

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

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Томск – 2014

Работа выполнена на кафедре автоматизации теплоэнергетических процессов ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

**Научные руководители:** доктор физико-математических наук,  
профессор  
Кузнецов Гений Владимирович

доктор физико-математических наук,  
доцент  
Стрижак Павел Александрович

**Официальные оппоненты:** Шевич Юрий Артемьевич, доктор технических наук, профессор, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, профессор кафедры холодильной и криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения

Миньков Леонид Леонидович, доктор физико-математических наук, профессор, Национальный исследовательский Томский государственный университет, профессор кафедры математической физики

**Ведущая организация:** ФГБОУ ВПО Самарский государственный технический университет.  
443100, Россия, г. Самара,  
ул. Молодогвардейская, 244

Защита состоится «22» декабря 2014 г. в 12.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.13 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» в аудитории 217 учебного корпуса № 8 по адресу: 634050, г. Томск, ул. Усова, 7.

С диссертацией можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте <http://portal.tpu.ru/council/2803/worklist>.

Автореферат разослан: «28» октября 2014 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
Д 212.269.13  
кандидат технических наук



А.С. Матвеев

## Общая характеристика работы

**Актуальность.** Одной из важнейших задач в процессе производства электроэнергии на тепловой электростанции (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. Исследования проблемы повышения эффективности работы промышленных градирен ТЭС проводятся особенно активно с середины прошлого века. В последние годы энергоэффективности и энергосбережению систем оборотного водоснабжения ТЭС уделяется повышенное внимание. При этом, как правило, разрабатываются и вводятся в эксплуатацию новые узлы, блоки, конструкции оросителей и распылительных форсунок, совершенствуются способы подачи воздуха и воды в рабочую область градирни. Все перечисленные действия преследуют цель интенсификации процессов теплообмена между циркуляционной водой и охлаждающим ее воздухом при минимальных энерго- и ресурсозатратах. Математическое моделирование сводится при этом к решению задач теплопереноса и фазовых превращений в системах «капля воды – газ» и «капельный водяной поток – газ». Но описание физических процессов, протекающих при движении нагретых до температур 330–360 К капель воды в потоках «холодного» воздуха проводится в рамках постановок, не учитывающих явно пространственное распределение температур в области охлаждения воды. При проектировании современных градирен используются методики расчета, опирающиеся, как правило, на модели, основной частью которых является объемный коэффициент теплообмена. Его определение представляет самостоятельную и сложную задачу. Переход же к моделям теплопереноса в виде систем дифференциальных уравнений частных производных пока невозможен в связи с отсутствием экспериментальных данных о закономерностях фазовых превращений и движения нагретых капель воды в условиях интенсивного охлаждения воздухом.

Аналогичные задачи возникают во многих технологиях, например, высокотемпературная очистка воды и других жидкостей от примесей и включений («выпаривание»). Или использование теплоносителей на базе уходящих продуктов сгорания, водяного пара и капель воды. Эффективными (но дорогостоящими) способами очистки воды для многих технологических циклов (в том числе и в энергетике) являются термические (введение мелкодисперсных капельных потоков в газовые среды с высокими температурами: от 500 К до 1500 К). Главная стадия в этих технологиях – выделение непосредственно воды в виде водяного пара. Анализ технологических условий на современных комплексах водоподготовки показывает, что достаточно много избыточной энергии расходуется на реализацию фазовых превращений. Интерес представляет поиск достаточных условий для эффективной термической очистки воды. Эти направления важны для водоподготовки на ТЭС, так как она является высокозатратным этапом технологического процесса. Кроме того, возможный возврат уходящих газов в технологический цикл при создании соответствующих теплоносителей позволит существенно повысить коэффициент полезного действия

теплоэнергетического оборудования. Эти же процессы в условиях интенсивных фазовых превращений являются определяющими в технологиях размораживания сыпучих сред газопарожидкостными потоками, очистки поверхностей различных конструкций газопарокапельными смесями, а также пароводяного пожаротушения. Но оптимизация параметров таких технологических процессов только путём экспериментальной отработки невозможна. Необходима теория, опирающаяся на достоверные экспериментальные данные по основным закономерностям испарения воды при движении её капель через высокотемпературные газы.

Для решения сформулированных выше проблем целесообразна разработка основных элементов теории фазовых превращений при движении капель жидкостей (в частности, воды и эмульсий на ее основе) в газовых и паровых средах теплоэнергетического оборудования при различных условиях теплообмена. В настоящее время известны результаты, в основном, теоретических исследований таких процессов. В частности, можно выделить циклы работ научных коллективов и отдельных ученых: Э.П. Волчкова, В.И. Терехова, М.А. Пахомова, Н.Е. Шишкина, О.А. Кабова, А.Ю. Вараксина, Д.А. Лабунцова, Т.М. Муратовой, А.П. Крюкова, О. Кнаке, И.Н. Странского, А.В. Гусарова, И. Смурова, В.Е. Накорякова, С.В. Алексеенко, Н.В. Буланова, Б.М. Гасанова, С.С. Сажина, В.А. Сметанюка, С.М. Фролова, А.М. Штеренберга, А.Ю. Крайнова, И.М. Васенина, В.В. Кузнецова, А.Н. Павленко, А.А. Собко, В.А. Архипова, В.В. Дубровского, В.В. Подвысоцкого, А.А. Шрайбера, М. Ренксизбулут, М.С. Юань, С.К. Аггарвол, А.И. Тонг, В.А. Сириньяно. Но исследования вышеперечисленных учёных выполнены с ограниченным использованием экспериментальных данных о физике процессов, происходящих при движении капель воды в градирнях ТЭС или камерах установок для термической очистки воды.

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 такие исследования стали реальностью. С использованием современных панорамных методов, таких как «Particle Image Velocimetry» (PIV) и «Interferometric Particle Imaging» (IPI) можно устанавливать мгновенные распределения размеров (до нескольких микрон) и скоростей (вплоть до сверхзвуковых) капель в газовых и паровых потоках, регистрировать изменения во времени их структуры, исследовать воздействие на парокапельные потоки основных значений факторов. Для создания замкнутой теории необходимы экспериментальные исследования и анализ влияния основных параметров, характеризующих начальное состояние капель распыленной жидкости, на интенсивность фазовых превращений последних при движении в газовых средах при различных условиях теплообмена, а также на режимы деформации капель.

**Цель диссертационной работы** – 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 основные 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 видеокомплексов, 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). Получены 3 акта об использовании результатов диссертационных исследований на промышленных предприятиях («Беловское энергоуправление», «НПО Внедрение Энергосберегающих Технологий», «СибПромРесурс»), эксплуатирующих и разрабатывающих системы термической очистки воды, очистки зашлакованных поверхностей энергетического оборудования и полидисперсного пароводяного пожаротушения.

**Степень достоверности результатов численных 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», а также находится в сфере критической технологии «Технологии создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования энергии».

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 РФФИ № 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 диссертационных исследований докладывались и обсуждались на XVIII международной научно-практической конференции «Современные техника и технологии» (г. Томск, 2012 г.), III Всероссийской научно-практической конференции «Теплофизические основы энергетических технологий» (г. Томск, 2012 г.), XXX Сибирском теплофизическом семинаре (г. Новосибирск, 2012 г.), Всероссийской конференции «Структура и динамика молекулярных систем» (п. Яльчик, 2013 г.), Международной конференции «VIII окуневские чтения» (г. Санкт-Петербург, 2013 г.), IV Всероссийской научно-практической конференции «Теплофизические основы энергетических технологий» (г. Томск, 2013 г.), XI Международной научной конференции «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики» (г. Алушта, Украина, 2013 г.), XX Международной научно-практической конференции «Современные техника и технологии» (г. Томск, 2014 г.), III Международной научно-технической конференции «Высокие технологии в современной науке и технике» (г. Томск, 2014 г.), III Межотраслевой научно-практической конференции «Инновационные пути модернизации базовых отраслей промышленности, энерго- и ресурсосбережение, охрана окружающей природной среды» (г. Харьков, Украина, 2014 г.), Международной конференции по проблемам окружающей среды (г. Ухань, Китай, 2014 г.), XI Международной конференции «Перспективы развития фундаментальных наук» (г. Томск, 2014 г.), XI Всемирном конгрессе по вычислительной механике (WCCM XI) (г. Барселона, Испания, 2014 г.).

**Публикации.** Основные результаты диссертации представлены в 42 печатных работах (18 статей в журналах из списка, рекомендованного ВАК). Три статьи опубликованы в зарубежных рецензируемых журналах. Подготовлена 1 заявка на патент РФ (№ 2014114346 от 10.04.2014) и получены 7 свидетельств о

государственной регистрации программ для ЭВМ. Список основных публикаций приведён в конце автореферата.

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения, списка литературы, включающего 261 наименование, содержит 49 рисунков, 3 таблицы, 185 страниц.

### **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.

На рис. 1 приведена схема разработанного экспериментального стенда. Выполнялась видеорегистрация процесса перемещения капель воды на расстояние 1 м от дозатора 11 до уловителя 13. Исследовалось движение капель в воздухе при температурах последнего 285 К, 300 К и через продукты сгорания (пламя) с температурой около 1100 К. В качестве регистрационной аппаратуры использовались (рис. 1): видеокамера 1 с форматом изображения 1024×1024 пикселей, частотой до  $10^5$  кадров в секунду; кросскорреляционная камера 2 с форматом изображения 2048×2048 пикселей, минимальной задержкой между двумя последовательными кадрами не более 5 мкс; двойной импульсный твердотельный лазер 3, 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.

Начальные размеры и скорости движения капель выбирались из условия сохранения их монолитности (число Вебера  $We < 10$ ). В частности, начальные диаметры одиночных капель варьировались в диапазоне от 1 мм до 6 мм. Для

капельных потоков диаметры капель изменялись от 0,1 мм до 1 мм. Начальные скорости капель  $u_0$  варьировались в диапазоне 0–3 м/с. При испускании дозатором 11 капля на отрезке длиной 1 м обеспечивалось возрастание их скоростей  $u$  до 5 м/с.

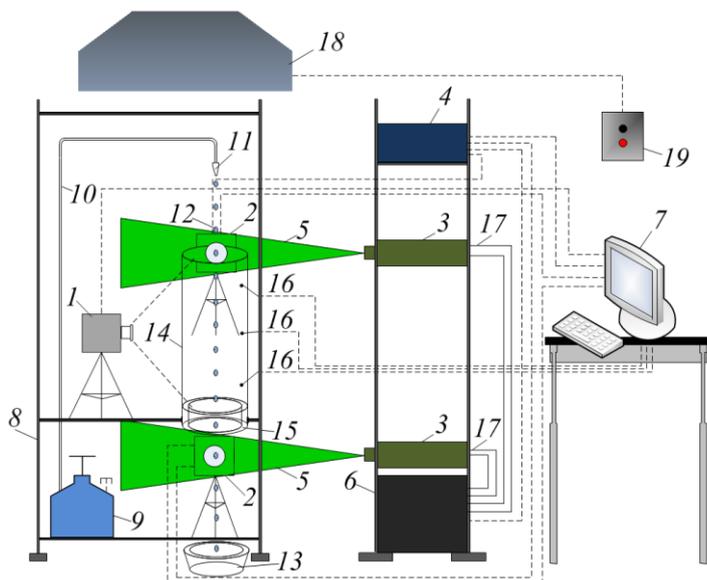


Рис. 1. Схема экспериментального стенда: 1 – видеокамера; 2 – кросскорреляционная камера; 3 – двойной твердотельный импульсный лазер; 4 – синхронизатор ПК, кросскорреляционной камеры и лазера; 5 – световой «нож»; 6 – генератор лазерного излучения; 7 – ПК; 8 – штатив; 9 – ёмкость с рабочей жидкостью; 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 – термодатчики; 17 – канал движения охлаждающей жидкости лазера; 18 – нагнетательная система; 19 – пульт включения/отключения нагнетательной системы.

алюмелевые (диапазон измеряемых температур  $-273$ – $1373$  К, погрешность измерения  $\pm 3,3$  К) термодатчики 16. Проводились измерения в трех точках по высоте канала 11 (0,15 м, 0,5 м, 0,85 м) на оси его симметрии. Температура газов в цилиндре 14 при стационарном горении керосина составляла  $1070 \pm 30$  К. Для обеспечения относительно низких температур (до 285 К) в цилиндре 14 его наружная поверхность охлаждалась с использованием льда. Умеренные (около 300 К) температуры воздуха в цилиндре 14 обеспечивались за счет использования системы вентиляции 18.

В проведенных экспериментах исследовалось движение капель воды со специальными включениями – «трассерами», представляющими примесь (0,5 % по массе, характерные размеры частиц – 10 нм) нанопорошка диоксида титана. Последние вводились в жидкость для повышения контрастности видеogramм с изображениями капель. В сериях предварительных экспериментов установлено,

Для формирования высокотемпературной газовой среды с контролируемыми параметрами применялся (рис. 1) вертикальный цилиндрический канал 14 (высота 1 м, диаметр 0,2 м) из огнеупорного жаростойкого светопрозрачного стекла. В основании канала устанавливался полый цилиндр 15 (высота 0,1 м, внутренний и внешний диаметры – 0,16 м и 0,2 м соответственно), в межстеночное пространство которого заливалось типичное жидкое топливо со стабильными свойствами – керосин, зажигание которого инициировалось 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 температуры продуктов сгорания в цилиндрическом канале 14 использовались хромель-

что ввод «трассирующих» частиц диоксида титана с указанной концентрацией несущественно влияет на характеристики процессов испарения и деформации капель (в пределах погрешности определения этих характеристик).

В соответствии с разработанной методикой проведения экспериментов капли воды с заданными начальными размерами  $d_0$  и скоростью  $u_0$  выходили из дозатора 11 и пролетали в воздухе до уловителя 13 расстояние 1 м. Процесс движения капель регистрировался видеокамерой 1 с частотой  $10^5$  кадров в секунду. Проводилось не менее 10 экспериментов для одного размера и скорости капель при прочих неизменных условиях. После обработки видеogramм на персональном компьютере (ПК) 7 выделялись участки с характерными изменениями конфигурации капель. Фиксировались интервалы времени  $t_d$ , в течение которых капли завершают полный «цикл деформации», т.е. последовательно дважды принимают близкую к идентичной форму. Расстояние между дозатором 11 и уловителем 13 разделялось на группу участков, характеризующих соответствующие «деформационные циклы» (вычислялись их длительности  $t_d$  и протяженности  $l_d$ ). Для каждого из выделенных участков с использованием кросскорреляционной камеры 2, лазера 3, синхронизатора 4 проводилось измерение размеров капель. Выполнялись 10 экспериментов с идентичными размерами и скоростями капель. Каждая видеogramма разделялась на расчетные области размерами  $32 \times 32$  пикселей. Вычислялся масштабный коэффициент  $S$  в соответствии с методами PIV и IPI. Для видеogramм выполненных экспериментов значения  $S$  изменялись в диапазоне 0,01–0,1 мм/пиксель. Вычислялись условные (так как форма капель в полете соответствует, в основном, эллипсоидам) максимальные диаметры капель в пикселях, а затем с применением коэффициента  $S$  выполнялся пересчет в миллиметры. Определялись максимальный поперечный (относительно направления движения) размер капли ( $d_x$ , мм), максимальный продольный размер капли ( $d_y$ , мм), абсолютный максимальный размер капли ( $d_{\max}$ , мм). Систематические погрешности измерения максимальных характерных размеров капель составили  $10^{-5}$  м. Для оценки изменения размеров капель в процессе деформации использовались относительные переменные:  $\Delta_x = (d_x - d_0) / d_0$ ,  $\Delta_y = (d_y - d_0) / d_0$ ,  $\Delta_{\max} = (d_{\max} - d_0) / d_0$ .

По результатам обработки видеogramм кросскорреляционной камеры 2 для каждого из «деформационных циклов» при вычисленных параметрах  $d_x$ ,  $d_y$  и  $d_{\max}$  уточнялись значения  $t_d$  и  $l_d$ , полученные при регистрации видеокамерой 1 всего пройденного каплей расстояния. Систематические погрешности определения времен  $t_d$  и расстояний  $l_d$  с использованием кросскорреляционной камеры 2 при  $S=0,01-0,1$  мм/пиксель не превышали  $10^{-5}$  с и  $10^{-4}$  м, соответственно.

Выполненные эксперименты показали, что случайные погрешности определения  $d_x$ ,  $d_y$  и  $d_{\max}$  составили около 6 %. Для времен  $t_d$  эта величина не превысила 4 %. Случайные погрешности определения  $l_d$  достигали 7 %.

Методика проведения экспериментов при исследовании движения капель воды через «холодные» и высокотемпературные газы предполагала измерение параметров  $d_x$ ,  $d_y$ ,  $d_{\max}$ ,  $l_d$  и  $t_d$  на входе и выходе из цилиндра 14 при заданных начальных размерах и скоростях капель. При сопоставлении характеристик «деформационных циклов» для капель, движущихся через «холодный» воздух

и высокотемпературные газы, обеспечивалась видеорегистрация идентичных по длине расстояний, пройденных каплями. При этом начальные скорости и размеры капель принимались максимально близкими.

Также с использованием системы электронных весов и системы кросс-корреляционной видеорегистрации вычислялись характерные размеры и масса капель воды на входе в рассматриваемые газовые среды и выходе из них. Полученные значения этих параметров использовались для вычисления интегральных характеристик фазовых превращений. Введены в рассмотрение параметры  $\Delta R$  ( $\Delta R = (R_d - R_d^*)/R_d$ ) и  $\Delta m$  ( $\Delta m = (m_d - m_d^*)/m_d$ ), где  $R_d^*$ ,  $m_d^*$  – условный радиус и масса капель на выходе из канала  $II$ ), характеризующие уменьшение массы и размеров капель. Систематические погрешности определения размеров капель не превысили 1,2 %, массы – 2,3 % и времени – 1,1 %.

В экспериментах с полидисперсными потоками капель воды проводилось разделение капель на группы по начальным размерам: 1 –  $0,01 \leq R_m < 0,08$  мм, 2 –  $0,08 \leq R_m < 0,16$  мм, 3 –  $0,16 \leq R_m < 0,23$  мм, 4 –  $0,23 \leq R_m < 0,3$  мм, 5 –  $0,3 \leq R_m \leq 0,5$  мм. Анализировались соответствующие значения параметра  $\Delta R$ , относительной объемной доли  $\alpha_m$ , скоростей движения  $u_m$  для каждой из групп капель при разных скоростях газов  $u_g$ .

**В третьей главе** приведены основные результаты выполненных экспериментальных исследований.

Установлены два возможных режима деформации капель воды в рассматриваемых условиях проведенных экспериментов (рис. 2). Первый – капля из начального состояния (близкого к сферическому) «сплющивается» и приобретает форму «блина», а затем вытягивается в направлении движения (далее эти формы циклически повторяются). Второй режим можно назвать «вращательным» (зарегистрировано вращение капли в форме эллипсоида относительно своего центра масс в процессе движения).

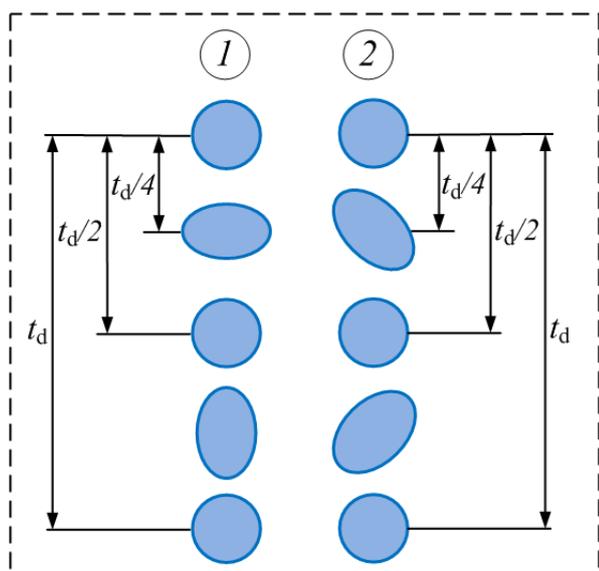


Рис. 2. Условные изображения капель жидкости при реализации первого (1) и второго (2) «режимов деформации»

Основной причиной реализации выявленных «режимов деформации» являются условия испускания капель жидкостей дозатором. При «идеальном» вертикальном испускании капля реализуется первый режим. При наличии даже небольшого отклонения (более  $2^\circ$ ) угла наклона дозатора относительно нормали к основанию уловителя реализуется второй режим. При интенсификации подачи капель дозатором до частоты более 1 капли в секунду во всех опытах капли приобретают формы в соответствии со вторым «режимом деформации». Далее приведены основные характеристики деформации капель воды при реализации первого режима для типичных условий эксплуатации теплоэнергетического оборудования.

В частности, установлены особенности процесса, связанные с довольно значительными отличиями времен как «полуциклов», так и «четверть–циклов» (рис. 2). На рис. 3 приведены типичные времена переходов от одной формы капель к другой при разных условиях теплообмена. Установлено, что времена переходов от формы сферы к «блину», от «блина» к сфере и от сферы к эллипсоиду отличаются. При  $t_d \ll 1$  с эти отличия можно считать существенными. Времена переходов от сферических капель к эллипсоидам и «блинам» на 15–20 % больше, чем времена, характеризующие обратные переходы.

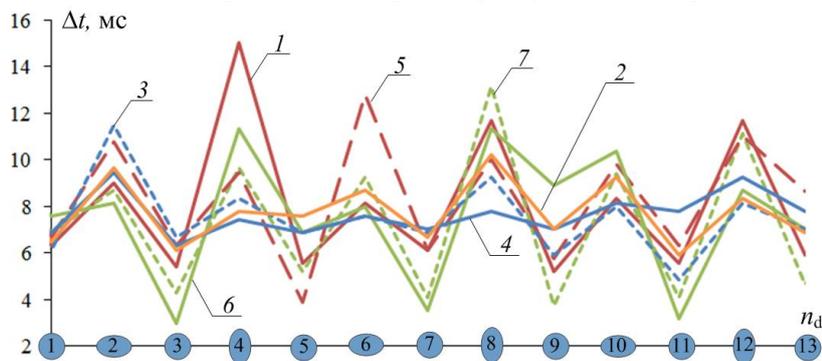


Рис. 3. Времена переходов от одной формы капель воды ( $d_0 = 5.3$  мм) к другой при их различных температурах и условиях теплообмена с газовой средой: при умеренных температурах газов 1 –  $T_w=363$  К, 2 –  $T_w=333$  К, 3 –  $T_w=313$  К, 4 –  $T_w=298$  К, 5 – «холодный» воздух ( $T_g=285$  К) и  $T_w=298$  К, 6 – высокотемпературные газы ( $T_g=1100$  К) и  $T_w=298$  К, 7 – при  $T_g=1100$  К и  $T_w=363$  К

Установленные закономерности обусловлены соответствующим влиянием массовых и инерционных сил. Силы сопротивления, действующие на капли сферической формы, меньше, чем при «эллипсоподобных» конфигурациях капель. Как следствие, «торможение» газовой средой капель в форме эллипсоидов (и особенно «блинов») происходит интенсивнее, чем сфер. Это

приводит к ослаблению эффекта ускорения движения капель под действием гравитационных сил и росту времен перехода «сфера – эллипсоид». При обратном переходе сила сопротивления снижается и капля ускоряется – время перехода уменьшается. С увеличением числа пройденных «циклов деформации» установленная закономерность прослеживается наиболее отчетливо.

Можно отметить достаточно существенное влияние температуры газов на границе «жидкость – газ» на условия деформации капель. В частности, видно (рис. 3), что увеличение как температуры газов, так и капель воды приводит к замедлению переходов от формы к форме (вследствие интенсификации фазовых превращений). Как следствие достаточно значительно возрастают протяженности «циклов деформации» ( $l_d$ ). При умеренных температурах газов в качестве минимальных и максимальных значений  $l_d$  можно принять 22 мм и 204 мм. При интенсификации теплообмена за счет повышения  $T_g$  или  $T_w$  в обозначенных диапазонах эти значения могут увеличиться на 20–25 %.

На рис. 4 и 5 приведены установленные в экспериментах зависимости характерных времен «циклов деформации» капель воды от их начальных размеров и скоростей движения при  $T_g=300$  К и  $T_w=300$  К.

Увеличение характерного размера капель  $d_0$  приводит к повышению времен  $t_d$  в несколько раз (рис. 4). Увеличение  $t_d$  можно объяснить возрастанием массы капель при увеличении  $d_0$  и, как следствие, замедлением процессов трансформации их поверхности. При повышении же значений  $u$  времена  $t_d$

снижаются (рис. 5). Это обусловлено ростом массовых и инерционных сил, действующих на каплю.

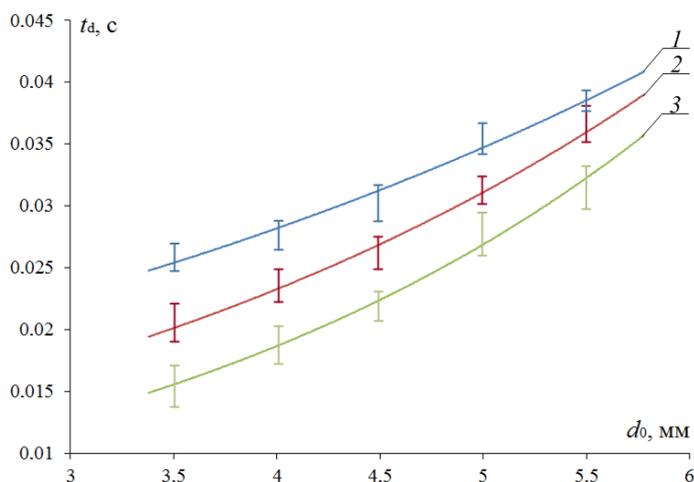


Рис. 4. Зависимости времен  $t_d$  от размеров капель при различных значениях  $u$  ( $T_w=300$  К,  $T_g=300$  К): 1 - для  $u \approx 1,3$  м/с; 2 - для  $u \approx 2,9$  м/с; 3 - для  $u \approx 4,7$  м/с

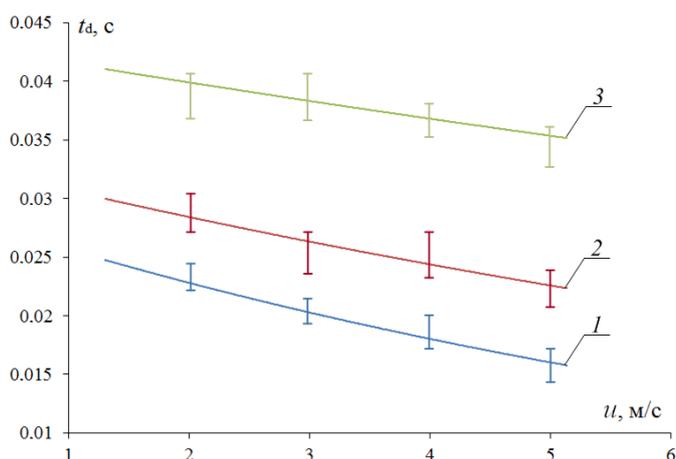


Рис. 5. Зависимости времен  $t_d$  от скоростей капле при различных значениях  $d_0$  ( $T_w=300$  К,  $T_g=300$  К): 1 - для  $d_0 \approx 3,4$  мм; 2 - для  $d_0 \approx 4,6$  мм; 3 - для  $d_0 \approx 5,8$  мм

При существенном снижении времен  $t_d$  с ростом скоростей движения капле под действием гравитационных силкратно возрастают значения протяженностей «циклов деформации».

При анализе амплитуд  $\Delta_x$ ,  $\Delta_y$  и  $\Delta_{max}$  установлена пространственная (трехмерная) деформация в выполненных экспериментах. Этот результат позволяет объяснить довольно большое число индивидуальных форм капле в зарегистрированных циклах. При сравнении этих характеристик деформации для воды, керосина и этилового спирта установлено определяющее влияние сил поверхностного натяжения. Чем больше сила поверхностного натяжения, тем меньше амплитуды деформации капле жидкости. Выполненные эксперименты также показали, что с ростом скоростей движения капле (как следствие, числа пройденных «циклов деформации») значения  $\Delta_x$ ,  $\Delta_y$  и  $\Delta_{max}$  возрастают. При увеличении же начальных размеров значения  $\Delta_x$ ,  $\Delta_y$  и  $\Delta_{max}$  несколько снижаются вследствие возрастания массы ка-

пель и замедления процесса их деформации в целом.

Видеограммы проведенных экспериментов иллюстрируют, что время жизни сферической формы капле 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 капле жидкостей в трактах различного теплоэнергетического оборудования практически любой из установленных в проведенных экспериментах конфигураций.

Установлено определяющее влияние начальных температур капле на характеристики фазовых превращений (рис. 6).

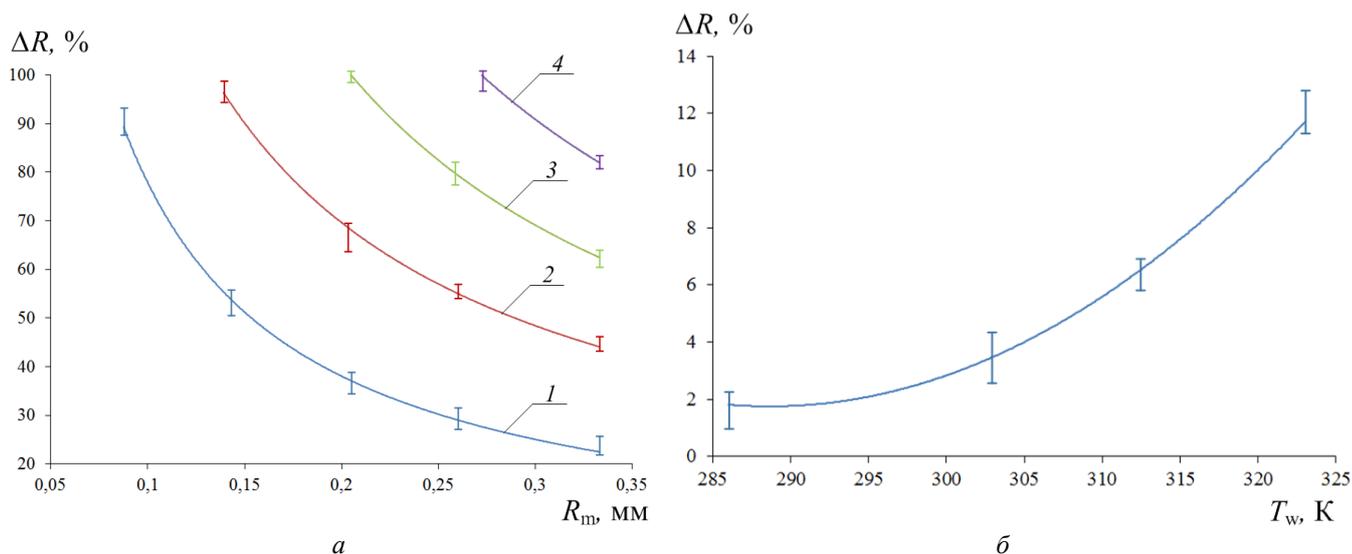


Рис. 6. Зависимости ( $T_g=1100$  К) параметра  $\Delta R$  от начальной температуры воды  $T_w$  для полидисперсного потока (а) и одиночных капель (б): 1 –  $T_w=293$  К, 2 –  $T_w=303$  К, 3 –  $T_w=313$  К, 4 –  $T_w=323$  К

Следует отметить более существенное влияние  $T_w$  на интенсивность испарения малых капель ( $R_m < 0,15$  мм). Это особенно хорошо видно по наклону кривой 1 (рис. 6). В процессе испарения жидкости определяющую роль 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, в том числе, и на высокие температуры внешней среды – до 1170 К). Поэтому при  $R_m < 0,15$  мм доля испарившейся жидкости существенно (в несколько раз) меняется при росте  $T_w$  всего на 10 К. Эти результаты особенно важны для технологий, в которых такие изменения температур нередко считаются малозначимыми.

Нелинейность функций  $\Delta R = f(T_w, R_m)$  можно объяснить несколькими причинами. В первую очередь, нелинейной зависимостью скорости парообразования от температуры поверхности жидкости. Во-вторых, установлены условия, при которых совместное влияние капель парожидкостного потока на интегральные характеристики его испарения может быть определяющим. Выявлено, 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  $\Delta R$ . Для относительно малых ( $R < 0,2$  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).

Определено влияние скоростей движения каплей (рассматривались умеренные диапазоны, характерные теплоэнергетическому оборудованию) на характеристики фазовых превращений (рис. 7).

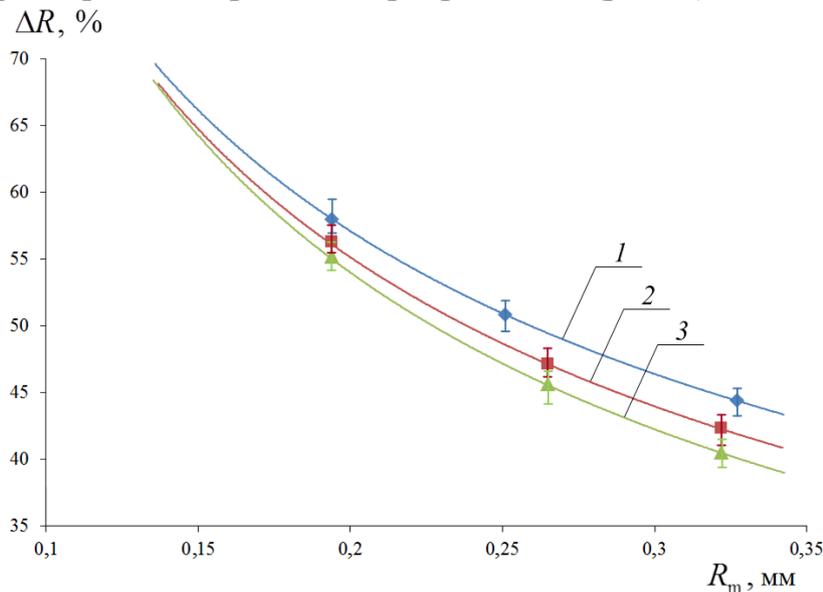


Рис. 7. Зависимости параметра  $\Delta R$  от начальных размеров каплей распыленной жидкости  $R_m$  для различных начальных скоростей  $u_m$ : 1 –  $u_m=0,8$  м/с, 2 –  $u_m=1,1$  м/с, 3 –  $u_m=1,4$  м/с

Установлено, что при снижении начальной скорости перемещения каплей возрастают характерные времена их существования, прогрева приповерхностного слоя жидкости, и, соответственно, увеличивается масса испарившейся в процессе движения через газовую среду жидкости.

Для одиночных каплей выявлено более значительное влияние начальных скоростей движения по сравнению с каплями потока. Это обусловлено тем, что более существенно меняются условия теплообмена одиночной капли с внешней газовой средой при ее ускорении.

Для одиночных каплей выявлено более значительное влияние начальных скоростей движения по сравнению с каплями потока. Это обусловлено тем, что более существенно меняются условия теплообмена одиночной капли с внешней газовой средой при ее ускорении.

Установлены существенные отличия характеристик фазовых превращений однородных каплей воды и с примесями солей (рис. 8), а также твердыми включениями (рис. 9), типичными для технологий очистки воды.

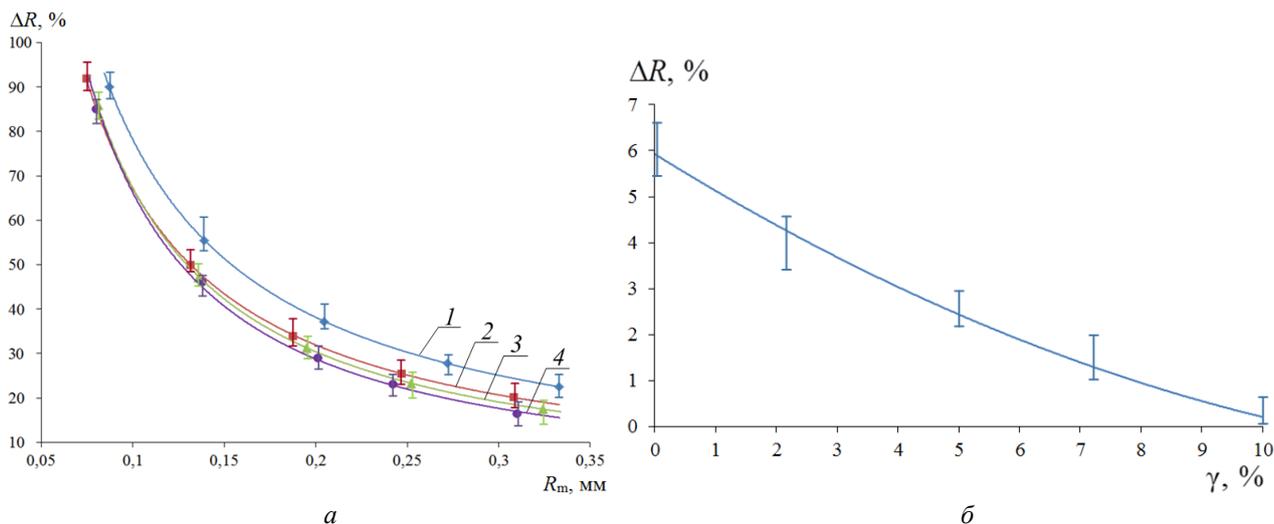


Рис. 8. Зависимости ( $T_w=300$  К,  $T_g=1100$  К) параметра  $\Delta R$  от примесей солей в воде  $\gamma$  для полидисперсного потока (а) и одиночных каплей (б): 1 – при  $\gamma=0$  %, 2 – при  $\gamma=2,5$  %, 3 –  $\gamma=5$  %, 4 –  $\gamma=10$  %

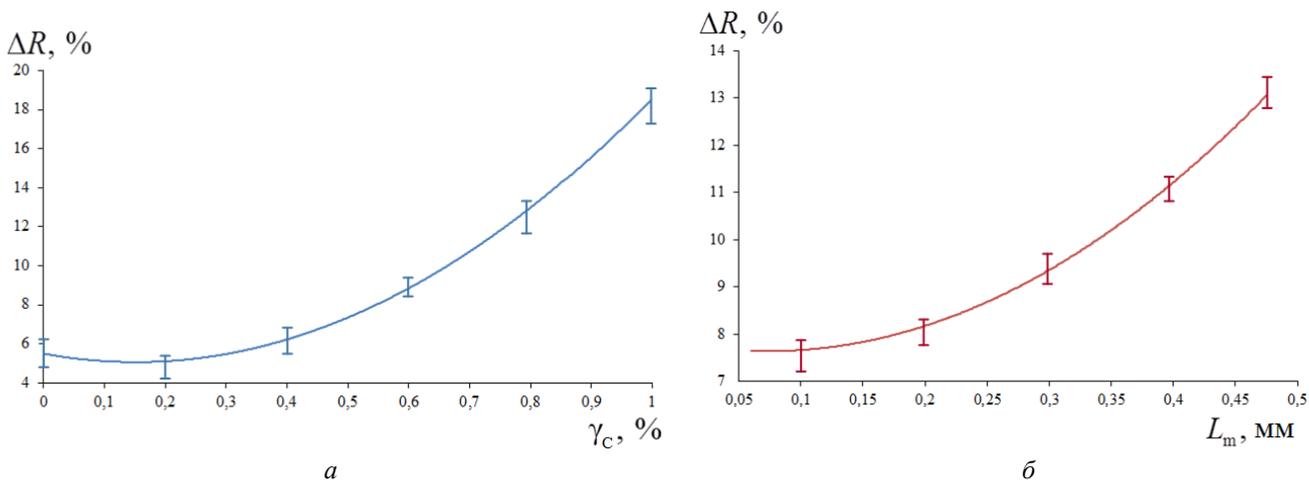


Рис. 9. Зависимости ( $T_w=300$  К,  $T_g=1100$  К) параметра  $\Delta R$  от относительной массовой концентрации углеродистых частиц  $\gamma_c$  для капель с  $R_d = 3$  мм и  $L_m = 50-70$  мкм (а), от размеров включений  $L_m$  при  $\gamma_c=0,5$  %

Выявленные закономерности процессов испарения одиночных капель и потока с типичным содержанием солей можно объяснить значительным 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 «H<sub>2</sub>O+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 капле. 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 «H<sub>2</sub>O+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. С ростом концентрации  $\gamma$  энергия анализируемых межмолекулярных связей возрастает. В целом анализ установленных закономерностей позволяет сделать вывод о том, что процессы испарения капель без включений и с твердыми не растворимыми включениями (например, углеродистыми частицами) существенно проще с точки зрения объяснения влияния возможных факторов. Для растворов определяющее влияние помимо теплофизических свойств могут иметь и молекулярные связи (особенно в условиях нестационарного нагрева).

Установлено, что с ростом  $\gamma_c$  от 0 до 1 % существенно (почти в 3 раза) увеличивается параметр  $\Delta R$  (как следствие, значительно возрастает доля испа-

рившейся жидкости и интенсивность парообразования) при движении капль воды через высокотемпературную газовую среду. Этот эффект можно объяснить тем, что при даже относительно небольшом увеличении  $\gamma_c$  в несколько раз возрастает теплопроводность неоднородной системы «капля воды – твердые включения». Как следствие, значительно снижается время, необходимое для прогрева капли воды и последующего испарения.

При движении капль воды с твердыми включениями через высокотемпературные газы 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 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 капль – интенсифицируется конвективный теплоперенос. При увеличении размеров твердых включений в каплях влияние выделенных эффектов на интенсивность прогрева жидкости существенно возрастает. Также установлено, что наличие в капле одного крупного твердого включения ускоряет процессы ее прогрева, деформации и разрушения более существенно по сравнению с несколькими включениями меньших размеров. Эти результаты позволяют объяснить нестационарность процессов фазовых превращений капльных потоков в системах очистки воды на ТЭС.

Выявлены макроскопические закономерности движения капль воды во встречном потоке высокотемпературных газов при интенсивных фазовых превращениях (соответствуют условиям высокотемпературной очистки технической воды в энергетических блоках и агрегатах). В частности, установлены предельные скорости и размеры капль потока, при которых последние уносятся газами (рис. 10).

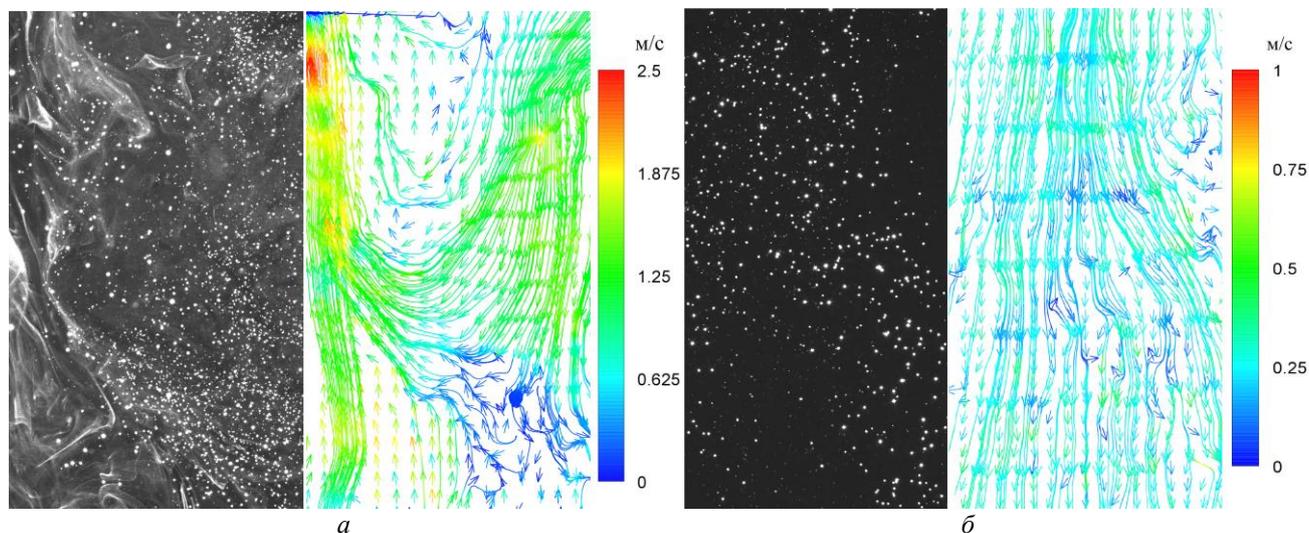


Рис. 10. Видеogramмы ( $T_w=300$  К,  $T_g=1100$  К) капль жидкости и скорости «трассирующих» частиц на входе (а) и выходе (б) из канала с высокотемпературными газами при  $u_g=1$  м/с,  $u_m=1,5$  м/с

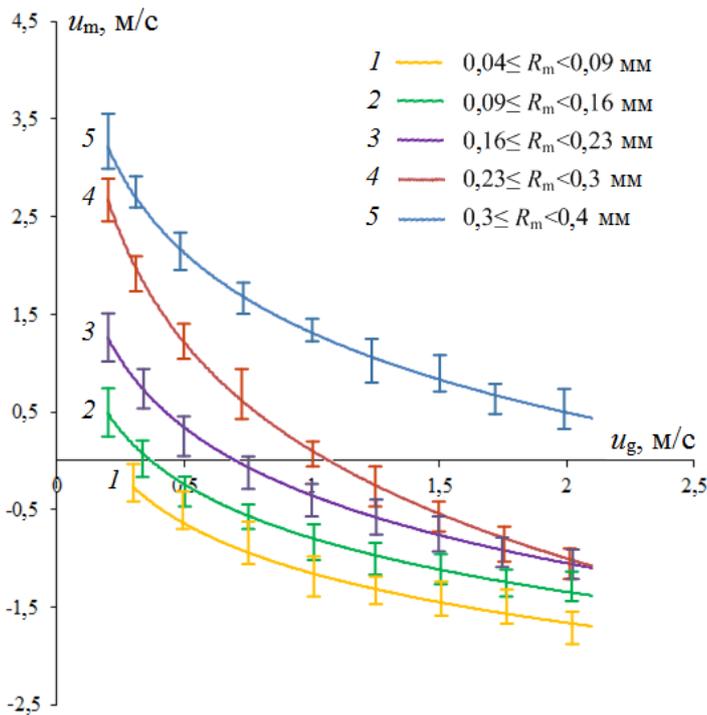


Рис. 11. Зависимости ( $T_w=300$  К,  $T_g=1100$  К) скоростей капель жидкости  $u_m$  от значений  $u_g$

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. 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. 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» 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; капли, попадая в завихрения газов, сливаются между собой: одна «догоняет» другую при интенсивном испарении первой и достаточно медленном – последующих. Эти результаты позволяют обеспечить прогнозирование компонентного состава газопарокапельных смесей в различных условиях смешения.

В результате проведенных экспериментальных исследований установлены численные значения скоростей фазовых превращений, которые иллюстрируют реализацию «кинетического» режима испарения водяных капель в области высокотемпературных газов, и дополнены модели испарения воды и ее растворов.

Также разработаны рекомендации по использованию полученных результатов и дальнейшему развитию сформулированного в диссертации подхода. Рассмотрены основные приложения: разработка новых, а также модернизация

На рис. 11 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  $u_g$ ).

Определены предельные скорости потока газов (при которых водяные капли уносятся газами) являются:  $u_g^{lim} = 0,25$  м/с при  $R_m = 40–90$  мкм;  $u_g^{lim} = 0,35$  м/с при  $R_m = 90–160$  мкм;  $u_g^{lim} = 0,7$  м/с при  $R_m = 160–230$  мкм;  $u_g^{lim} = 1,05$  м/с при  $R_m = 230–300$  мкм.

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, пароводяного пожаротушения.

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

### **Основные результаты**

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.

### **Основные публикации по теме диссертации**

1. **Волков Р.С.**, Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Особенности испарения двух капель воды, движущихся последовательно через высокотемпературные продукты сгорания // Теплофизика и аэромеханика. 2014. Т. 21, № 2. С. 269–272.
2. **Волков Р.С.**, Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Влияние начальных параметров распыленной воды на характеристики ее движения через встречный поток высокотемпературных газов // Журнал технической физики. 2014. Т. 84, № 7. С. 15–23.
3. **Волков Р.С.**, Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. О некоторых физических закономерностях испарения распыленной воды при движении через высокотемпературные продукты сгорания // Известия Томского политехнического университета. 2013. Т. 323. № 2. С. 201–207.
4. **Волков Р.С.**, Высокоморная О.В., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Экспериментальное исследование изменения массы капель воды при их движении через высокотемпературные продукты сгорания // Инженерно-физический журнал. 2013. Т. 86, № 6. С. 1327–1332.
5. **Волков Р.С.**, Забелин М.В., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Влияние размеров и скоростей ввода капель воды в зону горения на эффективность ее использования при тушении пожаров в помещениях // Тепловые процессы в технике. 2014. Т. 6, № 4. С. 157–163.
6. **Волков Р.С.**, Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Анализ влияния начальной температуры распыленной воды на интегральные характеристики ее испарения при движении через зону «горячих» газов // Инженерно-физический журнал. 2014. Т. 87, № 2. С. 436–444.
7. **Волков Р.С.**, Высокоморная О.В., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Экспериментальное исследование закономерностей испарения тонкораспыленной воды при движении через высокотемпературные продукты сгорания // Бутлеровские сообщения. 2013. Т. 35, № 9. С. 38–46.
8. **Волков Р.С.**, Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Исследование закономерностей испарения распыленной воды при движении через высокотемпературные газы // Современная наука: идеи, исследования, результаты, технологии. 2013. Т. 12, № 1. С. 440–445.
9. **Волков Р.С.**, Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Экспериментальное исследование полноты испарения распыленной воды при ее движении через пламя // Пожаровзрывобезопасность. 2013. № 10. С. 15–24.
10. **Волков Р.С.**, Жданова А.О., Стрижак П.А. Численные и экспериментальные исследования процессов тепломассопереноса в условиях фазовых превра-

щений при движении капель воды в высокотемпературной газовой среде // Деп. в ВИНТИ РАН 09.12.2013, № 355–В2013.

11. **Волков Р.С.**, Жданова А.О., Стрижак П.А. Экспериментальное исследование интегральных характеристик испарения типичных распыленных тушащих жидкостей при их движении через пламя // Безопасность труда в промышленности. 2013. № 12. С. 33–37.

12. **Волков Р.С.**, Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Экспериментальное исследование особенностей движения капель распыленной тушащей жидкости на входе в зону пламени // Пожаровзрывобезопасность. 2013. Т. 22, № 12. С. 16–23.

13. **Волков Р.С.**, Стрижак П.А. Экспериментальное исследование полноты испарения одиночных капель воды при движении через высокотемпературные продукты сгорания // Сборник научных трудов IV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Теплофизические основы энергетических технологий». Томск: Изд-во ТПУ, 2013. С. 66–70.

14. **Волков Р.С.**, Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Экспериментальное исследование влияния начальной температуры распыленной воды на интенсивность ее испарения при движении через пламя // Пожаровзрывобезопасность. 2014. Т. 23, № 3. С. 12–21.

15. **Волков Р.С.**, Забелин М.В., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Влияние твердых включений в каплях жидкости на интенсивность парообразования в зоне пламени // Пожаровзрывобезопасность. 2014. Т. 23, № 5. С. 10–17.

16. **Волков Р.С.**, Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Экспериментальное исследование влияния начальной температуры и содержания в ней примесей солей на интенсивность испарения в зоне пламени при подаче в виде крупных монолитных капель и тонкораспыленной струи // Пожарная безопасность. 2014. № 2. С. 93–98.

17. **Волков Р.С.**, Забелин М.В., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Влияние начальной скорости движения капель распыленной жидкости на интенсивность их испарения в области высокотемпературных продуктов сгорания // Безопасность труда в промышленности. 2014. № 3. С. 35–40.

18. **Volkov R.S.**, Vysokomornaya O.V., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Investigation of Regularities of Heat and Mass Transfer and Phase Transitions during Water Droplets Motion through High-Temperature Gases // Advances in Mechanical Engineering. 2014. V. 2014, Article ID 865856.

19. **Volkov R.S.**, Zhdanova A.O., Zabelin M.V., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Definition of water droplets «strain cycles» in air times dependences on their sizes and movement velocities // European Physical Journal Web of Conferences. 2014. V. 76. 01037. P. 1–7.

20. **Volkov R.S.**, Zhdanova A.O., Strizhak P.A. Investigation of water droplets, kerosene and ethanol deformation in the air // European Physical Journal Web of Conferences. 2014. V. 76. 01038. P. 1–6.