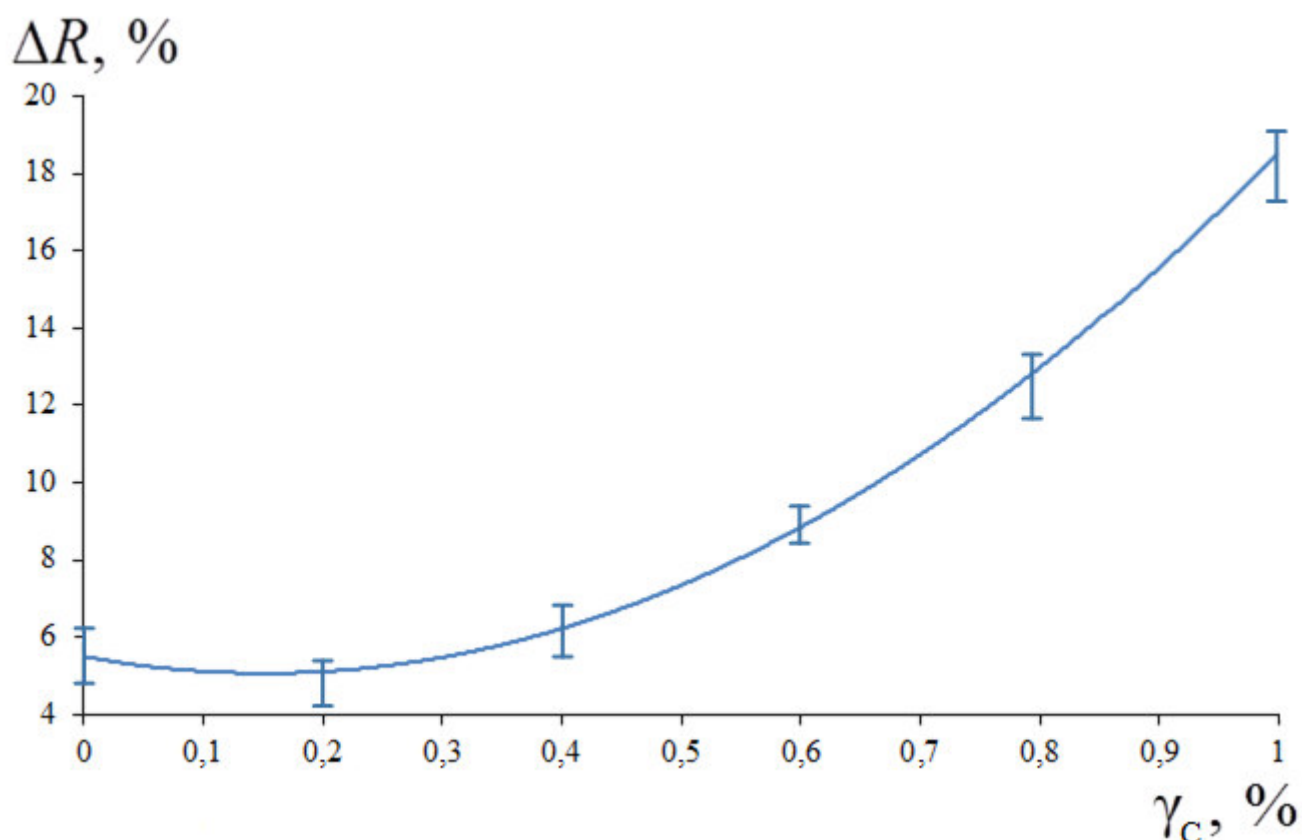


Рисунок 3.6.2. Зависимость параметра ΔR от относительной массовой концентрации углеродистых частиц γ_C для капель с $R_d \approx 3$ мм (средний размер углеродистых частиц $L_m = 50\text{--}70$ мкм)

При движении капля воды с твердыми включениями через высокотемпературные газы (продукты сгорания) прогрев жидкости происходит с реализацией кондуктивного, конвективного и радиационного механизмов теплопереноса (в экспериментах наблюдались перемещения частиц в каплях и их «свечение»). Твердые включения поглощают существенно больше энергии излучения (продуктов сгорания) по сравнению с водой. Возрастает теплота, аккумулируемая в системе «капля воды – твердые включения». В малой окрестности твердых включений формируются локальные области фазовых превращений. Это, в свою очередь, приводит к перемещению как твердых включений, так и непосредственно слоев жидкости внутри капля – интенсифицируется конвективный теплоперенос.

При увеличении размеров твердых включений в каплях влияние выделенных эффектов на интенсивность прогрева жидкости существенно возрастает. Так, на рис. 3.6.3 приведена зависимость параметра ΔR от характерного среднего размера углеродистых частиц L_m для одиночных капель с условным радиусом $R_d \approx 3$ мм. Показано, что при средних размерах частиц $L_m = 50\text{--}70$ мкм величина параметра ΔR составляет 7,6 %, при $L_m = 250\text{--}300$ мкм – 9,1 %, при $L_m = 450\text{--}500$ мкм – 12,9 %. На рис. 3.6.2 и 3.6.3 можно отметить хорошую повторяемость результатов опытов.

Также проведены эксперименты для установления предельных значений размеров твердых включений в каплях жидкости, приводящих к разрушению (разрыву) последних. Размеры каплей жидкости выбирались адекватными технологиям [119, 194, 223, 233-238] (от нескольких десятков до сотен микрометров), предполагающим использование «тонкораспыленной» воды. Выявлено, что, например, для каплей с условными средними радиусами $R_m=0,1\text{--}0,15$ мм при прохождении высокотемпературного газового канала высотой 1 м предельные значения L_m составляют 60–70 мкм. Установленный эффект иллюстрирует, 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 в зоне пламени размеры входящих в их состав твердых частиц должны варьироваться в пределах 50–70 % от размеров капель. Установленные особенности достаточно хорошо согласуются с основными заключениями современной теории газопарокапельных потоков [196].

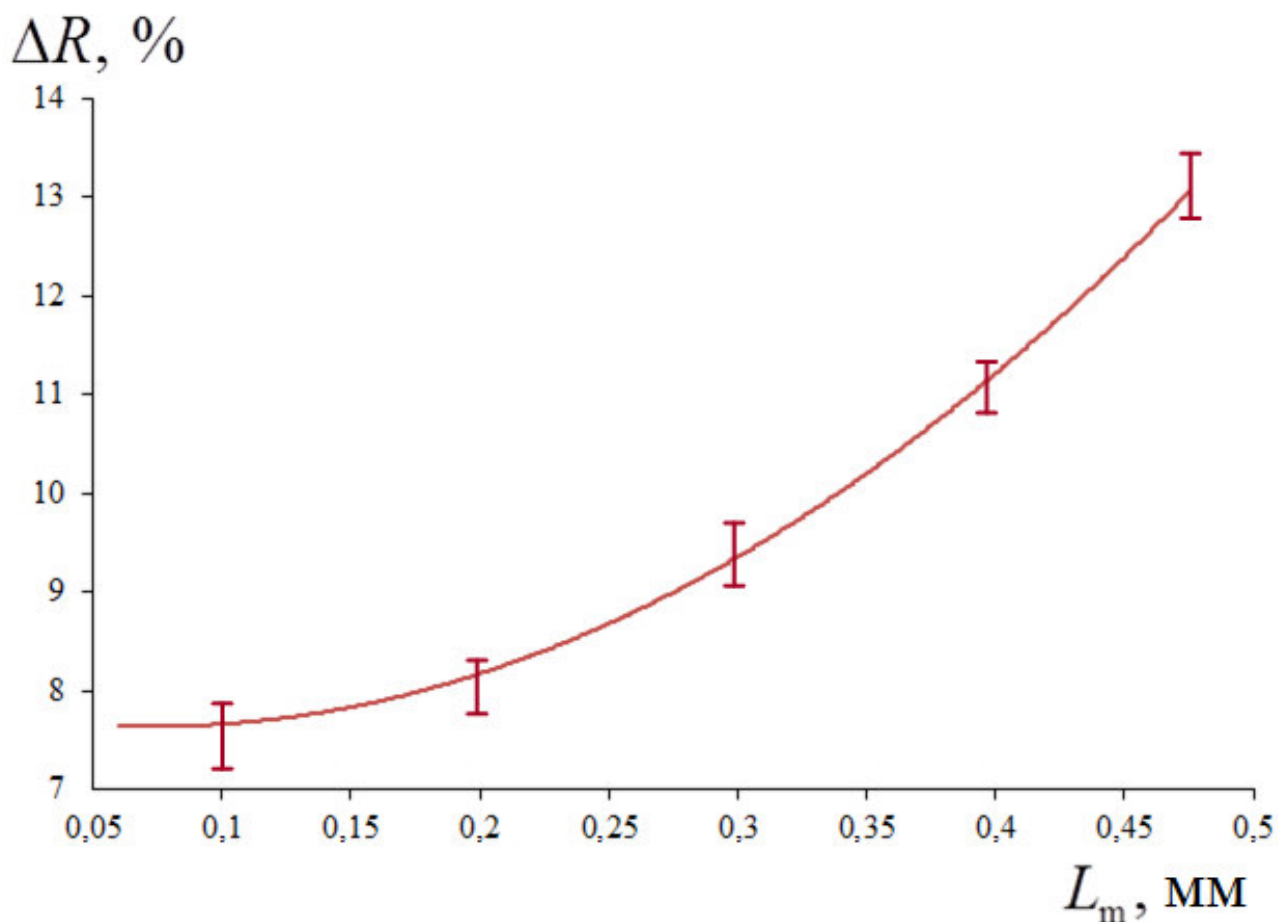


Рисунок 3.6.3. Зависимость параметра ΔR от характерного среднего размера углеродистых частиц L_m для капель с $R_d \approx 3$ мм ($\gamma_C=0,5$ %)

Для кривых, приведенных на рис. 3.6.2, 3.6.3, получены следующие аппроксимационные выражения:

$$\Delta R = 18,786 \cdot \gamma_C^2 - 5,6903 \cdot \gamma_C + 5,5033 \text{ при } L_m=50-70 \text{ мкм и } R_d \approx 3 \text{ мм; } (3.6.1)$$

$$\Delta R = 33,667 \cdot L_m^2 - 4,9936 \cdot L_m + 7,8271 \text{ при } \gamma_c = 0,5 \% \text{ и } R_d \approx 3 \text{ мм.} \quad (3.6.2)$$

Выявленные эффекты можно использовать для интенсификации процессов испарения локально «сброшенной» (подаваемой) в зону горения жидкости. Так, например, при относительно небольшой концентрации твердых включений (до 1 %) не требуется существенное измельчение капель жидкости. Целесообразна лишь порционная подача последней. За счет кондуктивного, конвективного и лучистого теплообмена капли движущейся в виде определенных порций («слоев») жидкости будут деформироваться и разрушаться. Как следствие, будет формироваться парок капельное облако. Эффективность воздействия таких неоднородных многофазных смесей по сравнению с монолитной водой обоснована многочисленными исследованиями, например, [119, 194, 223, 233-238].

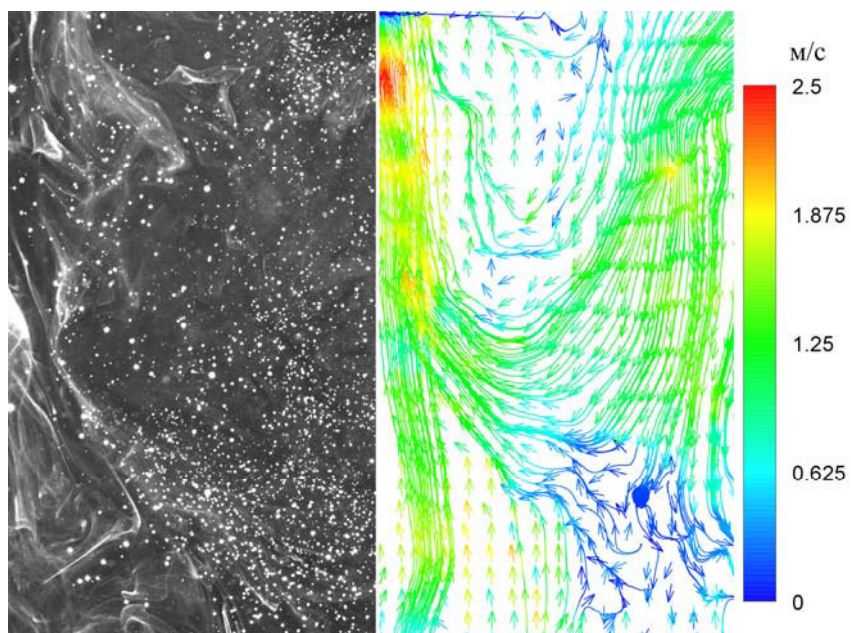
Результаты выполненных экспериментов позволяют сделать вывод о существенном влиянии на характеристики процессов теплообмена компонентного состава подаваемой в зону высокотемпературных газов воды. В частности, в практике пожаротушения при заборе жидкости из водоемов воздушными судами возможна реализация условий, при которых в тушащем веществе будут находиться различные по физической природе твердые включения. Их относительная концентрация может существенно превышать $\gamma_c = 1$ %. В этом случае очень сложно прогнозировать последствия, контролировать процесс тушения пожара и повысить его эффективность. Поэтому при заборе воды целесообразно уделять особенное внимание возможным инородным включениям в ее составе. Кроме того для таких технологий, как термическая очистка воды [49-51], специализированное введение в состав воды твердых включений способно ускорить процесс прогрева и испарения капель, что приведет к сокращению энерго- и ресурсозатрат.

3.7. Особенности испарения и перемещения капель воды во встречном потоке высокотемпературных газов

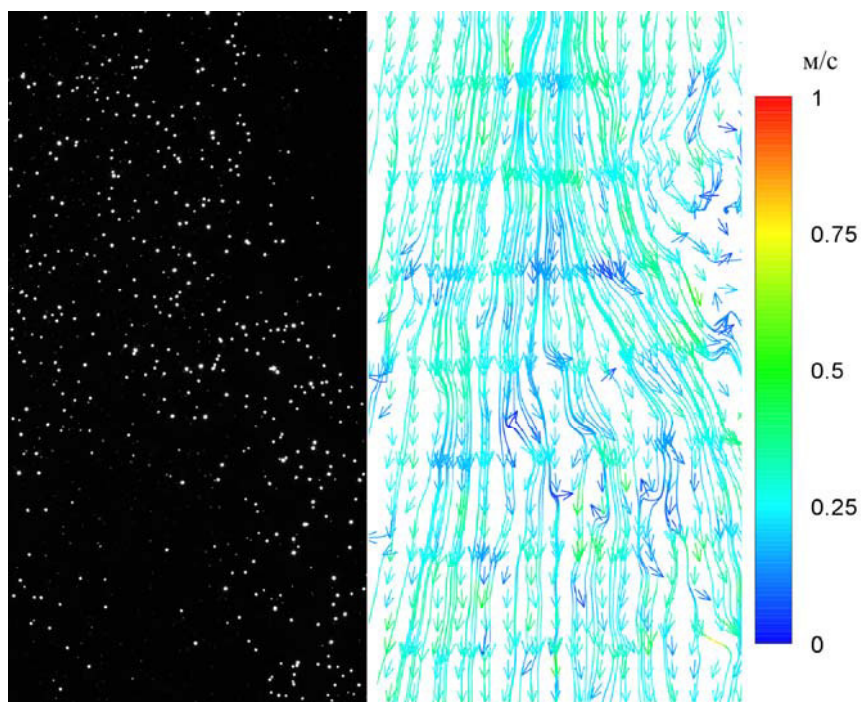
Проведены экспериментальные исследования перемещения потока распыленной жидкости во встречном потоке высокотемпературных газов [239]. Аналогично вышеописанным экспериментам (рис. 2.2.1) для формирования высокотемпературной газовой среды с контролируемыми параметрами использовался вертикальный цилиндрический канал (высота 1 м, внутренний диаметр 0,2 м). В основании этого канала устанавливалась горелка с варьируемой скоростью вдува ($0,1 < u_g < 2$ м/с) высокотемпературных (1070 ± 30 К) продуктов сгорания (газов). При обработке полученных видеogramм капли условно разделялись (по начальным размерам) на несколько групп: 1 – $0,01 \leq R_m < 0,08$ мм, 2 – $0,08 \leq R_m < 0,16$ мм, 3 – при $0,16 \leq R_m < 0,23$ мм, 4 – при $0,23 \leq R_m < 0,3$ мм, 5 – при $0,3 \leq R_m \leq 0,4$ мм.

В процессе проведения экспериментов регистрировались видеоизображения совокупности капель распыленной жидкости на входе и выходе из высокотемпературного канала (рис. 3.7.1). Видно, что при движении через газы существенно изменяются траектории перемещения капель жидкости (рис. 3.7.1). Чем меньше значения u_m , тем более существенно изменяются траектории рассматриваемых капель. Следует отметить, что на входе в высокотемпературную область (рис. 3.7.1, а) реализуются более интенсивные завихрения по сравнению с выходом (рис. 3.7.1, б). Полученный результат обусловлен тем, что на входе в высокотемпературную газовую среду в потоке распыленной жидкости движутся капли с радиусами от 10 мкм до 500 мкм. Траектории движения малых по размерам капель ($R_m < 150$ мкм) меняются (рис. 3.7.1) существенно. На выходе из высокотемпературного канала вследствие интенсивного испарения жидкости движется значительно меньшее число капель (относительно крупные по начальным размерам). Так как действие высокотемпературных газов на эти капли

минимально на выходе из канала, то последние движутся по траекториям, совпадающим с вектором массовых сил (рис. 3.7.1, б).



a



б

Рисунок 3.7.1. Видеограммы совокупности капель жидкости и поля скоростей «трассирующих» частиц на входе (*a*) и выходе (*б*) из высокотемпературного канала при $u_g \approx 1$ м/с и $u_m \approx 1,5$ м/с

Установлено значительное изменение концентрации (α_m) рассматриваемых групп капель относительно начальных ($\alpha_m=1$ для всей совокупности капель в регистрационной области видеокadra). Так, концентрация α_m капель групп 3–5 на выходе из канала с высокотемпературными газами составляет около 0,85, для групп 1 и 2 соответственно $\alpha_m \approx 0,15$. На входе же в канал концентрация α_m капель групп 1 и 2 составляет около 0,5.

На рис. 3.7.2 представлена типичная видеограмма проведенных экспериментов с изображением капель полидисперсного водяного потока в процессе смешения с высокотемпературными продуктами сгорания. Также приведено поле скоростей «трассеров», соответствующих каплям воды и газам (обозначены продольные относительно направления движения капель компоненты скорости U_y).

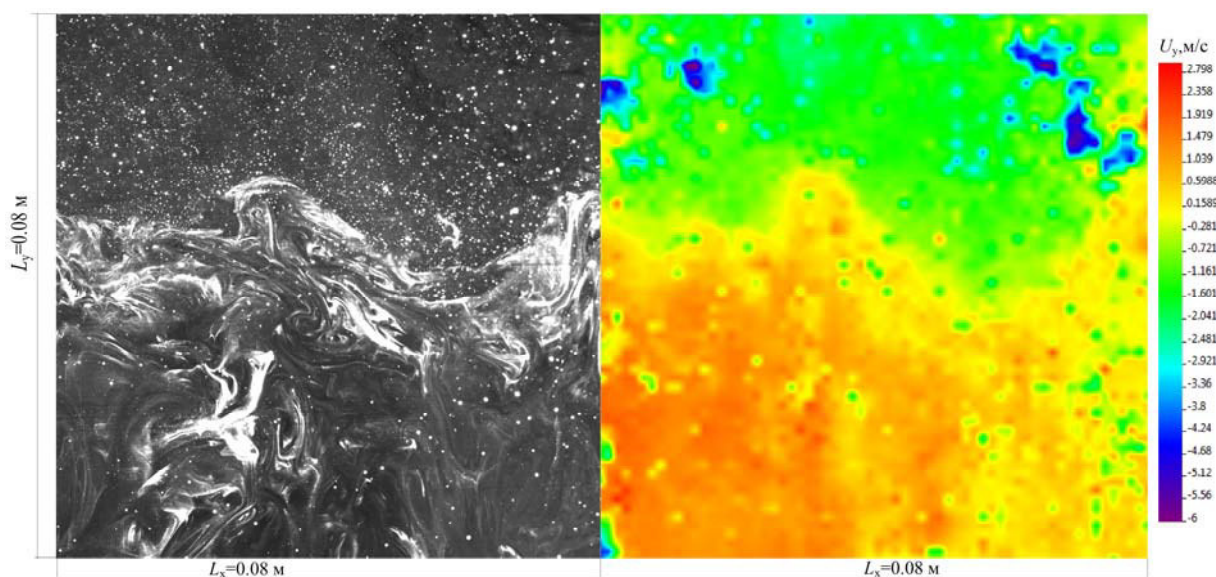


Рисунок 3.7.2. Видеограмма и поле скоростей «трассеров» при смешении полидисперсного капельного потока с газами ($u_m \approx 2$ м/с, $u_g \approx 3$ м/с)

Достаточно хорошо видна область интенсивного смешения и формирования вихрей на видеограмме (рис. 3.7.2). Также следует отметить существенно неравномерные профили скоростей. Эти результаты обусловлены

полидисперсностью капельного потока и существенно отличающимися скоростями испарения жидкости. В частности, установлено, что капли размерами менее 100 мкм интенсивно испаряются и практически в полном объеме уносятся восходящим газовым потоком [211]. Капли размерами 300–500 мкм испаряются несущественно, несмотря на высокие температуры газов, и проходят через области вихреобразований (на рис. 3.7.2 видны единичные крупные капли в зоне продуктов сгорания). Группы капель размерами от 100 мкм до 300 мкм непосредственно и формируют вихревые структуры (рис. 3.7.2) в области высокотемпературных газов.

Установлено [211], что при $R_m < 170$ мкм параметр ΔR достигает практически 1 (т.е. капли полностью испаряются в потоке газов). Для капель размерами $170 < R_m < 300$ мкм параметр ΔR составляет около 0,7. При $R_m = 500$ мкм параметр ΔR уменьшается до 0,2. Эксперименты показали, что с ростом ΔR существенно снижаются скорости движения капель через высокотемпературные газы. Возрастают характерные размеры паровых слоев в «пристенной» области каждой капли. Как следствие, увеличивается действие сил сопротивления их движению.

Выявлено, что для начальных значений $\alpha_m = 0,44$ при $R_m < 170$ мкм, $\alpha_m = 0,41$ при $170 < R_m < 300$ мкм и $\alpha_m = 0,15$ при $300 < R_m < 500$ мкм после смешения с высокотемпературными газами дисперсность капельного потока характеризуется следующими значениями α_m : 0 при $R_m < 170$ мкм, 0,31 при $170 < R_m < 300$ мкм и 0,69 при $300 < R_m < 500$ мкм. Этот результат также позволяет оценить влияние размеров капель на условия их перемещения во встречном потоке газов в условиях интенсивных фазовых превращений (высока вероятность интенсивного испарения капель малых размеров и уноса их оставшейся массы газами).

В результате варьирования скоростей движения капель полидисперсного водяного потока установлено влияние u_m на траектории перемещения капель во встречном потоке газов. При $u_m \approx u_g$ в рассматриваемой области смешения потоков существенно меньшая доля капель жидкости (только при $R_m < 170$ мкм) изменяет направление своего движения относительно начального на противоположное. При

начальном соотношении $u_m > u_g$ от 70 % до 90 % капель (даже с размерами $R_m < 170$ мкм) сохраняют направления движения, соответствующие их вводу в высокотемпературную газовую среду. При этом с ростом размеров R_m число таких капель нелинейно увеличивается.

Определены значения скоростей капель жидкости, которые имеют последние при смешении с высокотемпературным газовым потоком. Это позволило установить предельные скорости газов (при которых водяные капли разных размеров уносятся продуктами сгорания): $u_g^{\text{lim}} = 0,25$ м/с при $R_m = 40\text{--}90$ мкм; $u_g^{\text{lim}} = 0,35$ м/с при $R_m = 90\text{--}160$ мкм; $u_g^{\text{lim}} = 0,7$ м/с при $R_m = 160\text{--}230$ мкм; $u_g^{\text{lim}} = 1,05$ м/с при $R_m = 230\text{--}300$ мкм. Полученные значения представляют интерес для одного из важнейших в теплоэнергетике практических приложений газопарокапельных смесей – высокотемпературной очистки технической воды от примесей и инородных включений с использованием эффектов интенсивных фазовых превращений [49-51].

Для обобщения результатов исследования влияния размеров (R_m) капель, скоростей последних (u_m) и встречного движения газов (u_g), построена безразмерная зависимость, представленная на рис. 3.7.3. Используются следующие безразмерные параметры:

$$\text{Re}_d = \frac{2 \cdot u_m R_m}{\nu_g}, \quad \text{Re}_g = \frac{2 \cdot u_g R_c}{\nu_g},$$

где ν_g – кинематическая вязкость газов ($\nu_g = 1,3 \cdot 10^{-5}$ м²/с), R_c – характерный поперечный размер (радиус) цилиндрического канала с высокотемпературными газами ($R_c = 0,15$ м).

При вычислении значений Re_d и Re_g использовались начальные (до смешения) значения u_m и u_g . Максимальные значения этих безразмерных критериев для условий проведенных экспериментов составили: $\text{Re}_d^{\text{max}} \approx 170$ и $\text{Re}_g^{\text{max}} \approx 45000$.

При параметрах (R_m , u_m , u_g) газопарокапельной среды, соответствующих области выше кривой, приведенной на рис. 3.7.3, траектории движения капель

жидкости изменяются несущественно относительно начальных при вхождении во встречный поток высокотемпературных газов. Область под кривой характеризует режим, при котором капли изменяют направление своего движения на противоположное при смешении с газами. При параметрах, соответствующих непосредственно полученной кривой, для капель характерен «переходный» режим, при котором их скорости в потоке газов близки к нулю. Происходит кратковременное (менее 0,1 с) «зависание» капель. В последующем возможно как продолжение движения капель навстречу газовому потоку, так и изменение направления их перемещения на противоположное. Установлено, что эти процессы существенно зависят от коагуляции капель (рассмотрены в [143, 146]).

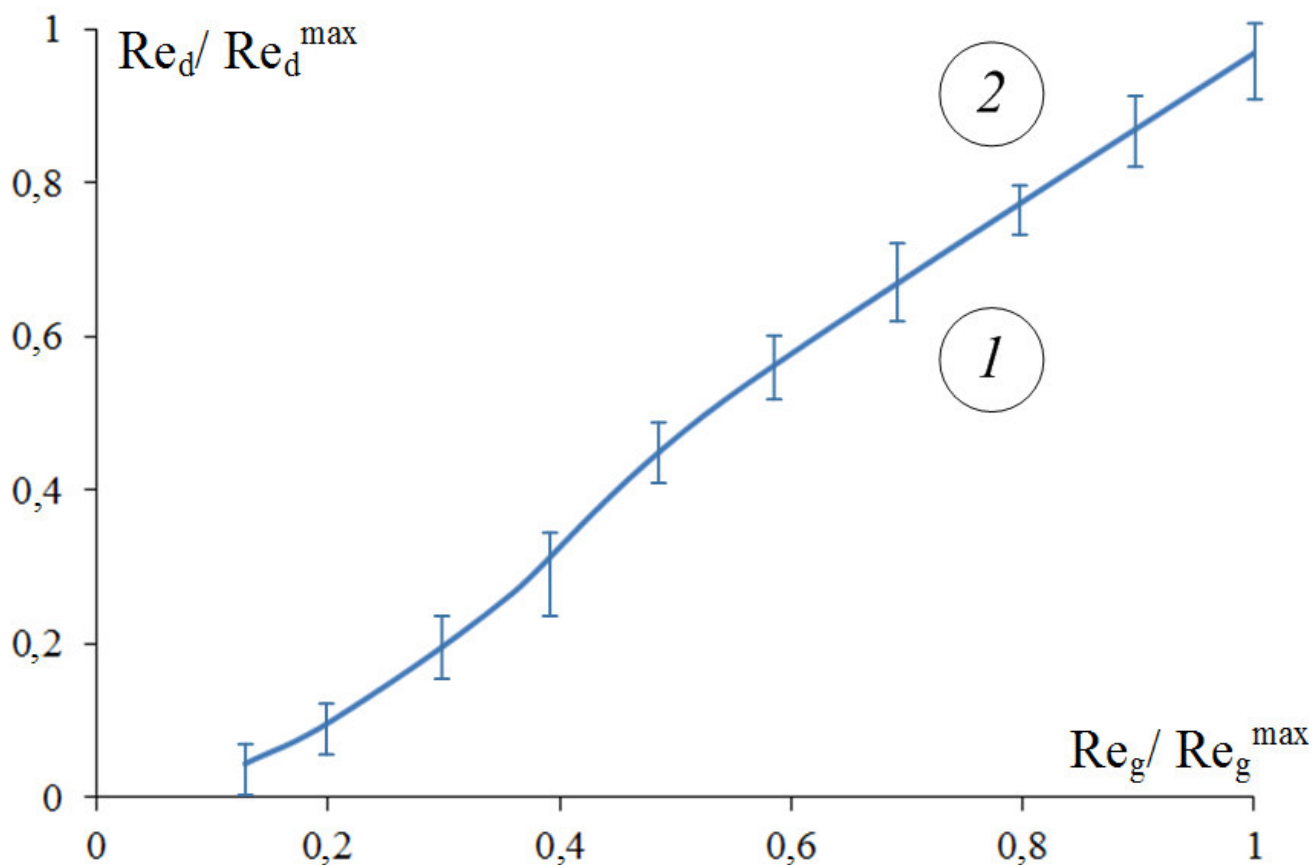


Рисунок 3.7.3. Характерные режимы перемещения капель полидисперсного потока в зоне смешения с высокотемпературными газами: 1 – унос газами, 2 – сохранение первоначального направления

Вид безразмерной зависимости, приведенной на рис. 3.7.3, можно объяснить нестационарным и нелинейным характером фазовых превращений в области высокотемпературных газов [204, 240-242], значительным влиянием «соседних» (перемещающихся последовательно и параллельно относительно друг друга) капель (особенно малых по размерам – $R_m < 0,15$ мм при их высокой доле в газовом потоке – $\alpha_m > 0,5$) на температуру и концентрацию газов [143, 146].

В результате анализа значений α_m , полученных в серии экспериментов, также установлено, что объемная концентрация капель на выходе из высокотемпературной области незначительно (менее 0,05) изменяется с ростом их начальных скоростей в диапазоне от 0,5 м/с до 2 м/с. При $u_m < 0,5$ м/с концентрация α_m меняется существенно (в несколько раз). Однако это вызвано не только интенсификацией парообразования, но и «торможением», а также последующим «уносом» доли капель газами. При $u_m > 2$ м/с значительно уменьшается время движения капель жидкости через высокотемпературную область. При ее ограниченных размерах существенно снижается время испарения. Как следствие, уменьшается массоприход паров жидкости в газовую фазу (с ростом u_m концентрация паров в канале нелинейно снижается (рис. 3.7.1, б)). Это приводит к небольшому изменению α_m и малым (менее 0,1) значениям ΔR .

На рис. 3.7.4 приведены зависимости скоростей движения капель жидкости u_m от скоростей газов u_g при различных R_m . Значения скорости капель $u_m < 0$ м/с соответствуют изменению направления их движения в высокотемпературной области на противоположное (совпадающее с вектором скорости u_g).

С использованием полученных видеogramм и полей скоростей (в частности, приведенных на рис. 3.7.1) установлено, что при разномасштабных вихреобразованиях на входе в высокотемпературную газовую среду малые ($R_m < 0,16$ мм) капли уносятся газами и сливаются с другими, поступающими сверху каплями (рис. 3.7.1). Вследствие этого происходит изменение направления их движения, и объединенные капли частично (как правило, 15–20 % от общего числа капель при начальных характерных размерах $0,2 \leq R_m < 0,5$ мм) проходят

через высокотемпературный канал. Эксперименты показали, что эти процессы реализуются циклически.

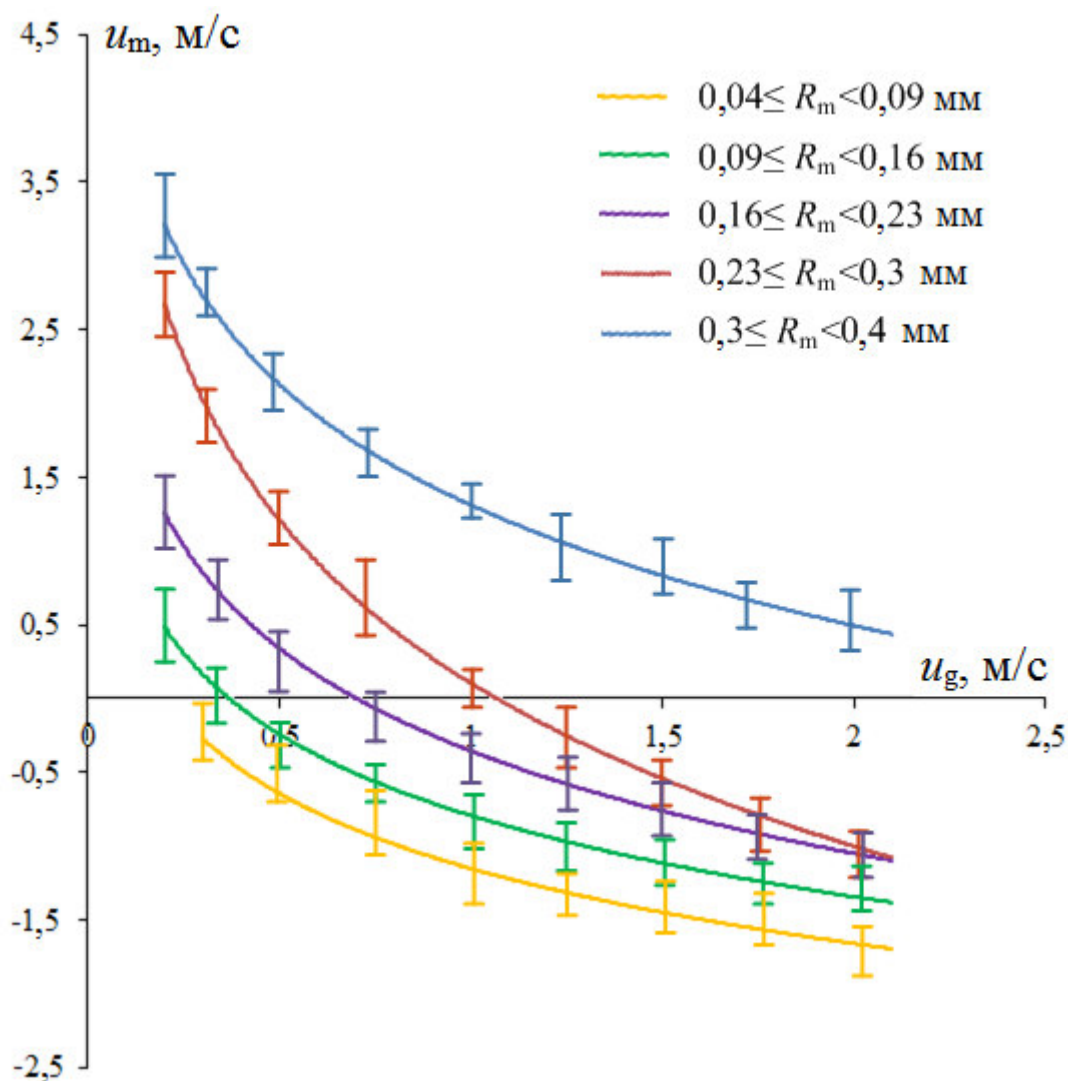


Рисунок 3.7.4. Зависимости скоростей капель жидкости u_m от значений u_g

Для кривых, приведенных на рис. 3.7.4, получены следующие аппроксимационные выражения:

$$u_m = -0,073 \cdot \ln(u_g) - 0,1152 \text{ при } 0,04 \leq R_m \leq 0,09 \text{ мм}; \quad (3.7.1)$$

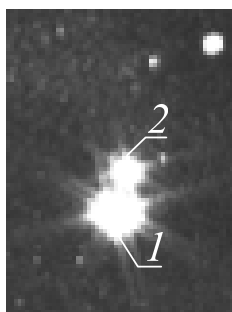
$$u_m = -0,079 \cdot \ln(u_g) - 0,0793 \text{ при } 0,09 < R_m \leq 0,16 \text{ мм}; \quad (3.7.2)$$

$$u_m = -0,1 \cdot \ln(u_g) - 0,0356 \text{ при } 0,16 < R_m \leq 0,23 \text{ мм}; \quad (3.7.3)$$

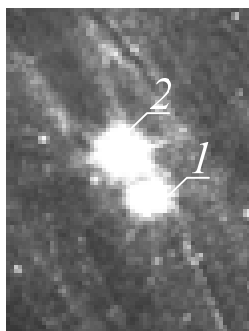
$$u_m = -0,159 \cdot \ln(u_g) + 0,0103 \text{ при } 0,23 < R_m \leq 0,3 \text{ мм}; \quad (3.7.4)$$

$$u_m = -0,118 \cdot \ln(u_g) + 0,1313 \text{ при } 0,3 < R_m \leq 0,4 \text{ мм}. \quad (3.7.5)$$

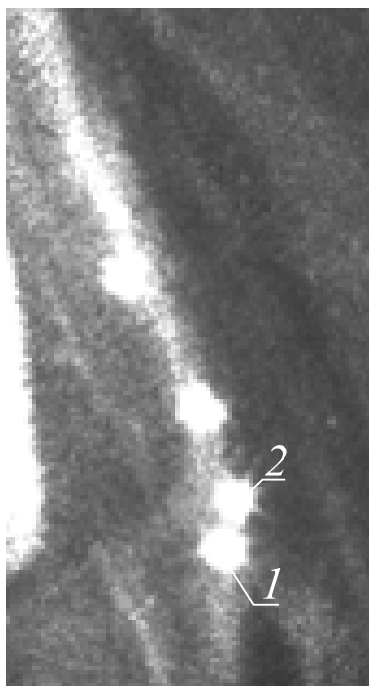
Выявленные эффекты показывают, что определяющую роль при смешении газо- и парожидкостных потоков играет явление коагуляции капель жидкости. Этот процесс зарегистрирован для капель, имеющих, как правило, различные размеры и скорости, но достаточно близкие траектории перемещения. Полученные в экспериментах поля скоростей «трассеров» (рис. 3.7.1) позволили выделить два основных механизма возникновения явления коагуляции капель жидкости в потоке высокотемпературных газов: поток газов способствует «торможению» идущих во фронте парожидкостной смеси водяных капель, их «развороту» и последующему слиянию с идущими навстречу каплями жидкости (рис. 3.7.5, а, б); капли, попадая в завихрения газов, сливаются между собой: одна «догоняет» другую при интенсивном испарении первой и достаточно медленном – последующих (рис. 3.7.5, в).



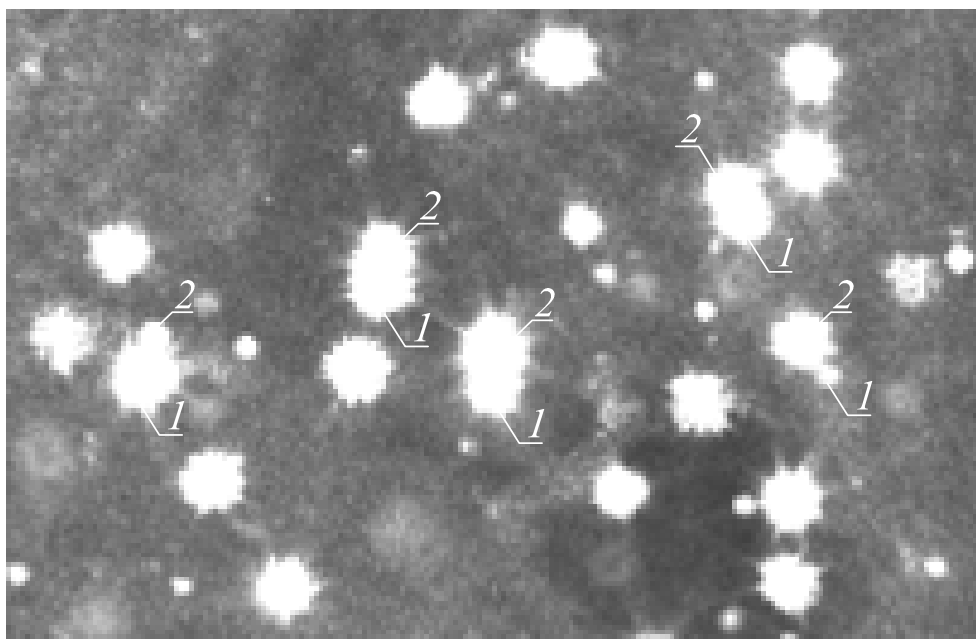
а



б



б



г

Рисунок 3.7.5. Иллюстрации явления коагуляции капель (1, 2 – первая и вторая сливающиеся капли) при различных механизмах ее реализации: *а* – торможение идущей спереди капли и ее слияние с последующей; *б, в* – капли сливаются при попутном движении в завихрениях высокотемпературных газов; *г* – хаотичное слияние капель при их большой концентрации в потоке

Проявление эффекта коагуляции существенно зависит от концентрации капель в потоке распыленной жидкости (α_m). Так, при достаточно малых (до 10 капель с размерами $0,2 < R_m \leq 0,5$ мм в объеме более 1000 мм^3) концентрациях слияние капель носит практически единичный характер. С увеличением концентрации реализация этих процессов становится устойчивой (рис. 3.7.5, з). При этом зарегистрированы оба описанных выше механизма коагуляции. Выявленные особенности коагуляции капель жидкости в газовой среде хорошо соответствуют заключениям [60], сделанным при анализе процессов тепломассопереноса в системе с двумя перемещающимися последовательно в потоке газов каплями. Можно также говорить о том, что с повышением концентрации (α_m) капель в полидисперсном потоке (относительно проведенных экспериментов) кривая на рис. 3.7.3 будет изменять наклон (приближаться к оси абсцисс).

В экспериментах установлено, что при относительно небольших временах (до 2 с) движения капель жидкости через высокотемпературные газы и $u_m \approx u_g$ влияние начальной скорости перемещения капель на параметр ΔR достаточно умеренное. При размерах высокотемпературного канала около 1 м изменение ΔR происходит менее чем на 0,05 при варьировании u_m в диапазоне $0,5 < u_m < 1,5$ м/с. С ростом длины высокотемпературного канала до 2–3 м происходит усиление влияния u_m на параметр ΔR (но не более чем на 0,1).

Результаты выполненных экспериментов иллюстрируют более существенное влияние начальных размеров капель жидкости на интегральные характеристики их испарения и движения в области высокотемпературных газов по сравнению с начальной скоростью. Полученный результат можно объяснить выявленными в экспериментах специфическими особенностями действия силы сопротивления капель жидкости в высокотемпературном газовом потоке. Известно [243], что с ростом размеров перемещаемого тела увеличивается действие силы сопротивления на него (несмотря на рост силы тяжести). Так как капли жидкости перемещаются в высокотемпературной газовой среде, то на их

поверхности реализуются условия интенсивного парообразования. Это приводит к росту силы сопротивления на 15–20 % [60]. С увеличением размеров капель влияние фазовых превращений на силу сопротивления возрастает также существенно нелинейно [60]. Кроме того, повышается [243] вклад большой группы факторов в изменение условий протекания и, как следствие, характеристики тепломассопереноса в малой окрестности капель (например, конфигурации поверхности тела, его положения относительно направления движения обтекающего потока, конвективных течений внутри капель и нестационарности их перемещения). При повышении начальной скорости перемещения капель в газовой среде и адекватных значениях R_m сила сопротивления изменяется нелинейно [243]. Однако, при $0,1 < u_m < 2$ м/с это изменение достаточно мало [60]. Вклад фазовых превращений в изменение условий теплообмена на границе «газ – жидкость» сопоставим для диапазона $0,1 < u_m < 2$ м/с (так как температура на этой границе практически постоянна и равна температуре кипения жидкости [60] при $T_f = 1070 \pm 30$ К вне зависимости от u_m). Как следствие, влияние скоростей u_m на характеристики испарения жидкости более умеренное по сравнению с R_m .

В ходе проведенных экспериментов установлено определяющее влияние скоростей движения продуктов сгорания и характерных размеров отдельных капель жидкости на степень уноса последних высокотемпературными газами. Показано, что для обеспечения вхождения капель в область пламени рабочую жидкость необходимо распылить до достижения характерных размеров капель не менее $R_d = 0,160$ мм.

Полученные результаты обработки проведенных экспериментов дополняют современные представления о процессах испарения капель жидкостей [79, 97, 99, 122, 244-246] в условиях нестационарного нагревания (в частности, газовой средой). Также они могут быть использованы при разработке и совершенствовании технологий высокотемпературного выпаривания примесей (очистки) из технической воды и эмульсий на ее основе, а также при

конструировании распылительных систем градиен разных типов, широко используемых на тепловых электрических станциях.

Кроме того, учитывая результаты теоретических [58-61, 141-144, 154] и экспериментальных [221] исследований полноты испарения распыленной жидкости в высокотемпературной газовой среде для таких приложений, как полидисперсное водяное пожаротушение можно рекомендовать для пламен высотой до 2 м (соответствующих типичным пожарам в помещениях) размеры капель выдерживать в диапазоне $0,160 < R_m < 0,175$ мм. При этом в соответствии с данными [58-61, 141-144, 154] важно не только измельчение капель жидкости, но и их удаление относительно друг друга (например, послойное распыление тушащей среды с определенными временными задержками).

3.8. Теоретический анализ численных значений основных характеристик деформации и фазовых превращений водяных капель при движении в газовых средах

Анализ результатов выполненных экспериментальных исследований (п. 3.1–3.7) позволяет сделать вывод о том, что целесообразно с их использованием определить наиболее адекватные теоретические подходы и модели тепломассопереноса из известных или развивать последние для максимального приближения результатов моделирования к данным экспериментов.

Так, например, установленные (п. 3.1) особенности влияния скоростей движения капель на времена t_d позволяют сделать вывод о существенных ограничениях использования размерных и безразмерных выражений, приведенных в [46], для вычисления времен первых «циклов деформации», как «периодов собственных колебаний»:

$$t_d = \frac{\pi \rho_l \delta^2}{4 \eta_l} \frac{1}{\sqrt{Lp-6,25}}, \quad (3.8.1)$$

$$\tau_d = \frac{t_d \eta_l}{\rho_l \delta^2}, \quad (3.8.2)$$

$$\tau_d = \frac{0,83}{\sqrt{Lp}}, \quad 3 \leq Lp \leq 3,7 \cdot 10^5, \quad (3.8.3)$$

где ρ_l – плотность жидкости, кг/м³; δ – характерный размер капли, мм; η_l – динамическая вязкость жидкости, кг/(м·с); Lp – число Лапласа ($Lp = \delta \cdot \rho_l \cdot \sigma_l / \eta_l^2$); τ_d – безразмерное время «собственных колебаний капель».

Время t_d (в соответствии с (3.8.1)–(3.8.3)) представляет функцию от размеров и свойств жидкости (вязкость, поверхностное натяжение, плотность). Скорость перемещения капель не учтена.

В выполненных экспериментах установлено, что скорость движения капель может достаточно существенно (до 30 %) изменяться даже в пределах одного «деформационного цикла» и в несколько раз при прохождении более десяти таких циклов. При $t_d \ll 1$ с этот эффект значительно влияет на характеристики «циклов деформации» (п. 3.1).

При обработке результатов экспериментов (п. 3.1) получены аппроксимационные выражения для времен t_d в зависимости от скорости капель на входе в «деформационный цикл», а также начальных размеров:

$$t_d = 0,0257 - 0,0022u \text{ при } d_0 = 3 \text{ мм, } 0 < u < 5 \text{ м/с;} \quad (3.8.4)$$

$$t_d = 0,0289 - 0,0023u \text{ при } d_0 = 4 \text{ мм, } 0 < u < 5 \text{ м/с;} \quad (3.8.5)$$

$$t_d = 0,0376 - 0,0022u \text{ при } d_0 = 5 \text{ мм, } 0 < u < 5 \text{ м/с;} \quad (3.8.6)$$

$$t_d = 0,0453 - 0,0018u \text{ при } d_0 = 6 \text{ мм, } 0 < u < 5 \text{ м/с;} \quad (3.8.7)$$

$$t_d = 0,0027d_0^2 - 0,0174d_0 + 0,0535 \text{ при } u = 1 \text{ м/с, } 3 < d_0 < 6 \text{ мм;} \quad (3.8.8)$$

$$t_d = 0,0017d_0^2 - 0,0087d_0 + 0,0326 \text{ при } u = 2 \text{ м/с, } 3 < d_0 < 6 \text{ мм;} \quad (3.8.9)$$

$$t_d = 0,0026d_0^2 - 0,015d_0 + 0,0414 \text{ при } u = 3 \text{ м/с, } 3 < d_0 < 6 \text{ мм;} \quad (3.8.10)$$

$$t_d = 0,0011d_0^2 - 0,0021d_0 + 0,0136 \text{ при } u = 4 \text{ м/с, } 3 < d_0 < 6 \text{ мм;} \quad (3.8.11)$$

$$t_d = 0,0022d_0^2 - 0,012d_0 + 0,0302 \text{ при } u = 5 \text{ м/с, } 3 < d_0 < 6 \text{ мм.} \quad (3.8.12)$$

Важно отметить, что аппроксимации (3.8.4)–(3.8.12) представлены для времен t_d в зависимости от скорости на входе в «цикл деформации» и начального размера d_0 . Скорость капель в процессе движения возрастает нелинейно. Поэтому довольно сложно представить t_d , как функцию от $u=f(t)$. Вследствие непрерывной деформации еще большую сложность представляет учет зависимостей $d_x=f(t)$, $d_y=f(t)$ и $d_{\max}=f(t)$.

Следует отметить важную особенность теоретических заключений [46]. Выражения (3.8.1)–(3.8.3) сформулированы для капель в форме сферы (есть множитель $\pi\delta^2/4$). Выполненные в рамках настоящей работы эксперименты показали, что в процессе деформации капля имеет сферическую форму не чаще, чем эллипсоида, «блина», вытянутого цилиндра и других тел вращения (п. 3.1). Поэтому для максимально возможного приближения выражений (3.8.1)–(3.8.3) к реальным значениям t_d целесообразно вычислять площадь капель S_d в начале каждого «цикла деформации» (и/или учитывать ее изменение в цикле $S_d=f(t)$).

В выражениях (3.8.1)–(3.8.3) также не учтены свойства газовой среды, в которой происходит деформация капель. Результаты [61, 206, 247–249] позволяют сделать вывод о том, что этот фактор может быть определяющим.

Анализ аппроксимационных выражений (3.8.4)–(3.8.12) позволяет сделать вывод о том, что при $u \rightarrow 0$ м/с значения t_d можно вычислить с использованием выражений (3.8.1)–(3.8.3). Первые слагаемые в формулах (3.8.4)–(3.8.7) практически (отклонения до 7 %) равны значениям t_d , вычисленным с использованием выражения (3.8.1) для соответствующих характерных размеров капель d_0 . Указанные отклонения можно уменьшить до 3–4 % при использовании в выражении (3.8.1) вместо множителя $\pi\delta^2/4$ значения площадей капель на входе в «деформационный цикл» (S_d), вычисленных с учетом реальных форм последних.

В первом приближении зависимости $t_d=f(u)$ представляют полиномиальные функции первого порядка (3.8.4)–(3.8.7). При этом анализ множителей перед скоростью u в выражениях (3.8.4)–(3.8.7) показывает, что они достаточно существенно зависят от размеров капель.

В результате итерационных вычислений при $d_0=3-6$ мм и $u=0-5$ м/с установлено, что вторые слагаемые в выражениях (3.8.4)–(3.8.7) можно достаточно достоверно описать выражением $\sqrt{\frac{We}{Lp-6.25}}$. Таким образом, формула для вычисления времен «деформационных циклов» с учетом формы капель, их размеров, скоростей движения, свойств жидкости и газа имеет вид:

$$t_d = \frac{\rho_l S_d}{\eta_l \sqrt{Lp-6.25}} - \sqrt{\frac{We}{Lp-6.25}}. \quad (3.8.13)$$

Значения t_d , полученные с использованием выражения (3.8.13) при $d_0=3-6$ мм, $u=1-5$ м/с, $\rho_l=1000$ кг/м³, $\sigma_l=0,0618$ кг/с², $\eta_l=0,001023$ кг/(м·с), $\rho_g=1,5$ кг/м³ и $S_d=\pi d_0^2/4$, приведены на рис. 3.8.1 для сравнения с экспериментальными аппроксимационными зависимостями.

Рис. 3.8.1 иллюстрирует, что выражение (3.8.13) можно использовать в качестве первого приближения для установления времен «циклов деформации» капель воды в рассматриваемых условиях. При средних скоростях движения (2–4 м/с) отклонения вычисленных значений t_d от экспериментальных не превышают 6 %. Если учитывать приведенные доверительные интервалы (иллюстрируют погрешности измерений в экспериментах), то эти отклонения можно вполне считать удовлетворительными. При «малых» (около 1 м/с) и «больших» (около 5 м/с) скоростях на входе в «деформационные циклы» отклонения от экспериментальных значений t_d достаточно существенные. Этот результат позволяет сделать вывод о границах применимости выражения (3.8.13) по скоростям движения капель.

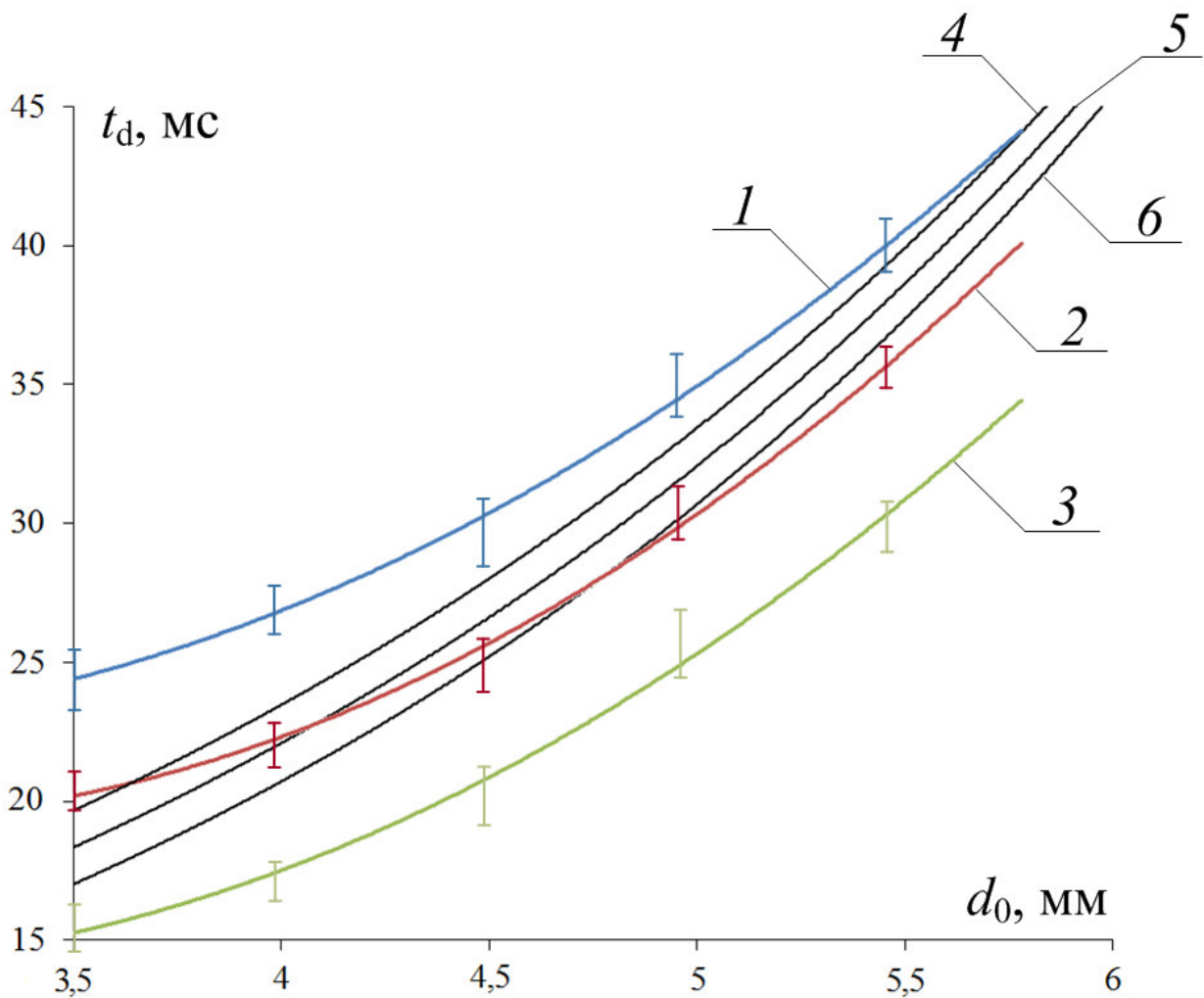


Рисунок 3.8.1. Времена t_d при различных размерах и скоростях капель воды: 1–3 – аппроксимации результатов экспериментов при скоростях на входе в «цикл деформации» $u=1$ м/с, $u=3$ м/с и $u=5$ м/с, соответственно, 4–6 – значения времен t_d , вычисленные с использованием выражения (3.8.13)

При анализе результатов выполненных экспериментальных исследований фазовых превращений с использованием моделей [61, 79, 153, 154, 250] установлены численные значения скоростей испарения (W_e) воды и диапазон изменения коэффициента конденсации (испарения) воды (β).

Так, например, при исследовании процессов испарения капель воды, движущихся через газы с температурой около 1100 К, установлены (табл. 3.8.1) характерные значения размеров (R_d) и массы (m_d) капель, а также времен (t_d) их

существования в потоке газов. Это позволило вычислить скорость испарения капель по формуле:

$$W_e = (1/S) dm/dt. \quad (3.8.14)$$

Здесь $S=4\pi R^2$ – условная площадь поверхности капель (R изменяется в ходе полета капли от R_d до R_d^*). Масса капель также меняется – от m_d до m_d^* . Можно записать условный объем капли $V=4\pi R^3/3$ и ее условную массу $m=\rho_d V$, где ρ_d – плотность воды, кг/м³. В этом случае формулу (3.8.14) можно представить в виде:

$$W_e = \rho_d (R_d - R_d^*) / t_d, \quad (3.8.15)$$

где производная заменена конечными разностями:

$$dR/dt \approx (R_d - R_d^*) / t_d.$$

Таблица 3.8.1.

Характеристики испарения капель жидкости в высокотемпературной газовой среде

№ эксперимента	R_d , мм	R_d^* , мм	m_d , г	$\rho_d 4\pi R_d^3/3$, г	m_d^* , г	$\rho_d 4\pi R_d^{*3}/3$, г	t_d , с	W_e , кг/(м ² с) (по формуле (3.8.15))
1	3,53	3,38	0,1836	0,184	0,1621	0,162	0,621	0,242
2	3,51	3,36	0,1814	0,181	0,1569	0,159	0,623	0,241
3	3,52	3,35	0,1822	0,183	0,1574	0,158	0,617	0,276
4	3,52	3,36	0,1825	0,183	0,1581	0,159	0,618	0,259
5	3,51	3,36	0,1809	0,181	0,1563	0,159	0,619	0,242

Рассчитанные значения W_e , а также массы капель на входе и выходе из канала приведены в табл. 3.8.1. Сравнение рассчитанных масс с измеренными позволяет сделать заключение о правомерности использования условного радиуса капель в качестве их характерного размера в рассматриваемых опытах.

Следует отметить хорошую повторяемость результатов экспериментов (табл. 3.8.1). Случайные погрешности определения R_d и m_d не превышали 1 % и 1,5 %, соответственно. Это, в первую очередь, обусловлено обеспечением достаточно стабильных условий (по температуре газов и характеристикам капель) опытов, во-вторых, довольно высокой точностью измерений, обеспечиваемой методами PPI и PIV (п. 3.2–3.7).

В опытах установлено, что значения скоростей «трассирующих» частиц в малой (до 10 мкм) «пристенной» области капель (получены с применением метода PIV) составляют $V_v=0,424–0,482$ м/с (соответствуют скоростям оттока паров жидкости от поверхности капель в высокотемпературную газовую среду). Зная определенные в экспериментах массовую скорость испарения W_e и скорость оттока паров от поверхности парообразования V_v , можно определить из выражения $W_e=V_v \cdot \rho_v$ плотность водяного пара в непосредственной близости к этой поверхности. Обработка результатов экспериментов показала, что значения ρ_v в рассматриваемых условиях составляют 0,568–0,573 кг/м³.

На базе моделей [61, 153, 154, 250] при известных значениях W_e можно определить константы испарения капель воды в рассматриваемых условиях. Выражение для скорости испарения жидкости имеет вид [79, 122]:

$$W_e = \frac{\beta}{1 - k_\beta \beta} \frac{(P^n - P)}{\sqrt{2\pi R_t T_e / M}}, \quad (3.8.16)$$

где β – безразмерный коэффициент испарения (конденсации); k_β – безразмерный коэффициент, используемый при вычислении скорости испарения [79, 122]; P^n – давление насыщенных паров воды, Н/м²; P – давление паров воды вблизи границы испарения, Н/м²; R_t – универсальная газовая постоянная, Дж/(мольК); T_e – температура поверхности жидкости, К; M – молярная масса воды, кг/кмоль.

Условия проведения экспериментов соответствовали постановкам задач [61, 153, 154, 250], при решении которых использовалось выражение (3.8.16) для вычисления W_e . В экспериментах установлено, что капли при перемещении через

высокотемпературную газовую среду принимают форму, соответствующую своему названию – «каплевидную». При этом отклонение формы от сферической, в рассматриваемых условиях, умеренно (менее 3 %) влияет как на основные характеристики процесса испарения, так и перемещения капель. В [61, 153, 154, 250] показано, что численное моделирование комплекса процессов тепломассопереноса (в том числе и фазовых превращений) в области с подвижной внутренней границей, соответствующей эллипсоидальным или «каплевидным» конфигурациям, затруднительно. Наилучшей (из возможных вариантов) моделью формы капли [61, 153, 154, 250] является цилиндр, ось симметрии которого совпадает с направлением вектора движения капли. Размеры цилиндра подбираются так, что площади его поверхности и капли равны. Проведено [61, 153, 154, 250] варьирование значений геометрического коэффициента c_χ при вычислении силы сопротивления движению капель (применены значения c_χ для форм эллипсоида, цилиндра, конуса и других). Установлено умеренное влияние c_χ на характеристики испарения. Эти результаты обосновывают возможность использования постановок [61, 153, 154, 250] для расчета констант испарения по полученным экспериментальным значениям W_e .

В экспериментах температура газов поддерживалась в пределах 1070 ± 30 К. При численном моделировании [61, 153, 154, 250] принималось, что температура внешней для капли среды равна 1070 К. Исследования [61, 153, 154, 250] позволили установить, что температура поверхности капель (T_e) в процессе их движения через высокотемпературные газы составляет 365 ± 10 К, т.е. равна максимально возможной температуре испарения воды (с ростом времени перемещения капли в потоке газов значения T_e повышаются в указанном диапазоне [61, 153, 154, 250]).

Можно вполне обоснованно принять, что температура паров воды в непосредственной близости от поверхности испарения в условиях интенсивного парообразования и, соответственно, формирования в малой окрестности капель тонкого «буферного» (парового) слоя практически не отличается от температуры

раздела фаз $T_v \approx T_e$. Так как в малой «пристенной» области капля вследствие формирования «буферного» слоя концентрации продуктов сгорания минимальны [61, 153, 154, 250] и относительная объемная доля «трассирующих» частиц нанопорошка TiO_2 не превышает 1 %, то для определения давления парогазовой среды непосредственно у границы «жидкость – газ» можно использовать уравнение состояния перегретого водяного пара Вукаловича – Новикова [251]:

$$\left(P + \frac{a}{(1/\rho_v)^2} \right) \left(\frac{1}{\rho_v} - b \right) = \frac{R_t T_e}{M} \left(1 - \frac{c'}{(1/\rho_v) T_e^{\frac{3+2m}{2}}} \right), \quad (3.8.17)$$

где $a=620 \text{ Нм}^4/\text{кг}^2$, $b=0,0009 \text{ м}^3/\text{кг}$, $R_t=8,314 \text{ Дж}/(\text{моль}\cdot\text{К})$, $M=18 \text{ кг}/\text{кмоль}$, $c'=405000 \text{ м}^3\text{К}/\text{кг}$, $m=1,968$ [251].

При максимально возможной температуре границы раздела фаз $T_e=373 \text{ К}$ и $\rho_v=0,568\text{--}0,573 \text{ кг}/\text{м}^3$ из уравнения (3.8.17) получаем, что давления паров у поверхности капли составляют $(0,979\text{--}0,988)\cdot 10^5 \text{ Н}/\text{м}^2$. Как следствие, $P^n - P \approx 2560\text{--}3450 \text{ Н}/\text{м}^2$. С использованием экспериментальных значений скоростей испарения $W_e=0,241\text{--}0,276 \text{ кг}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$ и формулы (3.8.16) получаем, что при $P^n - P \approx 2560\text{--}3450 \text{ Н}/\text{м}^2$ и $T_e=373 \text{ К}$ выражение $\beta/(1-k_\beta \cdot \beta)$ составляет $0,0726\text{--}0,1121$. Значение параметра k_β , как правило, принимается равным $0,396\text{--}0,432$ [79, 122]. Тогда для коэффициента испарения можно выделить диапазон $\beta=0,0703\text{--}0,1072$ и сделать вывод о том, что установленные значения константы β соответствуют максимально возможным скоростям испарения жидкости в рассматриваемых условиях.

Несмотря на высокие температуры поверхности капель и, соответственно, максимальные скорости испарения, в результате проведенных опытов установлена умеренная (менее 15 %) убыль массы капель при парообразовании (табл. 3.8.1). Это, в первую очередь, можно объяснить достаточно большим расходом энергии на реализацию фазовых превращений (теплота парообразования воды составляет $Q_e=2 \cdot 10^6 \text{ Дж}/\text{кг}$). При таких значениях Q_e приповерхностные слои капель прогреваются на малую глубину [61, 153, 154,

250]. К тому же, между каплей и газами в условиях интенсивного испарения формируется «буферная» зона из паров воды, которая снижает тепловой поток к границе фазовых превращений. Поэтому значения Δt и ΔR не превышают 0,15 (табл. 3.8.1) и, соответственно, $\beta \ll 1$.

Анализ систематических и случайных погрешностей измерения размеров и массы капель, а также скорости паров у их поверхности позволяет сделать вывод о том, что диапазон $\beta=0,0703-0,1072$ может быть несколько шире. Так, при относительной максимальной погрешности определения размеров R_d , равной 1 %, погрешность вычисления объема капли составляет 3 %. Тогда для массовой скорости испарения W_e погрешность вычисления достигает 6 %. При погрешностях определения скоростей «трассеров» до 1 % можно заключить, что плотность пара будет вычисляться с погрешностью около 7 %. Из уравнения (3.8.17) видно, что при таких условиях максимальные разности давлений P^n-P могут достигать 7000–8000 Н/м². Как следствие, по приведенной выше методике можно выявить, что нижний предел диапазона изменения параметра β в таком случае составляет около 0,03. Но выполненные оценки показывают, что в любом самом неблагоприятном случае для системы «высокотемпературные газы – капли воды» значение коэффициента испарения β существенно меньше 1.

Проведенные серии экспериментов показали, что при варьировании R_d в диапазоне от 1 мм до 5 мм значения W_e практически не изменяются относительно установленных при всех остальных идентичных параметрах процессов (при уменьшении R_d значения W_e возрастают умеренно – менее 5 %). Этот результат позволяет заключить, что выделенные значения β и k_β можно использовать при моделировании процессов тепломассопереноса в окрестности перемещающихся в высокотемпературной газовой среде капель воды при изменении их характерных размеров в достаточно широком и типичном для многих приложений диапазоне ($1 < R_d < 5$ мм).

Вычисленные значения характеристик испарения капель воды по результатам проведенных экспериментов позволяют сделать вывод о том, что при

высоких температурах, скорее всего, реализуется «кинетический» режим парообразования. Для подтверждения этого вывода проведены численные исследования с использованием моделей [61, 153, 154, 250].

В табл. 3.8.2 представлены установленные значения скоростей испарения воды в рассматриваемых условиях в зависимости от температуры поверхности капель T_e .

Таблица 3.8.2.

Зависимость скорости испарения капель воды от температуры их поверхности, полученная с использованием моделей [61, 153, 154, 250]

T_e , К	300	310	320	330	340	350	360	370
W_e , кг/(м ² с)	0.005	0.009	0.025	0.042	0.078	0.136	0.204	0.261

Следует отметить существенно нелинейный характер зависимости $W_e=f(T_e)$. Также установлено, что вследствие значительно отличающихся условий теплопереноса у передней, боковой и задней границ капли в форме цилиндрического диска температуры T_e довольно существенно (на 25–45 К) отличаются. Как следствие, скорости испарения на этих границах при идентичных начальных значениях температуры газов могут кратно изменяться (табл. 3.8.2). Кроме того, в результате численного моделирования выявлено, что скорости испарения капли изменяются во времени вследствие прогрева последней и уменьшения ее размеров.

Представляет интерес анализ исследуемого процесса в условиях конвективно-кондуктивного теплообмена на границе «жидкость – газ» (например, [196]). Известна группа корреляционных выражений для коэффициентов теплоотдачи на поверхности испаряющейся капли [97, 99, 196, 252-254]. Наибольшее распространение получили соотношения Рэнца-Маршала [252], в частности:

$$\text{Nu}=2+0,6\text{Re}_1^{1/2}\text{Pr}_1^{1/3}. \quad (3.8.18)$$

Для рассматриваемых достаточно типичных условий реализации процесса максимально возможные значения числа Нуссельта в соответствии с выражением (3.8.18) составляют 25. Максимальные значения коэффициента теплообмена α при этом достигают 100. Значения скорости испарения воды в рамках моделей [97, 99, 252-254] можно установить из выражения:

$$\chi_w Q_e / S_e = \alpha (T_f - T_e), \quad (3.8.19)$$

где χ_w – массовый поток, кг/с; S_e – площадь испарения, м².

В выражении (3.8.19) соотношение χ_w / S_e представляет скорость испарения W_e . При $T_f=1100$ К, $T_e=300$ К, $Q_e = 2,26 \cdot 10^6$ Дж/кг и коэффициенте теплоотдачи $\alpha=100$ Вт/(м²К) скорость испарения равна $W_e=0,0435$ кг/(м²с).

Важно отметить, что известные уточнения [97, 99] выражения для числа Нуссельта (3.8.18), характеризующие условия интенсивного вдува паров с поверхности капли, в виде $\text{Nu}=(2+0,6\text{Re}_1^{1/2}\text{Pr}_1^{1/3})/(1+b_{1T})$ (при $b_{1T}=1/\text{Ku}$, Ku – число Кутателадзе) для рассматриваемых условий реализации процессов тепломассопереноса приводят к незначительному (менее 5 %) изменению W_e относительно приведенного выше максимального значения – 0,0435 кг/(м²с).

В рамках моделей [61, 153, 154, 250] («кинетических» в соответствии с [79, 122]) установлены в несколько раз большие значения W_e в идентичных условиях (табл. 3.8.2). Очевидно, это обусловлено тем, что при высоких температурах газов реализуется более интенсивный режим теплообмена при парообразовании. Соответственно, применение выражений вида $\text{Nu}=2+f(\text{Re}, \text{Pr})$ не позволяет описать в полной мере условия подвода теплоты к межфазной границе. Установленные [61, 153, 154, 250] высокие концентрации водяных паров в окрестности капель также иллюстрируют отсутствие условий для реализации «диффузионного» режима испарения.

В [61, 153, 154, 250] приведены распределения температуры в испаряющейся капле воды в разные моменты времени. Видно, что температура воды (в том числе поверхности) вследствие ее прогрева с ростом времени

значительно повышается. Анализ [61, 153, 154, 250] и табл. 3.8.1 показывает, что процесс теплопереноса в капле существенно влияет на скорости испарения жидкости $W_e=f(T_e)$. Изменение температуры в капле и на ее поверхности не учитывается (капля предполагается нетеплопроводной) в выражениях (3.8.18) и (3.8.19).

Выполненные численные исследования позволили установить, что лучистый тепловой поток к поверхности капли q_l существенно превышает конвективный поток q_c . Так, например, при температуре газов около 1100 К q_l превышает q_c более, чем в семь раз. При снижении разности температур газов и поверхности капли отличия между q_l и q_c уменьшаются. В тоже время при температуре газов около 500 К выполняется соотношение $q_l/q_c > 1$. Эти результаты позволяют сделать вывод об определяющей роли лучистого теплообмена на поверхности капли при высоких температурах внешней среды. Соответственно, можно сделать вывод об ограниченных условиях использования конвективных моделей теплообмена в условиях испарения капель жидкостей (например, [97, 99, 194, 252-254]).

На рис. 3.8.2 приведены зависимости скоростей испарения капель воды в фиксированный момент времени от температуры внешней газовой среды, полученные с использованием трех моделей: 1 – «диффузионный» режим испарения и конвективно-кондуктивный теплообмен на поверхности капли; 2 – «кинетический» режим испарения и лучистый, конвективный и кондуктивный теплообмен на границе «жидкость – газ». Третья модель аналогична второй постановке, но учитывает радиационный и кондуктивный теплоперенос в капле. Видны существенные отличия скоростей испарения воды при трех различных интерпретациях условий теплообмена. При этом с ростом температуры газовой среды отклонения нелинейно увеличиваются (по указанным выше причинам).

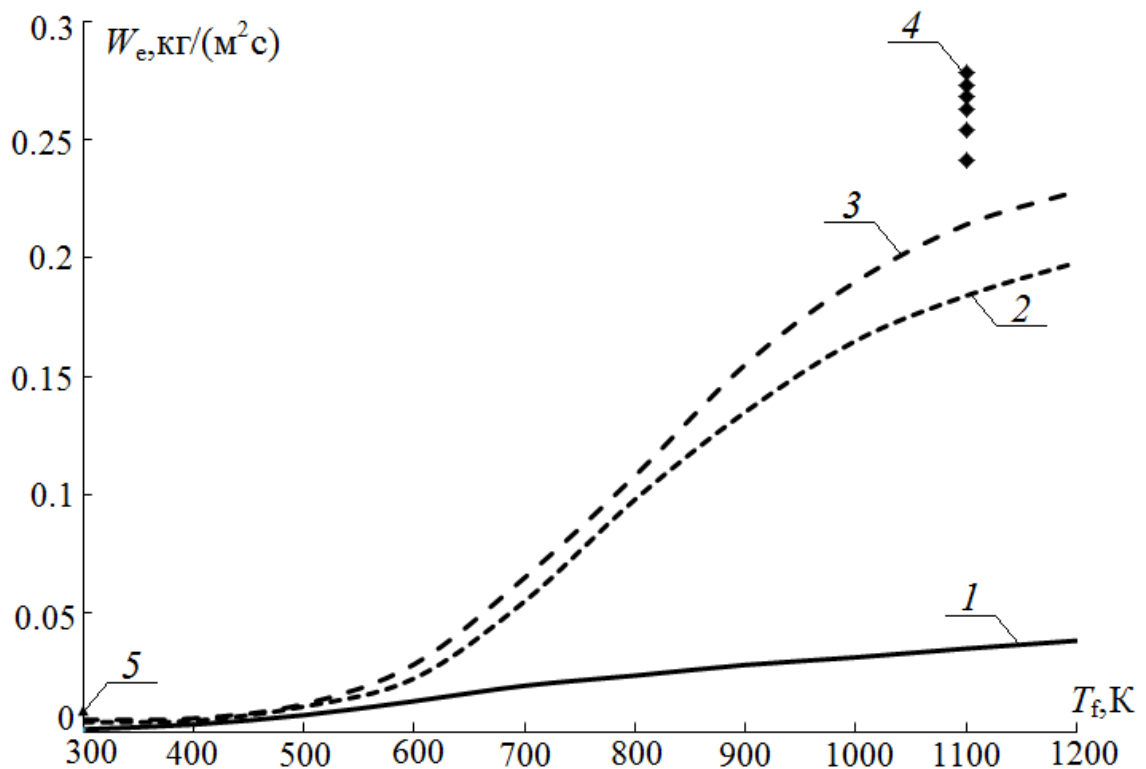


Рисунок 3.8.2. Зависимости скорости испарения капли воды ($R_d=0,25$ мм, $Z_d=1$ мм) на ее фронтальной поверхности при $t=0,25$ с от температуры внешней газовой среды: 1 – «диффузионный» режим испарения и конвективно-кондуктивный теплообмен на поверхности капли; 2 – «кинетический» режим испарения и лучистый, конвективный и кондуктивный теплообмен на границе «жидкость – газ»; 3 – «кинетический» режим парообразования, сложный теплообмен на границе «жидкость – газ», а также радиационный и кондуктивный теплоперенос в капле; 4 – значения проведенных экспериментов; 5 – экспериментальные значения [254]

По результатам измерений массы и размеров капель на входе и выходе из высокотемпературного канала установлено (табл. 3.8.1), что средняя скорость испарения воды составляет около $0,241-0,278$ кг/(м²с). Численные исследования [61, 153, 154, 250] показали, что температуры поверхностей капель T_e при $T_f \approx 1100$ К могут составлять от 350 К до 370 К (с ростом времени перемещения в газовой среде температура T_e нелинейно растет). В соответствии с табл. 3.8.2 скорости испарения изменяются от $0,136$ кг/(м²с) до $0,261$ кг/(м²с) при таких T_e . Можно

сделать вывод об удовлетворительном соответствии результатов математического моделирования в рамках «кинетических» моделей испарения [61, 153, 154, 250] и проведенных экспериментов. При низких температурах (около 300 К) газовой среды можно отметить хорошую корреляцию результатов экспериментов [254], «кинетической» и «диффузионной» моделей испарения (рис. 3.8.2).

Полученные результаты позволяют заключить, что при умеренных температурах допустимо использование известных «диффузионных» моделей испарения [196], а при высоких (около 500 К) и очень высоких (более 1000 К) правомерно применение только «кинетических» моделей с использованием выражения (3.8.16) для вычисления скоростей фазовых превращений.

3.9. Рекомендации по использованию полученных результатов в энергетических технологиях и дальнейшему развитию сформулированного в диссертации подхода

При обобщении данных выполненных экспериментов и сделанных заключений можно сформулировать рекомендации по использованию полученных результатов в ряде следующих практических приложений.

Испарительное охлаждение воды в системах оборотного водоснабжения ТЭС

- ✓ Для интенсификации процессов тепломассопереноса при охлаждении воды в системах оборотного водоснабжения ТЭС при подаче (распыле) отработавшей воды в рабочую область градирен целесообразно максимально снижать скорость генерируемого парокапельного потока. Минимальное значение скорости парокапельного потока необходимо выбирать с учетом средних размеров капель в нем, а также скоростей встречного потока охлаждающего воздуха, используя аппроксимационные выражения, полученные в п. 3.7. Это, в свою очередь, позволит снизить

степень капельного уноса и, как следствие, сократить количество добавочной воды. В масштабах ТЭС учет этого эффекта приведет к значительному уменьшению ресурсо- и энергозатрат.

- ✓ Для повышения эффективности работы промышленных градирен ТЭС необходимо интенсифицировать фазовые превращения капель жидкости при их движении от распылительных форсунок до поверхности оросителей. Для этих целей можно рекомендовать распыливание воды с размерами капель в потоке в диапазоне $0,16 < R_m \leq 0,23$ мм.
- ✓ При проектировании, разработке и тепловом расчете испарительных градирен ТЭС необходимо учитывать тепломассообмен не только с поверхности пленок и струй воды, но также и с поверхности движущихся капель. При этом нужно учитывать постоянную деформацию капель в полете и, как следствие, изменение площади их поверхности. При таком подходе целесообразно применять аппроксимационные выражения и формулы для определения времен «деформационных циклов» и площади поверхности капель при их движении в газовой области, полученные в п. 3.1.

Термические методы очистки, обессоливания и обеззараживания воды в процессе водоподготовки

- ✓ Для повышения эффективности процессов термической очистки и обессоливания воды в процессе водоподготовки можно рекомендовать подачу жидкости в испарительные камеры в виде распыленного капельного потока с размерами $R_m < 0,23$ мм. В этом случае влияние примесей солей на процесс испарения капель существенно меньше, чем для крупных капель и больших объемов жидкости. Как следствие, фазовые превращения проходят более интенсивно. Такой подход позволит обойтись без предварительного подогрева воды, а также снизить энергозатраты на прогрев и испарение воды в испарительных камерах.

- ✓ В процессе водоподготовки при подаче жидкости в испарительные камеры и специализированные печи в виде потока с размерами $R_m < 0,4$ мм для уменьшения затрат на прогрев воды и последующее ее испарение целесообразен предварительный подогрев жидкости до температур $T_w = 303-323$ К. Для определения оптимального соотношения между размерами капель R_m и начальной температурой воды T_w можно рекомендовать использование приведенных в п. 3.2 аппроксимационных выражений.
- ✓ Для интенсификации процессов испарения жидкости в методах термической очистки воды непосредственно перед ее подачей в испарительные камеры и печи в виде капельного потока можно рекомендовать специализированное введение в ее состав неметаллических твердых включений с характерными размерами $L_m = 50-70$ мкм.
- ✓ В процессе испарительной очистки воды при использовании газовых потоков для уноса неиспарившейся твердой фазы во избежание капельного уноса (либо его минимизации) целесообразно скорость газов и капель, а также размеры последних выбирать с учетом приведенных в п. 3.7 аппроксимационных выражений.

Полидисперсное пароводяное пожаротушение

- ✓ Для интенсификации процесса испарения воды в области пламени и, как следствие, уменьшения расхода тушащей жидкости при тушении возгораний в помещениях, высота которых не превышает 2–3 м, а также для минимизации разворота и последующего уноса части капель с высокотемпературными продуктами сгорания, можно рекомендовать использование полидисперсного капельного потока, значительную часть которого (не менее 50–60 % от общего объема распыляемой воды) должны составлять капли с размерами $0,16 < R_m \leq 0,23$ мм.

- ✓ Для средств и систем пожаротушения, генерирующих распыленные капельные потоки жидкости со средними размерами капель $R_m > 0,23$ мм, в качестве средства повышения эффективности процесса тушения можно рекомендовать предварительный подогрев воды до температур $T_w = 303–323$ К. Для нахождения оптимального значения начальной температуры воды T_w целесообразно использовать приведенные в п. 3.2 рукописи аппроксимационные выражения (от 300 К до 323 К).
- ✓ При разработке новых, а также модернизации существующих систем ликвидации возгораний в помещениях, высота которых не превышает 2–3 м, следует начальную скорость распыленного капельного потока выбирать исходя из средних размеров генерируемых капель, пользуясь аппроксимационными выражениями из п. 3.4 (от 0,5 м/с до 5 м/с и от 50 мкм до 5 мм).
- ✓ При использовании в процессе тушения пожаров воды из различных водоемов и хранилищ следует учитывать содержание в ней примесей солей. Так, при солесодержании свыше 5–10 г/л (соленые озера и моря) можно рекомендовать мелкодисперсное распыление жидкости с размерами капель $R_m \leq 0,35$ мм. При определении оптимальной дисперсности капельного потока целесообразно использование найденных в п. 3.5 аппроксимационных выражений.
- ✓ При ликвидации крупных пожаров (особенно лесных) для интенсификации процесса испарения жидкости в области пламени целесообразно непосредственно перед распылением специализированное введение в ее состав неметаллических твердых включений с размерами $L_m = 50–500$ мкм и массовой концентрацией в воде в диапазоне $0,3 < \gamma_c < 1$ %. Для нахождения оптимального соотношения величин R_m , L_m и γ_c необходимо использовать полученные в п. 3.6 аппроксимационные зависимости.

Результаты экспериментальных исследований также можно использовать для развития целого ряда перспективных технологий (например, размораживание

сыпучих сред газопарожидкостными потоками, очистка поверхностей теплоэнергетического оборудования газопарокапельными смесями, теплоносители на базе уходящих дымовых газов и парокапельных потоков). Для этих технологий сформулированы рекомендации:

- установленные в п. 3.1 закономерности и результаты исследований процесса и режимов деформации капель жидкостей целесообразно учитывать при дальнейшем развитии соответствующих экспериментальных и численных моделей процессов движения капель в газовых средах;
- сформулированные в п. 3.2–3.7 аппроксимационные выражения и сделанные в п. 3.8 теоретические заключения можно использовать в качестве прогностических при выборе начальных параметров парокапельных потоков при разработке упомянутых выше технологий;
- результаты по оценке влияния неметаллических твердых включений в каплях жидкости на интенсификацию фазовых превращений, а также полученные в п. 3.6 аппроксимационные зависимости могут быть использованы при разработке технологий разморозки сыпучих сред и обработки поверхностей теплоэнергетического оборудования.

Выполненные эксперименты и теоретический анализ основных результатов позволил разработать группу прогностических программных кодов, на которые получены соответствующие свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ [255-261]. Также составлена заявка на получение патента РФ (№ 2014114346 от 10.04.2014).

Выводы по третьей главе

1. Установленные закономерности исследованных процессов деформации капель воды показывают, что характерные времена и другие основные характеристики «циклов деформации» капель представляют достаточно сложные зависимости, в первую очередь, от размеров d_0 , скоростей u ,

температуры газов T_g , а также свойств жидкости (плотность, вязкость и поверхностное натяжение).

2. Установленные в экспериментах отличия основных характеристик (t_d , l_d , Δ_{\max} , Δ_x , Δ_y) «циклов деформации» капель воды (с варьируемой температурой) в условиях высоких ($T_w \approx 1100$ К), умеренных ($T_w \approx 300$ К) и пониженных ($T_w \approx 285$ К) температур газовой среды обусловлены разными массовыми скоростями испарения. Последние существенно влияют на скорости перемещения капель под действием гравитационных сил, а также размеры капель (вследствие уноса массы в виде паров). Скорости движения и размеры капель даже в условиях умеренных температур являются определяющими при деформации капель. Полученные результаты иллюстрируют целесообразность учета комплексного влияния d_0 , u , T_w , свойств жидкости и газовой среды при формулировании математических выражений для основных характеристик деформации капель. При этом использование только чисел Вебера и Рейнольдса не позволяет в полной мере описать закономерности деформации капель.
3. Выполненные эксперименты по анализу возможных «режимов деформации» капель воды в газовой среде позволили установить реальные формы капель, число таких форм в пределах каждого «цикла деформации», длительности и протяженности последних, времена характерной трансформации между формами и амплитуды изменения размеров капель. Эти результаты могут быть использованы при разработке новых и развитии существующих моделей движения капель жидкостей в газовых и паровых трактах теплоэнергетического оборудования.
4. Видеограммы проведенных экспериментов иллюстрируют, что время жизни сферической формы капель не больше, чем эллипсоида или «блина» при движении последних в воздухе (капли имеют форму сферы в течение времени, составляющем не более 15 % от общего времени перемещения в области видеорегистрации). Этот результат обосновывает допустимость использования при моделировании движения капель жидкостей практически

любой из установленных в проведенных экспериментах конфигураций (рис. 3.1.2). Но при этом целесообразно учитывать непрерывный процесс трансформации. В первом приближении учет этого фактора можно обеспечить усреднением значений коэффициента аэродинамического сопротивления c_x в соответствии с учитываемыми формами капель в пределах каждого «цикла деформации».

5. Результаты выполненных экспериментов показали, что для обеспечения полноты испарения воды при движении через пламя высотой 1 м целесообразно ее распылить до достижения размеров капель $R < 0,175$ мм. Для пламен с высотами более 1 м по результатам экспериментов можно рекомендовать, в первую очередь, увеличение не размеров R_m , а концентрации капель в потоке распыленной жидкости α_m .
6. Установлено существенное влияние предыдущих капель в потоке на интенсивность испарения последующих. Показано хорошее соответствие результатов выполненных опытов полученным ранее результатам численного моделирования испарения «тандема» капель в области высокотемпературных газов.
7. Установленные зависимости $\Delta R = f(R_m)$ и $\Delta R = f(T_w)$ показывают, что для обеспечения некоторой заданной полноты испарения распыленной жидкости можно относительно умеренно (ΔT_w до 50 К) повысить ее начальную температуру без существенного измельчения капель. Возможно, по материальным затратам этот подход в ряде практических приложений будет даже более экономически выгоден и относительно просто реализуем. Так, при использовании распыленной воды в процессе тушения пожаров в зданиях и сооружениях с целью обеспечения ее полного испарения в пламенной зоне горения и ликвидации очага возгорания (эффективного использования жидкости) представляется целесообразным, в первую очередь, повышать начальную температуру T_w в относительно небольшом диапазоне (вместо

- создания распылителей с размерами капель до нескольких десятков микрометров).
8. Показано, что вода с примесями NaCl существенно медленнее испаряется по сравнению с пресной водой. Этот результат хорошо согласуется с ранее выполненными теоретическими исследованиями. Однако также установлено, что при значениях R_m менее 0,15 мм интенсивности испарения капель рассматриваемых рабочих жидкостей (с NaCl и без примесей солей) сопоставимы. Этот результат иллюстрирует возможность обобщения результатов численных исследований, выполненных с пресной водой, при разработке соответствующих рекомендаций тушения лесных пожаров водой с определенным содержанием солей.
 9. В результате проведенных экспериментов установлено, что наличие типичных твердых неметаллических включений в относительно крупных ($R_d = 1-5$ мм) каплях жидкости оказывает существенное влияние на процесс испарения последних при прохождении зоны высокотемпературных продуктов сгорания. Установлено, что рост массовой концентрации, а также размеров твердых включений в капле воды существенно (в несколько раз) интенсифицируют парообразование и убыль массы жидкости. Полученные результаты показывают, что для повышения эффективности использования воды в зоне пламени помимо измельчения капель целесообразно специализированное введение твердых включений в состав тушащей жидкости.
 10. Установлено определяющее влияние скоростей движения продуктов сгорания и характерных размеров отдельных капель жидкости на унос последних высокотемпературными газами. Показано, что для обеспечения вхождения капель в область пламени рабочую жидкость необходимо распылить до достижения характерных размеров капель не менее $R_m = 0,160$ мм. Установлено, что предел скорости газового потока u_g при котором наблюдается практически полный разворот и последующий унос капельного

потока с характерными размерами отдельных капель $0,09 \leq R_m \leq 0,35$ мм составляет от 1,5 м/с до 2 м/с.

11. Теоретический анализ результатов выполненных экспериментов позволяет сделать вывод о том, что «диффузионные» модели фазовых превращений в системе «капля жидкости – газовая среда» хорошо соответствуют результатам экспериментальных исследований лишь в ограниченных диапазонах температур. Это обусловлено разными режимами испарения при относительно умеренных (условно до 500 К) и высоких (более 500 К) температурах. В частности, установлено, что характеристики испарения капель воды, полученные с использованием подхода, предполагающего реализацию «диффузионного» режима парообразования, существенно отличаются от экспериментальных значений при высоких (около 1000 К) температурах. При таких температурах целесообразно использовать «кинетические» модели испарения. При этом необходимо учитывать кондуктивный и радиационный теплоперенос в капле, а также сложный теплообмен на границе «жидкость – газ».
12. Разработанные рекомендации практического использования полученных экспериментальных результатов позволяют обосновать выбор основных (начальные размеры капель в потоке, их температура, скорость движения и компонентный состав) параметров технологического оборудования (распылительных систем, нагревателей, вентиляторов, кондиционеров и других блоков) для реализации высокотемпературной испарительной очистки воды, охлаждения циркуляционной воды в градирнях ТЭС, технологий размораживания сыпучих сред газопарожидкостными потоками, очистки поверхностей газопарокапельными смесями, технологии создания теплоносители на базе уходящих дымовых газов и парокапельных потоков, а также полидисперсного пароводяного пожаротушения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработан новый подход к анализу макроскопических закономерностей фазовых превращений и деформации капель воды и ее растворов, движущихся в газовых и паровых средах теплоэнергетического оборудования (при различных температурах), отличающийся от известных применением панорамных оптических методов «трассерной» визуализации, кросскорреляционных видеокомплексов, а также импульсных твердотельных лазеров.
2. Проведены экспериментальные исследования процессов деформации и фазовых превращений капель воды с использованием разработанного нового подхода для типичных (температуры газов от 275 К до 1100 К, воды – от 280 К до 360 К) условий эксплуатации теплоэнергетического оборудования (в частности, градирен и систем водоподготовки ТЭС).
3. Установлены макроскопические закономерности и основные характеристики деформации и фазовых превращений однородных и неоднородных (с примесями и твердыми включениями) капель воды при различных температурах (от 275 К до 1100 К) газов, характерных для теплоэнергетического оборудования.
4. Определено влияние основных параметров газов (температура, скорость движения) и капель воды (размеры, скорость движения, температура, дисперсность в потоке, состав) на интенсивность фазовых превращений и их деформации.
5. Выделены два характерных режима и определены скорости фазовых превращений, а также установлены численные значения коэффициента испарения капель воды в условиях интенсивного нагрева.
6. Показаны существенные отличия фазовых превращений одиночных капель и капельных водяных потоков (особенно полидисперсных) при движении через высокотемпературные газы.

7. Установлены два режима коагуляции капель водяного потока при движении в газовой среде в условиях интенсивных фазовых превращений.
8. Определены характерные формы и времена существования (не более 15 % от времени движения) капель воды в этих формах в процессе перемещения через газовые среды при различных температурах последних. Установлены два режима переходов от одной формы капель к другой.
9. Сформулированы аппроксимационные выражения для зависимостей интегральных параметров деформации и фазовых превращений от исследованных процессов и факторов.
10. Разработаны рекомендации для создания новых, а также модернизации существующих средств и систем подачи и охлаждения воды в рабочей области градирен ТЭС, технологий высокотемпературной очистки воды на объектах энергетики (в частности, ТЭС), размораживания сыпучих сред газопарожидкостными потоками, очистки поверхностей различных конструкций газопарокапельными смесями, полидисперсного пароводяного пожаротушения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стерман, Л.С. Тепловые и атомные электрические станции / Л.С. Стерман, В.М. Лавыгин, С.Г. Тишин. – Изд. 5-е, перераб. – М., 2010. – 463 с.
2. Ольховский, Г.Г. Перспективы тепловых электростанций / Г.Г. Ольховский // Электрические станции. – 2010. – № 1. – С. 8-17.
3. Соболев, И.В. Укрупненные нормы водопотребления и водоотведения для различных отраслей промышленности / И.В. Соболев, Г.А. Лебедев, С.И. Погудина. – М., 1982.
4. Дмитриева, О.С. Разработка новых градирен для увеличения энергоэффективности промышленных установок / О.С. Дмитриева, А.В. Дмитриев // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17, № 6. – С. 134-136.
5. Совершенствование конструкций оросителей из сетчатых пластмассовых труб / Ю.И. Арефьев, Л.П. Беззатеева, М.Л. Лежнев, Г.Г. Рыжаков // Водоснабжение и санитарная техника. – 2011. – № 12. – С. 29-36.
6. Шибитова, Н.В. Реконструкция вентиляторной насадочной градирни / Н.В. Шибитова, Н.С. Шибитов, С.В. Коленчук // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2012. – Т. 1, № 5. – С. 22-24.
7. Новые конструктивные решения комбинированных градирен / С.Б. Походяев, Ю.И. Аношкин, Н.Г. Пименкова, Ю.С. Походяева // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. – 2007. – № 7. – С. 40-43.
8. Беззатеева, Л.П. Влияние расположения сетчатых элементов на эффективность оросителя / Л.П. Беззатеева, Ю.И. Арефьев, Н.Н. Сухова // Водоснабжение и санитарная техника. – 2009. – № 10-2. – С. 37-42.
9. Пушнов, А.С. Влияние высоты блоков насадки пленочного типа с вертикальными гофрами на эффективность процесса испарительного охлаждения воды в градирне / А.С. Пушнов, А.А. Харитонов // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева. – 2012. – Т. 267, № 1. – С. 121-131.

10. Влияние высоты слоя регулярной насадки на эффективность процесса испарительного охлаждения / Д.Ф. Масагутов, А.С. Пушнов, Л.А. Тарасова, В.И. Шишов // Энергосбережение и водоподготовка. – 2013. – № 2 (82). – С. 24-27.
11. Масагутов, Д.Ф. Влияние удельной поверхности и гидравлического сопротивления регулярных насадок на эффективность процесса испарительного охлаждения оборотной воды в градирне / Д.Ф. Масагутов, А.С. Пушнов // Энергосбережение и водоподготовка. – 2011. – № 5. – С. 65-68.
12. Дмитриева, К.В. Повышение эффективности теплоэнергетических процессов при использовании воздушных конденсаторов / К.В. Дмитриева, О.С. Дмитриева // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17, № 11. – С. 103-105.
13. Даутов, Р.Г. Повышение эффективности процесса охлаждения в градирне / Р.Г. Даутов, С.А. Вилохин // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – Т. 16. – № 5. – С. 190-192.
14. Сосновский, С.К. Оптимальные параметры работы градирен / С.К. Сосновский // Технологический аудит и резервы производства. – 2012. – Т. 5, № 1 (7). – С. 5-6.
15. Повышение экономичности и надежности конденсационных устройств поверхностного и смешанного типа / Г.И. Канюк, Д.В. Михайский, Л.Н. Омельченко и др. // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – Т. 3, № 8 (51). – С. 24-28.
16. Курицын, В.А. Оптимизация процесса охлаждения циркуляционной воды в градирнях с искусственной тягой / В.А. Курицын, Д.В. Арапов, Р.Л. Горильченко // Химия и технология топлив и масел. – 2012. – № 2. – С. 12-17.
17. Свердлин, Б.Л. Методика гидроаэротермических расчетов эжекционных градирен: диссертация кандидата технических наук / Свердлин Борис Львович. – Санкт-Петербург, 2005. – 106 с.

18. Нестеренко, А.В. Основы термодинамических расчетов вентиляции и кондиционирования воздуха. – Москва: Высшая школа, 1970. – 459 с.
19. Фарфоровский, Б.С. Охладители циркуляционной воды тепловых электростанций / Б.С. Фарфоровский, В.Б. Фарфоровский. – Л., 1972. – 111 с.
20. Щукин, В.К. Теплообмен, массообмен и гидродинамика закрученных потоков в осесимметричных каналах / В.К. Щукин, А.А. Халатов.– М., 1982. – 200 с.
21. Исаченко, В.П. Теплопередача / В.П. Исаченко, В.А. Осипов, А.С. Сукомел – Изд.3, перераб. и доп. – М., 1975. – 488 с.
22. Берман, Л.Д. Испарительное охлаждение циркуляционной воды / Л.Д. Берман – 2 изд. – М.–Л., 1957. – 320 с.
23. Петручик, А.И. Тепловой расчет брызгально-эжекционных градирен / А.И. Петручик // Энергосбережение и водоподготовка. – 2009. – Т. 58, № 2. – С. 21-22.
24. Ваганов, А.А. Исследование тепло- массообменных характеристик сетчатой насадки / А.А. Ваганов, А.С. Тимонин // Безопасность в техносфере. – 2011. – № 2. – С. 37-42.
25. Свердлин, Б.Л. Исследования систем технического водоснабжения и охладителей тепловых и атомных электростанций / Б.Л. Свердлин, Т.Б. Ищук, О.С. Николаева // Гидротехническое строительство. – 2011. – № 9. – С. 83-87.
26. Витковская, Р.Ф. Результаты аэротермических испытаний конструкции полимерного оросителя из капроновой сетки / Р.Ф. Витковская, А.С. Пушнов, М.С. Трусов // Дизайн. Материалы. Технология. – 2010. – № 2. – С. 30-32.
27. Экспериментальная установка для исследования тепломассообменных процессов в насадочных устройствах градирен / Н.А. Меренцов, В.А. Балашов, А.Б. Голованчиков, Я.А. Орлянкина // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2012. – Т. 1, № 5. – С. 78-80.

28. Проектирование научной экспериментальной установки для исследования вылета капель из пленки жидкости / А.А. Исаев, Г.Х. Гумерова, О.С. Дмитриева, А.В. Дмитриев // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17, № 7. – С. 104-106.
29. Математическая модель охлаждения оборотной воды в градирне с механической тягой / В.К. Битюков, С.Г. Тихомиров, Д.В. Арапов, С.С. Саввин // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2014. – № 1 (59). – С. 51-55.
30. Очков, В.Ф. Дифференциальные уравнения - полет капли воды / В.Ф. Очков, К.К. Чжо // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. – 2014. – № 3 (75). – С. 50-56.
31. Шарифуллин, В.Н. Анализ влияния неравномерности распределения плотности орошения на процесс в башенной градирне / В.Н. Шарифуллин, А.И. Бадриев, А.В. Шарифуллин // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2013. – № 11-12. – С. 24-26.
32. Маринюк, Б.Т. Моделирование процессов тепло и массообмена в вакуумной градирне / Б.Т. Маринюк, К.С. Крысанов, С.В. Спритнюк // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. – 2012. – Т. 4, № 2 (14). – С. 152-155.
33. Солодов, А.П. Дифференциальная модель тепломассообменника / А.П. Солодов // Тепловые процессы в технике. – 2010. – № 8. – С. 364-370.
34. Афанасенко, В.Г. Моделирование процесса охлаждения оборотной воды в градирнях / В.Г. Афанасенко, Е.В. Боев, Е.А. Николаев // Бутлеровские сообщения. – 2012. – Т. 29, № 2. – С. 122-127.
35. Анализ надежности прикладной программы для ПК по оптимизации водно-химического режима оборотных систем охлаждения с градирнями / И.Ш. Загретдинов, В.В. Тропин, Ю.Ф. Боднарь и др. // Энергосбережение и водоподготовка. – 2012. – № 4. – С. 2-6.

36. Гильфанов, К.Х. Тепло- и массообмен при охлаждении воды в оросителях градирни с принудительной тягой / К.Х. Гильфанов, Ф.М. Давлетшин, Д.Р. Гилязов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2009. – № 11-12. – С. 33-40.
37. Математическое моделирование процессов тепломассообмена в градирне / Н.Н. Случанинов, В.И. Масько, Е.В. Балашов, Е.Г. Коршунов // Энергосбережение и водоподготовка. – 2011. – № 6. – С. 31-32.
38. Фисенко, С.П. Математическое моделирование тепломассообмена при испарительном охлаждении капель воды в градирне / С.П. Фисенко // Инженерно-физический журнал. – 1993. – Т.64, №2. – С.154-160.
39. Солодухин, А.Д. Математическое моделирование охлаждения капельных и пленочных течений воды в башенных испарительных градирнях / А.Д. Солодухин, С.П. Фисенко, А.И. Петручик // Инженерно-физический журнал. – 2001. – Т.64, №1. – С.45-49.
40. Fisenko, S.P. Evaporative cooling of water in a natural draft cooling tower / S.P. Fisenko, A.I. Petruchik, A.D. Solodukhin // Int. J. of Heat and Mass Tr. – 2002. – Vol. 45, №23. –P. 4683-4694.
41. Keane, R.D. Theory of cross-correlation analysis of PIV images / R.D. Keane, R.J. Adrian // Applied Scientific Research. – 1992. – Vol. 49. – P. 191–215.
42. Westerweel, J. Fundamentals of digital particle image velocimetry / J. Westerweel // Measurement Science and Technology. – 1997. – Vol. 8. – P. 1379–1392.
43. Foucaut, J.M. Some considerations on the accuracy and frequency response of some derivative filters applied to particle image velocimetry vector fields / J.M. Foucaut, M. Stanislas // Measurement Science and Technology. – 2002. – Vol. 13. – P. 1058–1071.
44. Willert, C. Assessment of camera models for use in planar velocimetry calibration / C. Willert // Exp. Fluids. – 2006. – Vol. 41. – P. 135-143.
45. Raffel, M. Particle image Velocimetry. A practical guide / M. Raffel, C. Willert, J. Kompenhans, – Berlin, – 1998. –253 p.

46. Дубровский, В.В. Измерение периода собственных колебаний капель и двухкомпонентных частиц / В.В. Дубровский, В.В. Подвысоцкий, А.А. Шрайбер // Инженерно-физический журнал. – 1990. – Т. 58, № 5. – С. 804–808.
47. Пономаренко, В.С. Градирни промышленных и энергетических предприятий: Справочное пособие / В.С. Пономаренко, Ю.И. Арефьев. – М., 1998. – 376 с.
48. К вопросу о снижении льдообразования на элементах башенных градирен / А.В. Волков, А.А. Патакин, В.И. Лисица, А.В. Наумов // Естественные и технические науки. – 2013. – № 2. – С. 350–357.
49. 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. – Т. XIV, № 4. – С. 23–26.
50. Тулепбаев, В.Б. Применение вакуумных выпаривателей для очистки сточных вод гальванического производства / В.Б. Тулепбаев, И.Ю. Дьяченко // Гальванотехника и обработка поверхности. – 2008. – Т. XVI, № 1. – С. 40–45.
51. 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.
52. Никитин, М.Н. Влияние направленного впрыска воды в теплогенераторе на давление получаемой парогазовой смеси / М.Н. Никитин // Промышленная энергетика. – 2010. – № 6. – С. 42–46.
53. Юша, В.Л. Оценка термодинамической эффективности системы утилизации тепловых потерь силовых и теплоэнергетических установок / В.Л. Юша, Г.И. Чернов, Н.А. Райковский // Проблемы региональной энергетики. – 2012. – № 3 (20). – С. 28–39.
54. Выбор оптимальных параметров теплоносителей при разработке системы глубокой утилизации теплоты уходящих из котельных агрегатов газов / А.В.

- Ефимов, А.Л. Гончаренко, О.В. Касилов, Л.В. Гончаренко // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2014. – № 3 (121). – С. 2–11.
55. Дудник, Н.М. Моделирование процесса пленочной конденсации пара из парогазовых смесей различного состава на наружной поверхности вертикальных труб теплообменного аппарата / Н.М. Дудник, А.Б. Горяев // Теплоэнергетика. – 2010. – № 6. – С. 63–68.
56. Нигматуллина, Э.Р. Повышение эффективности устройств для термического обезвреживания и очистки сточных вод: диссертация кандидата технических наук / Нигматуллина Эльвира Римовна. – Уфа, 2002. – 146 с.
57. Фильтрационное горение при десорбции углеводородов из пористой среды / С.И. Футько, К.В. Доброго, Е.С. Шмелев и др. // Инженерно-физический журнал. – 2003. – Т. 76, № 6. – С. 88–96.
58. Стрижак, П.А. Численный анализ процесса испарения капли, движущейся в струе воды через высокоскоростные продукты сгорания / П.А. Стрижак // Пожаровзрывобезопасность. – 2012. – № 9. – С. 17–22.
59. Стрижак, П.А. Численное исследование условий испарения совокупности капель воды при движении в высокотемпературной газовой среде / П.А. Стрижак // Пожаровзрывобезопасность. – 2012. – № 8. – С. 26–31.
60. Тепломассоперенос при взаимодействии диспергированного флегматизатора горения с высокотемпературными продуктами сгорания / Г.Г. Андреев, Д.О. Глушков, В.Ф. Панин, П.А. Стрижак // Бутлеровские сообщения. – 2012. – № 8. – С. 86–94.
61. Глушков, Численное исследование тепломассопереноса при движении «тандема» капель воды в высокотемпературной газовой среде / Д.О. Глушков, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // Тепловые процессы в технике. – 2012. – № 12. – С. 531–538.
62. Стрижак, П.А. Численный анализ диффузионно-конвективных процессов тепломассопереноса при движении капель воды через высокотемпературные

- продукты сгорания / П.А. Стрижак // Пожаровзрывобезопасность. – 2013. – Т. 22, № 7. – С. 11–21.
63. Бояршинов, Б.Ф. Конвективный теплообмен при испарении жидкости в газовый поток / Б.Ф. Бояршинов, Э.П. Волчков, В.И. Терехов // Известия СО РАН СССР. – 1985. – Вып.3, № 16. – С. 13–22.
64. Экспериментальное исследование влияния концентрации мелкодисперсных капель жидкости на эффективность газовой завесы / Э.П. Волчков, В.П. Лебедев, В.И. Терехов, Н.Е. Шишкин // Сибирский физико-технический журнал. – 1992. – Вып.1. – С. 28–32.
65. Терехов, В.И. Экспериментальное исследование смешения газового потока с пристенной газочапельной струей / В.И. Терехов, К.А. Шаров, Н.Е. Шишкин // Теплофизика и аэромеханика. – 1999. – Т. 6, № 3. – С. 331–340.
66. Терехов, В.И. Влияние испарения жидких капель на распределение параметров в двухкомпонентном ламинарном потоке / В.И. Терехов, М.А. Пахомов, А.В. Чичиндаев // Прикладная механика и техническая физика. – 2000. – Т. 41, № 6. – С. 68–77.
67. Терехов, В.И. Теплообмен при ламинарном развитом течении парочапельного потока в трубе / В.И. Терехов, М.А. Пахомов, А.В. Чичиндаев // Теплофизика и аэромеханика. – 2000. – Т. 7, № 4. – С. 523–537.
68. Терехов, В.И. Численное исследование гидродинамики, тепло- и массообмена двухфазного газопарочапельного потока в трубе / В.И. Терехов, М.А. Пахомов // Прикладная механика и техническая физика. – 2003. – Т. 44, № 1. – С.108–122.
69. Terekhov, V.I. Numerical simulation of hydrodynamics and convective heat transfer in turbulent tube mist flow / V.I. Terekhov, M.A. Pakhomov // Int. J. of Heat and Mass Transf. – 2003. – Vol. 46, № 9. – P.1503–1517.
70. Volchkov, E.P. A numerical study of boundary layer heat and mass transfer in a forced convection of humid air with surface steam condensation / E.P. Volchkov,

- V.V. Terekhov, V.I. Terekhov // Int. J. of Heat and Mass Transf. – 2004. – Vol. 47. – P. 1473–1481.
71. Терехов, В.И. Экспериментальное исследование температуры адиабатического испарения бинарных смесей жидкости / В.И. Терехов, Н.Е. Шишкин // Труды IV национальной конференции по теплообмену. – М., 2006. – Т. 5. – С. 183–186.
 72. 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.
 73. Теплообмен в недогретой до температуры насыщения испаряющейся пленке жидкости / Е.А. Чиннов, О.А. Кабов, О.В. Жуковская, И.А. Ширина // Теплофизика высоких температур. – 2006. – Т. 44, № 6. – С. 903–912.
 74. Марчук, И.В. Конденсация пара на неизотермических криволинейных ребрах / И.В. Марчук, А.В. Глушук, О.А. Кабов // Письма в Журнал технической физики. – 2006. – Т. 32, № 9. – С. 42–49.
 75. Барташевич, М.В. Численное моделирование естественной конвекции в лежащей капле жидкости / М.В. Барташевич, И.В. Марчук, О.А. Кабов // Теплофизика и аэромеханика. – 2012. – Т. 19, № 2. – С. 171–182.
 76. Люлин, Ю.В. Измерение массовой скорости испарения в горизонтальном слое жидкости, частично открытом в движущийся газ / Ю.В. Люлин, О.А. Кабов // Письма в Журнал технической физики. – 2013. – Т. 39, № 17. – С. 88–94.
 77. Вараксин, А.Ю. Гидрогазодинамика и теплофизика двухфазных потоков: проблемы и достижения / А.Ю. Вараксин // Теплофизика высоких температур. – 2013. – Т. 51, № 3. – С. 421–455.
 78. Лабунцов, Д.А. Анализ процессов испарения и конденсации / Д.А. Лабунцов // Теплофизика высоких температур. – 1967. – Т. 5, № 4. – С. 647–654.

79. Муратова, Т.М. Кинетический анализ процессов испарения и конденсации / Т.М. Муратова, Д.А. Лабунцов // Теплофизика высоких температур. – 1969. – Т. 7, № 5. – С. 959–967.
80. Лабунцов, Д.А. Процессы интенсивного испарения / Д.А. Лабунцов, А.П. Крюков // Теплоэнергетика. – 1977. – №4. – С. 8–11.
81. Labuntsov, D.A. An analysis of intensive evaporation and condensation / D.A. Labuntsov, A.P. Krykov // Int. J. of Heat and Mass Transf. –1979. – Vol. 22. – P. 989–1002.
82. Лабунцов, Д.А. Физические основы энергетики. Избранные труды по теплообмену, гидродинамике, термодинамике / Д.А. Лабунцов. – Москва: Изд-во МЭИ, 2000. – 388 с.
83. Krykov, A.P. About evaporation-condensation coefficients on the vapor-liquid interface of high thermal conductivity matters / A.P. Krykov, V.Yu. Levashov // Int. J. of Heat and Mass Transf. – 2011. – Vol. 54, № 13–14. – P. 3042–3048.
84. Крюков, А.П. Граничные условия для задач испарения-конденсации в парогазовых смесях / А.П. Крюков, В.Ю. Левашов // Вестник Московского энергетического института. – 2008. – № 3. – С. 24–30.
85. Крюков, А.П. Конденсация из парогазовой смеси / А.П. Крюков, В.Ю. Левашов, Н.В. Павлюкевич // Инженерно-физический журнал. – 2010. – Т. 83, № 4. – С. 637–644.
86. Кнаке, О. Механизм испарения / О. Кнаке, И.Н. Странский // Успехи физических наук. – 1959. – Т. 68, Вып.2. – С 261–305.
87. Gusarov, A.V. Gas-dynamic boundary conditions of evaporation and condensation: numerical analysis of the Knudsen layer / A.V. Gusarov, I. Smurov // Phys. of Fluids. – 2002. – Vol. 14, № 12. – P. 4242–4255.
88. Nakoryakov, V.E. Heat and mass transfer in film absorption / V.E. Nakoryakov, N.I. Grigoryeva // J. of Engineering Thermophysics. – 1992. – Vol. 2, № 1. – P. 1–16.

89. Тепломассоперенос при абсорбции пара неподвижным слоем раствора / В.Е. Накоряков, Н.С. Буфетов, Н.И. Григорьева, Р.А. Дехтярь // Прикладная механика и техническая физика. – 2003. – Т. 44, № 2. – С.101–108.
90. Misyura, S.Y. Peculiarities of nonisothermal desorption of drops of lithium bromide water solution on a horizontal heated surface / S.Y. Misyura, V.E. Nakoryakov, S.L. Elistratov // J. of Engineering Thermophysics. – 2011. – Vol. 20, № 4. – P. 1–6.
91. Misyura, S.Y. Evaporation of water solution droplets on a horizontal heating surface / S.Y. Misyura, V.E. Nakoryakov, S.L. Elistratov // Int. J. of Energy & Technol. – 2012. – Vol. 4, № 9. – P. 1–7.
92. Misyura, S.Y. The behavior of water droplets on the heated surface / S.Y. Misyura, V.E. Nakoryakov, S.L. Elistratov // Int. J. of Heat and Mass Transf. – 2012. – Vol. 55, № 23–24. – P. 6609–6617
93. Накоряков, В.Е. Влияние концентрации растворов солей на процесс десорбции капли / В.Е. Накоряков, С.Л. Елистратов, С.Я. Мисюра // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2013. – № 1–2. – С. 14–17.
94. Application of a high-speed laser-induced fluorescence technique for studying the three-dimensional structure of annular gas–liquid flow / S. Alekseenko, A. Cherdantsev, M. Cherdantsev et al.// Exp. in Fluids. – 2012. – Vol. 53, № 1. – P. 77–89.
95. Application of PIV to velocity measurements in a liquid film flowing down an inclined cylinder / S. Alekseenko, V. Antipin, A. Bobylev, D. Markovich // Exp. in Fluids. – 2007. – Vol. 43, № 2–3. – P. 197–207.
96. 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.
97. Yuen, M.C. Heat-transfer measurements of evaporating liquid droplets / M.C. Yuen, L.W. Chen // Int. J. of Heat and Mass Transf. – 1978. – Vol. 21, № 5. – P. 537–542.

98. Renksizbulut, M. Experimental study of droplet evaporation in a high-temperature stream / M. Renksizbulut, M.C. Yuen // *J. of Heat Transfer.* – 1983. – Vol. 105. – P. 384–388.
99. Renksizbulut, M. Numerical study of droplet evaporation in a high-temperature stream / M. Renksizbulut, M.C. Yuen // *J. of Heat Transfer.* – 1983. – Vol. 105. – P. 389–397.
100. Sazhin, S.S. Advanced models of fuel droplet heating and evaporation / S.S. Sazhin // *Prog. in Energy and Combust. Sci.* – 2006. – Vol. 32, № 2. – P. 162–214.
101. Multi-component droplet heating and evaporation: Numerical simulation versus experimental data / S.S. Sazhin, A.E. Elwardany, P.A. Krutitskii et al. // *Int. J. of Therm. Sci.* – 2011. – Vol. 50, № 7. – P. 1164–1180.
102. Sazhin, S.S. Droplet heating and evaporation-recent results and unsolved problems / S.S. Sazhin, M.R. Heikal // *Computational Therm. Sci.* – 2012. – Vol. 4, № 6. – P. 485–496.
103. New models for droplet heating and evaporation / S.S. Sazhin, A.E. Elwardany, I.G. Gusev et al. // *Asian J. of Sci. Res.* – 2013. – Vol. 6, № 2. – P. 177–186.
104. Сметанюк, В.А. Испарение и горение капли углеводородного топлива. III. Прогрев капли в газовом потоке с учетом внутренних движений жидкости / В.А. Сметанюк, С.М. Фролов // *Химическая физика.* – 2004. – Т. 23, № 7. – С. 32–40.
105. Аггарвол, С.К. Сравнение различных методов расчета испарения капель / С.К. Аггарвол, А.И. Тонг, В.А. Сириньяно // *Аэрокосмическая техника.* – 1985. – Т. 3, № 7. – С. 12–24.
106. Tong, A.Y. Multycomponent transient droplet vaporization with internal circulation: integral equation formulation and approximate solution / A.Y. Tong, W.A. Sirignano // *Numer. Heat Transf.* – 1986. – Vol. 10. – P. 253–278.
107. Шупляк, А.Ю. Математическое моделирование массопереноса в процессе испарения многокомпонентных жидкостей / А.Ю. Шупляк, С.П. Шкаруппа, А.М. Штеренберг // *Вестник Самарского государственного технического*

- университета. Серия: Физико-математические науки. – 2013. – Т. 32, № 3. – С. 98–109.
108. Моделирование течения жидкости в ёмкости при испарении легких примесей / М.В. Чуканов, И.М. Васенин, П.В. Зернаев и др. // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013. – Т. 56, № 6–3. – С. 173–175.
109. Кузнецов, В.В. Движение жидкой пленки и газового потока в микроканале с испарением / В.В. Кузнецов, В.К. Андреев // Теплофизика и аэромеханика. – 2013. – Т. 20, № 1. – С. 17–28.
110. Печеркин, Н.И. Теплоотдача при испарении стекающих пленок смеси фреонов на гладкой и структурированной поверхностях / Н.И. Печеркин, А.Н. Павленко, О.А. Володин // Теплофизика и аэромеханика. – 2011. – Т. 18, № 4. – С. 605–616.
111. Володин, О.А. Теплообмен и волновые характеристики при течении пленки бинарной смеси фреонов по поверхности с трехмерной текстурой / О.А. Володин, А.Н. Павленко, Н.И. Печеркин // Теплофизика высоких температур. – 2013. – Т. 51, № 6. – С. 864–875.
112. Собко, А.А. Прикладные аспекты классической термодинамики. Часть I. Вычисление теплоты перехода фазовых превращений первого рода / А.А. Собко // Прикладная физика. – 2011. – № 1. – С. 32–42.
113. Собко, А.А. Прикладные аспекты классической термодинамики Часть II. Некоторые следствия из выражений для теплоты перехода фазовых переходов первого рода / А.А. Собко // Прикладная физика. – 2011. – № 4. – С. 31–35.
114. Собко, А.А. Прикладные аспекты классической термодинамики часть III. Термодинамика «модельных» газов / А.А. Собко // Прикладная физика. – 2011. – № 5. – С. 28–34.
115. Никитин, М.Н. Использование парогазовой смеси при сжигании топлива / М.Н. Никитин // Промышленная энергетика. – 2010. – № 12. – С. 37–42.

116. Ибатуллин, И.Д. Кинетика усталостной повреждаемости и разрушения поверхностных слоев / И.Д. Ибатуллин. – Самара: СГТУ, 2008. – 387 с.
117. Першин, В.Ф. Переработка сыпучих материалов в машинах барабанного типа / В.Ф. Першин, В.Г. Однолько, С.В. Першина. – М., 2009. – 220 с.
118. Теория управления окомкованием сыпучих материалов / Е.А. Исаев, И.Е. Чернецкая, Л.Н. Крахт, В.С. Титов. – Старый Оскол, 2012. – 384 с.
119. Автоматическое водяное пожаротушение с применением тонкораспыленной воды на электростанциях / В.В. Соковиков, А.Н. Тугов, В.В. Гришин, В.Н. Камышев // Энергетик. – 2008. – № 6. – С. 37–38.
120. Hertz H. // Ann. Phys. Chem. – 1882. – Vol. 253. – P. 177.
121. Knudsen M. // Ann. Phys. – 1915. – Vol. 352. – P. 697.
122. Авдеев, А.А. Кинетический анализ интенсивного испарения (метод обратных балансов) / А.А. Авдеев, Ю.Б. Зудин // Теплофизика высоких температур. – 2012. – Т. 50, № 4. – С. 565–574.
123. Фазовый переход пар-кристалл при синтезе пленок парацетамола методом вакуумного испарения и конденсации / А.П. Беляев, В.П. Рубец, В.В. Антипов и др. // Журнал технической физики. – 2014. – Т. 84, № 3. – С. 141–143.
124. Самохин, А.А. О взрывном вскипании жидкости на подложке под действием субнаносекундного лазерного импульса / А.А. Самохин, А.Ю. Ивочкин // Краткие сообщения по физике Физического института им. П.Н. Лебедева Российской Академии Наук. – 2013. – Т. 6. – С. 13–20.
125. Гордеева, В.Ю. Влияние термокапиллярного эффекта на динамику и устойчивость движения испаряющейся тонкой пленки / В.Ю. Гордеева, А.В. Люшнин // Журнал технической физики. – 2013. – Т. 83, № 3. – С. 41–47.
126. Корепанов, М.А. Моделирование взаимодействия потоков газожидкостных сред / М.А. Корепанов, А.А. Шаклеин, В.Н. Ерёмин // Химическая физика и мезоскопия. – 2012. – Т. 14, № 4. – С. 552–556.

127. Актёршев, С.П. Модель вскипания сильно перегретой жидкости с формированием фронта испарения / С.П. Актёршев, В.В. Овчинников // Теплофизика и аэромеханика. – 2011. – Т. 18, № 4. – С. 617–628.
128. Масс-спектрометрическое исследование конденсации и испарения пленки теллура на сапфире / В.И. Михайлов, Л.Е. Поляк, В.М. Каневский, А.С. Писарев // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2014. – № 4. – С. 5.
129. Прогнозирование долговечности строительных конструкций с позиций расчетного и экспериментального исследования процессов коррозии бетона / С.В. Федосов, В.Е. Румянцева, В.А. Хрунов и др. // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2009. – № 14. – С. 117–122.
130. Трофимов, Б.Я. Коррозия бетона: монография / Б. Я. Трофимов, М. И. Муштаков // Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное агентство по образованию, Южно-Уральский гос. ун-т. Челябинск, – 2008.
131. Анохина, Е.В. Исследование процессов испарения и кипения жидкостей / Е.В. Анохина // Журнал технической физики. – 2010. – Т. 80, № 8. – С. 32–37.
132. Batchelor, G.K. On steady laminar flow with closed streamlines at large Reynolds number / G.K. Batchelor // J. of Fluid Mech. – 1956. – Vol. 1, № 2. – P. 177–190.
133. Harper, J.F. The motion of a spherical liquid drop at high Reynolds number / J.F. Harper, D.W. Moore // J. of Fluid Mech. – 1968. – Vol. 32, № 2. – P. 367–391.
134. Hill, M.J.M. On a Spherical Vortex / M.J.M. Hill // Phil. Trans. R. Soc. Lond. A. – 1894 –P. 213–245.
135. Prakash, S. Liquid fuel droplet heating with internal circulation / S. Prakash, W.A. Sirignano // Int. J. of Heat and Mass Transf. – 1978. – Vol. 21, № 7. –P. 885–895.
136. Детковский, Д.А. Модель деформации капли жидкости в газовом потоке / Д.А. Детковский, С.М. Фролов // Прикладная механика и техническая физика. – 1994. – № 6. – С. 105–114.

137. Simpkins, P.G. Water-drop response to sudden accelerations / P.G. Simpkins, E.L. Bales // *J. of Fluid Mech.* – 1972. – Vol. 55, № 4. – P. 629–639.
138. Бойко, В.М. О динамике дробления капель в ударных волнах / В.М. Бойко, А.Н. Папырин, С.В. Поплавский // *Прикладная механика и техническая физика.* – 1987. – № 2. – С. 108–115.
139. Wierzba, A. Deformation and breakup of liquid drops in a gas stream at nearly critical Weber numbers / A. Wierzba // *Exp. in Fluids.* – 1990. – Vol. 9, № 1–2. – P. 59–64.
140. The initial stage of fuel spray penetration / S. Sazhin, C. Crua, D. Kennaird, M. Heikal // *Fuel.* – 2003. – Vol. 82, № 8. – P. 875–885.
141. Волков, Р.С. Численная оценка оптимальных размеров капель воды в условиях ее распыления средствами пожаротушения в помещениях / Р.С. Волков, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // *Пожаровзрывобезопасность.* – 2012. – № 5. – С. 74–78.
142. Волков, Р.С. Численное исследование условий взаимодействия диспергированного флегматизатора горения с высокотемпературными продуктами сгорания / Р.С. Волков, О.В. Высокоморная, П.А. Стрижак // *Безопасность труда в промышленности.* – 2012. – № 10. – С. 74–79.
143. 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. of Eng. Phys. and Thermophys.* – 2013. – Vol. 86, № 1. – P. 62–68.
144. Жданова, А.О. Влияние распределения капель воды в «водяном снаряде» на температуру в его следе / А.О. Жданова, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // *Пожаровзрывобезопасность.* – 2013. – № 2. – С. 9–17.
145. Численное исследование влияния условий распыления воды на температуру в следе «водяного снаряда» / О.В. Высокоморная, А.О. Марков, М.Н. Назаров и др. // *Известия Томского политехнического университета.* – 2013. – Т. 322, № 4. – С. 24–31.

146. 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. of Eng. Phys. and Thermophys. – 2013. – Vol. 86, № 4. – P. 895–904.
147. Кузнецов, Г.В. Оценка эффективности использования теплоты испарения воды при тушении лесных пожаров / Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // Пожаровзрывобезопасность. – 2013. – № 9. – С. 57–63.
148. Кузнецов, Г.В. Влияние структуры распыленной воды на температуру и концентрацию продуктов горения / Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // Пожарная безопасность. – 2013. – № 4. – С. 47–53.
149. Kuznetsov, G.V. Numerical investigation of the influence of convection in a mixture of combustion products on the integral characteristics of the evaporation of a finely atomized water drop / G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak // J. of Eng. Phys. and Thermophys. – 2014. – Vol. 87, № 1. – P. 103–111.
150. Жданова, А.О. Эффективность использования теплоты парообразования при воздействии «водяным снарядом» на пламя / А.О. Жданова, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2013. – № 6. – С. 82–91.
151. Жданова, А.О. Роль дисперсности воды, сбрасываемой авиацией в зону горения лесных массивов / А.О. Жданова, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // Безопасность труда в промышленности. – 2014. – № 1. – С. 43–49.
152. Жданова, А.О. Влияние температуры в следе «водяного снаряда» на условия термического разложения типичного лесного горючего материала / А.О. Жданова, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2014. – № 1. – С. 48–55.
153. 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.
154. Кузнецов, Г.В. Влияние формы капли воды на результаты математического моделирования ее испарения при движении через высокотемпературные

- продукты сгорания / Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // Тепловые процессы в технике. – 2013. – № 6. – С. 254–261.
155. Glushkov, D.O. Numerical investigation of water droplets shape influence on mathematical modeling results of its evaporation in motion through a high-temperature gas / D.O. Glushkov, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak / Math. Probl. in Eng. – 2014. – Vol. 2014. – Article ID 920480. – 8 p.
156. Песочин, В.Р. Возбуждение акустических колебаний при горении капель жидкого топлива при сверхкритическом давлении / В.Р. Песочин // Теплофизика высоких температур. – 2011. – Т. 49, № 6. – С. 937.
157. Pakhomov, M.A. Enhancement of an impingement heat transfer between turbulent mist jet and flat surface / M.A. Pakhomov, V.I. Terekhov // Int. J. of Heat and Mass Transf. – 2010. – Vol. 53, № 15–16. – P. 3156–3165.
158. Пахомов, М.А. Интенсификация турбулентного теплообмена при взаимодействии туманообразной осесимметричной импактной струи с преградой / М.А. Пахомов, В.И. Терехов // Прикладная механика и техническая физика. – 2011. – Т. 52, № 1 (305). – С. 119–131.
159. Pakhomov, M.A. The effect of confinement on the flow and turbulent heat transfer in a mist impinging jet / M.A. Pakhomov, V.I. Terekhov // Int. J. of Heat and Mass Transf. – 2011. – Vol. 54, № 15–16. – P. 4266–4274.
160. Pakhomov, M.A. Second-moment closure simulation of flow and heat transfer in a gas-droplets turbulent impinging jet / M.A. Pakhomov, V.I. Terekhov // Int. J. of Therm. Sci. – 2012. – Vol. 60. – P. 1–12.
161. Panao, M.R.O. Intermittent spray cooling: A new technology for controlling surface temperature / M.R.O. Panao, A.L.N. Moreira // Int. J. of Heat and Fluid Flow. – 2009. – Vol. 30, № 1. – P. 117–130.
162. Moreira, A.L.N. An experimental methodology to quantify the spray cooling event at intermittent spray impact / A.L.N. Moreira, J. Carvalho, M.R.O. Panao // Int. J. of Heat and Fluid Flow. – 2007. – Vol. 28, № 2. – P. 191–202.

163. Назаров, А.Д. Структура импульсной распыленной струи при изменении ее частотных характеристик / А.Д. Назаров, А.Ф. Серов, В.И. Терехов // Теплофизика высоких температур. – 2011. – Т. 49, № 1. – С. 116–121.
164. Terekhov, V.I. Predictions of turbulent flow and heat transfer in gas–droplets flow downstream of a sudden pipe expansion / V.I. Terekhov, M.A. Pakhomov // Int. J. of Heat and Mass Transf. – 2009. – Vol. 52, № 21–22. – P.4711–4721.
165. Бильский, А.В. Интерферометрический метод измерения диаметров капель / А.В. Бильский, Ю.А. Ложкин, Д.М. Маркович // Теплофизика и аэромеханика. – 2011. – Т. 18, № 1. – С. 1–13.
166. Токарев, М.П. Адаптивные алгоритмы обработки изображений частиц для расчета мгновенных полей скорости / М.П. Токарев, Д.М. Маркович, А.В. Бильский // Вычислительные технологии. – 2007. – Т. 12, № 3. – С. 109–131.
167. Ахметбеков, Е.К. Корреляционная коррекция в методе слежения за частицами в потоках / Е.К. Ахметбеков, Д.М. Маркович, М.П. Токарев // Вычислительные технологии. – 2010. – Т. 15, № 4. – С. 57–72.
168. Uemura, T. A high speed algorithm of image analysis for real time measurement of two-dimensional velocity distribution / T. Uemura, F. Yamamoto, K. Ohmi // Flow Visualization. – 1989. –P. 129–134.
169. Hassan, Y.A. Full-field bubbly flow velocity measurements using a multiframe particle tracking technique / Y.A. Hassan, R.E. Canaan // Exp. Fluids – 1991. – Vol. 12. –P. 49–60.
170. Corvaro, F. Experimental PIV and interferometric analysis of natural convection in a square enclosure with partially active hot and cold walls / F. Corvaro, M. Paroncini, M. Sotte // Int. J. Therm. Sci. – 2011. – Vol. 50, № 9. P. 1629–1638.
171. Investigation of the flow characteristics in a multirow finned-tube heat exchanger model by means of PIV measurements / J.V. Simo Tala, S. Russeil, D. Bougeard, J.-L. Harion // Exp. Therm. and Fluid Sci. – 2013. – Vol. 50. – P. 45–53.
172. Koschatzky, V. A study on the application of two different acoustic analogies to experimental PIV data / V. Koschatzky, J. Westerweel and B.J. Boersma. // Phys. of Fluids. – 2011. – Vol. 23 (6), Article ID 065112.

173. An experimental investigation on fluid flow characteristics in a real coolant channel of LP turbine blade with PIV technique / J. Pu, Z.-Q. Ke, J. -H. Wang et al. // *Exp. Therm. and fluid sci.* – 2013. – Vol. 45. – P. 43–53.
174. Седов, Л.И. *Механика сплошной среды* / Л.И. Седов. – Москва: Наука, 1994. – 560 с.
175. Особенности физико-химических свойств нанопорошков и наноматериалов / А.П. Ильин, О.Б. Назаренко, А.В. Коршунов, Л.О. Роот. – Томск, 2012. – 196 с.
176. Кузнецов, Г.В. Зажигание жидкого пожароопасного вещества одиночной «горячей» металлической частицей / Г.В. Кузнецов, А.В. Захаревич, В.И. Максимов // *Известия вузов. Физика.* – 2007. – № 9/2. – С. 90–95.
177. Кузнецов, Г.В. Зажигание дизельного топлива одиночной «горячей» металлической частицей / Г.В. Кузнецов, А.В. Захаревич., В.И. Максимов // *Пожаровзрывобезопасность.* – 2008. – № 4. – С. 28–30.
178. Кузнецов, Г.В. О механизме зажигания бензина одиночной нагретой до высоких температур металлической частицей / Г.В. Кузнецов, А.В. Захаревич, В.И. Максимов // *Пожаровзрывобезопасность.* – 2008. – № 5. – С. 39–42.
179. Полежаев, Ю.В. *Тепловая защита* / Ю.В. Полежаев, Ф.Б. Юрьевич. – М., 1976. – 391 с.
180. «Particle image Velocimetry. Руководство пользователя программы «ActualFlow». Версия 1.17.3: Институт теплофизики ми С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, 2012.
181. «Интерферометрический метод измерения диаметров частиц (PIV). Руководство пользователя»: Институт теплофизики ми С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, 2013.
182. Glantschnig, W.J. Light scattering from water droplets in the geometrical optics approximation / W.J. Glantschnig, S. Chen // *Applied Optics.* – 1981. – Vol. 20. – P. 2499–2509.

183. Konig, G. A new light-scattering technique to measure the diameter of periodically generated moving droplets / G. Konig, K. Anders, A. Frohn // *J. of Aerosol Sci.* – 1986. – Vol. 17, №. 2. – P. 157–167.
184. Harada, Y. Method for the time-resolved measurement of the size and position of a moving particle using an image sensor / Y. Harada, T. Murakami // *Applied Optics.* – 1991. – Vol. 30, №. 33. – P. 4921–4929.
185. Kawaguchi, T. Size measurements of droplets and bubbles by advanced interferometric laser imaging technique / T. Kawaguchi, Y. Akasaka, M. Maeda // *Meas Sci and Technol.* – 2002. – Vol. 13. – P. 308–316.
186. Lecordier, B. Accuracy assessment of image interpolation schemes for PIV from real images of particle / B. Lecordier, M. Trinit'e // *In: 13th Int. Symp. on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics.* – 2006.
187. Stanislas, M. Main results of the First International PIV Challenge / M. Stanislas, K. Okamoto, C. Kahler // *Meas. Sci. Technol.* – 2003. – Vol. 14, R63-R89.
188. Stanislas, M. Main results of the Second International PIV Challenge / M. Stanislas, K. Okamoto, C.J. Kahler // *Exp Fluids.* – 2005. – Vol. 39. – P. 170–191.
189. Willert, C. The fully digital evaluation of photographic PIV recordings / C. Willert // *Appl. Sci. Res.* – 1996. – Vol. 56. – P. 79–102.
190. Damaschke, N. Optical limits of particle concentration for multi-dimensional particle sizing techniques in fluid mechanics / N. Damaschke, H. Nobach, C. Tropea // *Exp. in Fluids.* – 2002. – Vol. 32. – P. 143–152.
191. Dehaeck, S. Designing a maximum precision interferometric particle imaging set-up / S. Dehaeck, B. B. Van, J. P. A. J. // *Experiments in Fluids.* – 2007. – Vol. 42. – P. 767–781.
192. Definition of water droplets «strain cycles» in air times dependences on their sizes and movement velocities / R. Volkov, A. Zhdanova, M. Zabelin et al. // *EPJ Web of Conferences.* – 2014. – Vol. 76. – Article number 01037.
193. Volkov, R. Investigation of water droplets, kerosene and ethanol deformation in the air / R. Volkov, A. Zhdanova, P. Strizhak // *EPJ Web of Conferences.* – 2014. – Vol. 76. – Article number 01038.

194. Корольченко, Д.А. Применение тонкораспыленной воды для тушения пожаров в высотных зданиях / Д.А. Корольченко, В.Ю. Громовой, О.О. Ворогушин // Пожаровзрывобезопасность. – 2011. – № 11. – С. 54–57.
195. On the behavior of flame expansion in pool fire extinguishment with steam jet / X.K. Xiao, B.H. Cong, X.S. Wang et al. // J. of Fire Sci. – 2011. Vol. 29. № 4. P. 339–360.
196. Терехов, В.И. Тепломассоперенос и гидродинамика в газокapельных потоках / В.И. Терехов, М.А. Пахомов. – Новосибирск, 2009. – 284 с.
197. Tchen, C.M. Mean value and correlation problems connected with the motion of small particles suspended in a turbulent fluid / C.M. Tchen. – The Hague. Martinus Nijhoff, 1947. – 123 p.
198. Соу, С. Гидродинамика многофазных систем / С. Соу. – Москва: Наука, 1971. – 536 с.
199. Медников, Е.П. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей / Е.П. Медников. – Москва: Наука, 1981. – 176 с.
200. Варгафтик, Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н.Б. Варгафтик. – Москва: ООО «Старс», 2006. – 720 с.
201. Корольченко, А.Я. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения: справочник / А.Я. Корольченко. – Москва: Пожнаука, 2004. Ч. 1. – 713 с.
202. Корольченко, А.Я. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения: справочник / А.Я. Корольченко. – Москва: Пожнаука, 2004. Ч. 2. – 774 с.
203. Shreiber, A.A. Deformation and break-up of drops by aerodynamic forces / A.A. Shreiber, A.M. Podvisotski, V.V. Dubrovski // Atomization Sprays. – 1996. – Vol. 6, № 6. – P. 667–692.
204. Kuznetsov, G.V. Evaporation of single droplets and dispersed liquid flow in motion through high temperature combustion products / G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak // High Temperature. – 2014. – Vol. 52, № 4. – P. 568–575.

205. Volkov, R.S. Influence of the initial parameters of spray water on its motion through a counter flow of high temperature gases / R.S. Volkov, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak // *Technical Physics*. – 2014. – Vol. 59, № 7. – P. 959–967.
206. Гегузин, Я.Е. Капля / Я.Е. Гегузин. – Москва: Наука, 1973. – 161 с.
207. Нигматулин, Р.И. Динамика многофазных сред / Р.И. Нигматулин. Москва: Наука, 1987. – 464 с.
208. Волков, Р.С. Анализ влияния начальной температуры распыленной воды на интегральные характеристики её испарения при движении через зону «горячих» газов / Р.С. Волков, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // *Инженерно-физический журнал*. – 2014. – Т. 87, № 2. – С. 436–444.
209. Волков, Р.С. Экспериментальное исследование влияния начальной температуры распыленной воды на интенсивность ее испарения при движении через пламя / Р.С. Волков, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // *Пожаровзрывобезопасность*. – 2014. – № 3. – С. 12–21.
210. Zakharevich, A.V. Analyzing the characteristic times of physical-chemical processes running at ignition of a liquid condensed substance under local heating / A.V. Zakharevich, P.A. Strizhak // *J. of Eng. Thermophys.* – 2013. – Vol. 22, № 2. – P. 157–168.
211. Экспериментальное исследование закономерностей испарения тонкораспыленной воды при движении через высокотемпературные продукты сгорания / Р.С. Волков, О.В. Высокоморная, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // *Бутлеровские сообщения*. – 2013. – Т. 35, № 9. – С. 38–46.
212. Саламов, А.А. Современная система пожаротушения «водяной туман» высокого давления / А.А. Саламов // *Энергетик*. – 2012. – № 3. – С. 16–18.
213. Андрюшкин, А.Ю. Эффективность пожаротушения тонкораспыленной водой / А.Ю. Андрюшкин, М.Т. Пелех // *Проблемы управления рисками в техносфере*. – 2012. – Т. 21, № 1. – С. 64–69.

214. Изучение закономерностей тушения тонкораспыленной водой модельных очагов пожара / Н.П. Копылов, А.Л. Чибисов, А.Л. Душкин, Е.А. Кудрявцев // Пожарная безопасность. – 2008. – № 4. – С. 45–58.
215. Грилихес, С.Я., Обезжиривание, травление и полирование металлов / С.Я. Грилихес. – Ленинград: Машиностроение, 1983. – 101 с.
216. Суслов А.Г. Научные основы технологии машиностроения / А.Г. Суслов, А.М. Дальский. – Москва: Машиностроение, 2002. – 686 с.
217. Investigation of regularities of heat and mass transfer and phase transitions during water droplets motion through high-temperature gases / R.S. Volkov, O.V. Vysokomornaya, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak // Adv. in Mech. Eng. – 2014. – Vol. 2014. – Article ID 865856.
218. Волков, Р.С. Особенности испарения двух капель воды, движущихся последовательно через высокотемпературные продукты сгорания / Р.С. Волков, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // Теплофизика и аэромеханика. – 2014. – Т. 21, № 2. – С. 269–272.
219. Влияние начальной скорости движения капель распыленной жидкости на интенсивность их испарения в области высокотемпературных продуктов сгорания / Р.С. Волков, М.В. Забелин, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // Безопасность труда в промышленности. – 2014. – № 3. – С. 35–40.
220. Влияние размеров и скоростей ввода капель воды в зону горения на эффективность ее использования при тушении пожаров в помещениях / Р.С. Волков, М.В. Забелин, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // Тепловые процессы в технике. – 2014. – № 4. – С. 157–163.
221. Волков, Р.С. Экспериментальное исследование полноты испарения распыленной воды при ее движении через пламя / Р.С. Волков, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // Пожаровзрывобезопасность. – 2013. – № 10. – С. 15–24.
222. Experimental study of the change in the mass of water droplets in their motion through high-temperature combustion products / R.S. Volkov, O.V.

- Vysokomornaya, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak // J. of Eng. Phys. and Thermophys. – 2013. – Vol. 86, № 6. – P. 1413–1418.
223. 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.
224. Гурьев, Ю.В. Анализ методов компьютерного моделирования процесса распыления из оросителя тонкораспыленной воды / Ю.В. Гурьев, И.В. Ткаченко, Ю.С. Еремин // Пожаровзрывобезопасность. – 2012. – Т. 21, № 10. – С. 77–80.
225. 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
226. Волков, Р.С. Экспериментальное исследование интегральных характеристик испарения типичных распыленных тушащих жидкостей при их движении через пламя / Р.С. Волков, А.О. Жданова, П.А. Стрижак // Безопасность труда в промышленности. – 2013. – № 12. – С. 33–37.
227. Волков, Р.С. Влияние начальных параметров распыленной воды на характеристики ее движения через встречный поток высокотемпературных газов / Р.С. Волков, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // Журнал технической физики. – 2014. – Т. 84, № 7. – С. 15–23.
228. Волков, Р.С. Экспериментальное исследование интегральных характеристик испарения пресной и соленой воды при движении через пламя / Р.С. Волков, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2014. – № 2. – С. 18–23.
229. 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.
230. Теплотехнический справочник / Под ред. В.Н. Юренева, П.Д. Лебедева. – М.: Энергия, 1975. Т. 1. – 743 с.
231. Теплотехнический справочник / Под ред. В.Н. Юренева, П.Д. Лебедева. – М.: Энергия, 1975. Т. 2. – 896 с.
232. 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. – № 5. – С. 10–17.
233. Wighus, R. Water mist fire suppression technology – status and gaps in knowledge / Wighus R. // Proceedings of the international water mist conference. –Vienna, 2001. – P. 1–26.
234. Сегаль М.Д. Использование тонкораспыленной воды для повышения противопожарной защиты кабельных сооружений АЭС // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2011. № 4. С. 61–64.
235. Abbud-Madrid A., Watson D., McKinnon J.T. On the Effectiveness of Carbon Dioxide, Nitrogen and Water Mist for the Suppression and Extinction of Spacecraft Fires // Suppression and Detection Research and Applications Conference. Orlando. USA. 2007.
236. Fire Suppression Test Using a Handheld Water Mist Extinguisher Designed for the International Space Station / T. Carriere, J.R. Butz, S. Naha et al. // 42rd International Conference on Environmental Systems. – California. USA, 2012.
237. Rodriquez, B. Development of international space station fine water mist portable fire extinguisher / B. Rodriquez, G. Young // 43rd International Conference on Environmental Systems. – Vail, Colorado, 2013.
238. Ковалев, А.Н. Перспективные направления тушения низовых лесных и степных пожаров / А.Н. Ковалев, Л.А. Журавлева // Научная жизнь. – 2012. – № 4. – С. 153–157.

239. Волков, Р.С. Экспериментальное исследование особенностей движения капель распыленной тушащей жидкости на входе в зону пламени / Р.С. Волков, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // Пожаровзрывобезопасность. – 2013. – № 12. – С. 16–22.
240. Kuznetsov, G.V. The motion of a manifold of finely dispersed liquid droplets in the counter flow of high temperature gases / G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak // Tech. Phys. Lett. – 2014. – Vol. 40, № 6. – P. 499–502.
241. Volkov, R.S. Evaporation of two liquid droplets moving sequentially through high-temperature combustion products / R.S. Volkov, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak // Thermophys. and Aerom. – 2014. – Vol. 21, № 2. – P. 255–258.
242. Volkov, R.S. Analysis of the effect exerted by the initial temperature of atomized water on the integral characteristics of its evaporation during motion through the zone of «hot» gases / R.S. Volkov, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak // J. of Eng. Phys. and Thermophys. – 2014. – Vol. 87, № 2. – P. 450–458.
243. Бондарь, А.А. Математическое моделирование времени тушения пожаров тонкораспыленной водой по результатам эксперимента в замкнутых объемах / А.А. Бондарь, А.П. Решетов, А.Ю. Иванов // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. – 2012. – № 1. – С. 82–88.
244. Сравнительный анализ методов расчета теплоотдачи при кипении воды с недогревом / О.Е. Степанов, В.Е. Карнаухов, А.М. Худяков и др. // Теплоэнергетика. – 2014. – № 3. – С. 28–34.
245. Исследование интенсификации теплообмена при кипении воды на поверхности с микро – и нанорельефом / Ю.А. Кузма-Кичта, А.В. Лавриков, М.В. Шустов и др. // Теплоэнергетика. – 2014. – № 3. – С. 35–38.
246. Kuznetsov, G.V. Transient heat and mass transfer at the ignition of vapor and gas mixture by a moving hot particle / G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak // Int. J. of Heat and Mass Transf. – 2010. – Vol. 53. – P. 923–930.

247. Гонор, А.Л. Динамика капли / А.Л. Гонор, В.Я. Ривкинд // Итоги науки и техники. ВИНТИ. Механика жидкости и газа. – 1982. – Т. 17. – С. 86–159.
248. Волынский, М.С. Необыкновенная жизнь обыкновенной капли / М.С. Волынский. – Москва: Знание, 1986. – 146 с.
249. Experimental statistics of droplet trajectory and air flow during aerodynamic fragmentation of liquid drops / A.K. Flock, D.R. Guildenbecher, J. Chen et al. // Int. J. of Multiph. flow. – 2012. – Vol. 47. – P. 37–49.
250. Высокоморная, О.В. Тепломассоперенос при движении капель воды в высокотемпературной газовой среде / О.В. Высокоморная, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // Инженерно-физический журнал. – 2013. – Т. 86, № 1. – С. 59–65.
251. Вукалович, М.П. Техническая термодинамика / М.П. Вукалович, И.И. Новиков. – М., 1968. – 496 с.
252. Ranz, W.E. Evaporation from drops – I, II / W.E. Ranz, W.R. Marshall // Chem. Eng. Prog. – 1952. – Vol. 48. – P. 141–146, 173–180.
253. Fuchs, N.A. Evaporation and droplet growth in gaseous media / N.A. Fuchs. – London: Pergamon Press, 1959. – 80 p.
254. Терехов В. И., Терехов В. В., Шишкин Н. Е., Би К. Ч. Экспериментальное и численное исследования нестационарного испарения капель жидкости // Инженерно-физический журнал, 2010. Т. 83, № 5. С. 829–836.
255. Волков, Р.С. Программа расчета характеристик взаимодействия группы капель воды малых размеров с высокотемпературными продуктами сгорания конденсированных веществ / Р.С. Волков, О.В. Высокоморная, П.А. Стрижак // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012660317. – Бюлл. прогр. № 5 (Ч. 2), 2012.
256. Волков, Р.С. Программа расчета характеристик испарения «тандема» водяных капель при движении в области продуктов сгорания жидкого топлива / Р.С. Волков, О.В. Высокоморная, П.А. Стрижак // Свидетельство о

- государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012660313. – Бюлл. прогр. № 5 (Ч. 2), 2012.
257. Волков, Р.С. Программа расчета характеристик процессов тепломассопереноса при движении одиночной капли воды в высокотемпературной газовой среде / Р.С. Волков, О.В. Высокоморная, П.А. Стрижак // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012660314. – Бюлл. прогр. № 5 (Ч. 2), 2012.
258. Волков, Р.С. Программа расчета скоростей и траектории движения одиночной капли в струе воды при распылении в области высокотемпературных продуктов сгорания / Р.С. Волков, П.А. Стрижак // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013612423. – Бюлл. прогр. № 5 (Ч. 2), 2013.
259. Волков, Р.С. Программа расчета времени испарения флегматизатора горения при его движении через высокотемпературную газовую смесь / Р.С. Волков, П.А. Стрижак // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013612421. – Бюлл. прогр. № 5 (Ч. 2), 2013.
260. Волков, Р.С. Программа расчета времени испарения капель воды при движении через высокотемпературную газовую смесь / Р.С. Волков, П.А. Стрижак // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013612422. – Бюлл. прогр. № 5 (Ч. 2), 2013.
261. Волков, Р.С. Программа расчета времени полного испарения одиночной капли воды при движении через высокотемпературные продукты сгорания конденсированного вещества / Р.С. Волков, П.А. Стрижак // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013612657. – Бюлл. прогр. № 5 (Ч. 2), 2013.