

На правах рукописи



Тукмакова Надежда Алексеевна

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПАРОКАПЕЛЬНЫХ СРЕД
В ПРОЦЕССЕ РЕГАЗИФИКАЦИИ**

01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань 2019 г.

Работа выполнена на кафедре «Теплотехника и энергетическое машиностроение» (ТиЭМ) ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ» (КНИТУ-КАИ).

Научный руководитель: Тонконог Владимир Григорьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры ТиЭМ ФГБОУ ВО «КНИТУ-КАИ».

Официальные оппоненты: Николаев Андрей Николаевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Оборудования пищевых производств» ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет (КНИТУ)».

Пахомов Максим Александрович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории термогазодинамики ФГБУН «Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе» Сибирского отделения Российской академии наук.

Ведущая организация: Институт механики им. Р.Р. Мавлютова – обособленное структурное подразделение ФГБУН Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук.

Защита состоится 25 декабря 2019 года в 12:00 на заседании учёного совета Д 212.079.02 при ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ» по адресу: 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 10 (зал заседаний Учёного совета).

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах), заверенные гербовой печатью учреждения, просим отправлять по адресу: 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 10, ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ», учёному секретарю диссертационного совета Д 212.079.02.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ» и на сайте <http://old.kai.ru/science/disser>.

Автореферат разослан «___» _____ 2019 г.

Учёный секретарь диссертационного совета
Д 212.079.02, д.т.н.

В.А. Алтунин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Парогазокапельные потоки формируются в природных атмосферных, вулканических, океанических процессах, сопровождают различные природные явления. На основе динамики и теплофизики парогазокапельных систем разрабатываются технологические процессы в энерго- и машиностроении. По этой причине в науке и промышленности поддерживается высокий интерес к проблемам моделирования гидро- и термодинамики парогазокапельных структур. Основополагающий вклад в развитие теории и методов решения задач механики многофазных сред внесли Л.И. Седов, Х.А. Рахматулин, Р.И. Нигматулин, Н.А. Фукс, С.С. Кутателадзе, М.Е. Дейч, Г.А. Филиппов, Г.А. Салтанов, М.А. Стырикович, В.Е. Накоряков, Б.Г. Покусаев, И.Р. Шрейбер, В.А. Акуличев, Б.Е. Гельфанд, С.М. Когарко, А.Н. Крайко, Л.Г. Стернин, Д.А. Лабунцов, В.В. Ягов, В.М. Фомин, Л.И. Зайчик, Ю.А. Зейгарник, С. Соу, Г. Уоллис и др. Вычислительным методам в механике двухфазных сред посвящены работы Н.Н. Яненко, Г.А. Салтанова, Л.Г. Стернина, А.Г. Кутушева, А.Н. Крайко, В.Ш. Шагапова, А.А. Шмидта, А.А. Губайдуллина и многих других исследователей.

Актуальность темы исследования связана с возможностью получения новых закономерностей в механике парокапельных систем полидисперсной структуры, которую можно описать конечным числом дисперсных капельных фракций и течение которой сопровождается процессами дробления, коагуляции, испарения капель и конденсации пара. Эти результаты могут быть применены при разработке систем осушки воздуха для корабельных двигателей в морском судостроении, при разработке гидравлических трактов систем очистки и опреснения воды. Результаты работы могут быть положены в основу проектирования регазификаторов сжиженного природного газа (СПГ) с улучшенными эксплуатационными и расширенными функциональными возможностями.

Степень разработанности темы исследования. Описание динамики полидисперсной многоскоростной многотемпературной парокапельной смеси с фазовыми переходами, дроблением и коагуляцией капель представляет собой сложную задачу, имеющую ряд практических приложений. Одним из таких приложений является разработка регазификатора СПГ и создание технологии регазификации. В данной работе предлагается модифицировать классические схемы теплообменников-регазификаторов путём предварительного диспергирования газожидкостного потока, что позволит избежать сложных процессов и режимов течения, связанных с превращением капельного потока жидкости в дисперсный парожидкостный поток. Для выявления особенностей течения парокапельных сред в разрабатываемых устройствах создана численная модель и программный комплекс для описания динамики полидисперсной парокапельной смеси с учётом фазовых переходов, механизмов дробления, коагуляции и испарения капель.

Цель исследования: численно описать и смоделировать гидро- и термодинамические процессы, сопровождающие течение полидисперсных парокапельных смесей и газовзвесей в элементах энергетического оборудования.

Задачи исследования:

- построить математическую модель, разработать численный метод и реализующий его программный комплекс для описания динамики парокапельных смесей;
- верифицировать программный комплекс, описывающий динамику полидисперсных парокапельных смесей, а именно:
 - выполнить тестирование механизма дробления капель фракций со скоростной и температурной неравновесностью с переносом осколков в мелкодисперсную фракцию;
 - провести тестирование механизмов нагрева и испарения капель крупных фракций со скоростной и температурной неравновесностью;
 - тестировать механизм испарения мелкодисперсной фракции (без скоростного и температурного скольжения относительно несущей среды) и конденсации пара с образованием мелкодисперсной фракции;
 - выполнить моделирование пространственной сепарации фракций полидисперсной газовзвеси при обтекании обратного уступа;
 - провести моделирование колебаний коагулирующей полидисперсной газовзвеси в акустическом резонаторе;
 - выполнить моделирование динамики парокапельных смесей с учётом механизмов дробления, коагуляции, испарения капель и конденсации пара при течении в каналах при различных термо- и гидродинамических условиях;
 - разработать способ регазификации жидкости.

Научная новизна диссертационной работы состоит в создании комплексной математической модели динамики парокапельной смеси в двумерной постановке, учитывающей целый ряд физических процессов, таких как дробление, коагуляция, испарение капель и конденсацию паровой фазы; а также в решении задач в новой постановке и в описании новых эффектов на основе математической модели динамики полидисперсной многоскоростной многотемпературной парокапельной смеси с учётом процессов дробления, коагуляции, испарения капель и конденсации пара. Разработан способ регазификации жидкости и установка для регазификации жидкости, на что получено 2 патента на изобретение РФ.

Теоретическая и практическая значимость работы. Результаты позволят систематизировать и объединить существующие подходы к моделированию парогазокапельных систем с фазовыми переходами, получить решения новых задач и на основе анализа полученных решений создать методы управления дисперсностью и фазовым составом парогазокапельных потоков за счёт выбора геометрии канала, режима течения и способа внешнего волнового воздействия

на поток. Результаты работы внедрены в ООО НПП «Авиагаз-Союз+», могут быть использованы в учебном процессе в КНИТУ-КАИ.

Результаты и выводы исследований динамики парокапельных смесей в каналах теплообменников необходимы при проектировании устройств регазификации криогенных топлив. Практическая значимость работы заключена в выполнении расчётов на основе математической модели, позволяющей описать сложные процессы, сопровождающие работу автоматизированных газораспределительных станций (АГРС) с модифицированными тепловоспринимающими элементами в виде трубы Фильда с закрученным течением метановой парокапельной смеси, нагревом, дроблением, коагуляцией, испарением капель и конденсацией пара. Выработка рекомендаций для разработчиков имеет практическое значение, т.к. такие устройства являются основным элементом АГРС, необходимых для создания инфраструктуры потребления СПГ. Полученные методами математического моделирования результаты можно использовать при проектировании широкого круга устройств, рабочим телом в которых является парокапельная смесь.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ по ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы», соглашение № 14.577.21.0151 от 28.11.2014. Наименование проекта «Разработка ресурсосберегающих технологий использования криогенных топлив на основе природного газа и водорода»; при поддержке АН Республики Татарстан: проект «Разработка вычислительных моделей динамики сильно неидеальной пылевой плазмы и описание коллективных явлений», 31.12.2016 г.; при поддержке РФФИ: проект № 17-48-160359 «Разработка малоинерционного регазификатора сжиженного природного газа на основе численного моделирования термо- и гидродинамики парокапельных систем», 01.12.2017 г.; при поддержке Правительства РФ: грант № 14.Z50.31.0003 «Создание многопрофильной, комплексной лаборатории моделирования физико-технических процессов при решении сопряжённых задач аэромеханики, теплофизики, акустики и вибростойкости, вентиляции и микроклимата, экологии и мониторинга эксплуатации грузовых автомобилей и их агрегатов», 31.12.2017 г.; при поддержке РФФИ: грант 18-48-160017 «Разработка конструкции тепловоспринимающих элементов регазификатора-подогревателя сжиженного природного газа на основе анализа структуры полидисперсных парокапельных потоков, формирующейся с учетом механизмов конденсации, испарения, дробления и коагуляции», 2018-2019 гг.

Методы исследования. Исследование динамики парокапельных смесей выполнялось методами численного моделирования. Для описания движения парокапельной смеси применялась многоскоростная многотемпературная модель со скоростным и температурным скольжением фаз, в которой несущая среда описывается полной системой уравнений динамики вязкого сжимаемого теплопроводного газа, а движение фракций дисперсной фазы описывается

уравнениями неразрывности средней плотности, сохранения компонент импульса и сохранения тепловой энергии с учётом межфазного обмена массой, импульсом и энергией. Изменение структуры дисперсной фазы, в соответствие с принятой моделью, происходит не только вследствие газодинамических процессов, но также в результате дробления капель, их коагуляции, испарения и конденсации пара. Система уравнений движения парок капельной смеси решалась явным конечно-разностным методом Мак-Кормака второго порядка точности с расщеплением пространственного оператора по направлениям и со схемой нелинейной коррекции.

Положения, выносимые на защиту:

- эффект возникновения резонансных колебаний в трубе-резонаторе при фиксированной частоте внешнего возбуждения вследствие изменения свойств коагулирующей газозвеси, а также динамические эффекты, сопровождающие пространственную сепарацию фракций полидисперсной газозвеси при обтекании обратного уступа;

- результаты численных расчётов, гидро- и термодинамические эффекты изменения дисперсности и расхода фаз и фракций, сопровождающие течение полидисперсной парок капельной смеси метана в коаксиальном канале, геометрия которого используется в регазификаторах СПГ;

- эффект формирования двухфракционной парок капельной системы при течении полидисперсной парок капельной смеси с коагуляцией, дроблением, испарением капель и конденсацией пара в канале с теплоизолированной внешней стенкой;

- характеристики полидисперсного парок капельного потока с учётом дробления, коагуляции, испарения капель и конденсации пара при различных температурах внешней стенки коаксиальной трубы;

- эффект запираания потока при повышении температуры стенки до значения, при котором, вследствие интенсивного испарения капель, давление пара в выходном канале превышает давление на входе;

- оригинальный технологический способ регазификации жидкости.

Объект исследования. В работе рассматривается динамика парок капельных смесей при течении в каналах с учётом полидисперсности фракций, скоростной и температурной неравновесности несущей и дисперсной фазы, нагрева, дробления, коагуляции, испарения капель и конденсации пара.

Область исследования соответствует следующим пунктам паспорта специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы»:

Пункт 6. Течения многофазных сред (газожидкостные потоки, пузырьковые среды, газозвеси, аэрозоли, суспензии и эмульсии).

Пункт 15. Тепломассоперенос в газах и жидкостях.

Пункт 18. Аналитические, асимптотические и численные методы исследования уравнений кинетических и континуальных моделей однородных и

многофазных сред (конечно-разностные, спектральные, методы конечного объёма, методы прямого моделирования и др.).

Степень достоверности полученных результатов. Результаты работы получены в ходе численного решения классических уравнений гидродинамики парокапельных сред, дополненных известными из литературы апробированными теоретико-экспериментальными моделями дробления, коагуляции, испарения капель и конденсации пара. Выполненные тестовые расчёты динамики аэрозолей и парокапельных смесей с учётом механизмов дробления, коагуляции, нагрева, испарения капель и конденсации пара хорошо согласуются с известными из литературы результатами.

Личный вклад автора состоит в анализе литературных источников, написании программных кодов и проведении расчётов тестового характера для моделей дробления, нагрева, испарения, коагуляции капель, конденсации пара, в выполнении численных расчётов, интерпретации и обсуждении полученных результатов, написании статей, в разработке способа регазификации жидкости и технологической схемы, реализующей способ.

Апробация результатов исследования. Исследования, проведённые в диссертации, докладывались, обсуждались на 17 международных и всероссийских научных конференциях [10-30]: Международная научно-техническая конференция «Проблемы и перспективы развития двигателестроения» (Самара, 2016 г.); Проблемы тепломассообмена и гидродинамики в энергомашиностроении: X школа-семинар молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова (Казань, 2016 г.); X Всероссийская научная конференция «Нелинейные колебания механических систем» (Н. Новгород, 2016 г.); VIII Всероссийская научно-техническая конференция «Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий» (Казань, 2016 г.); Международная научно-техническая конференция «Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы – 2016, 2017, 2018» (Казань, 2016, 2017, 2018 гг.); 7-я международная научная школа молодых учёных «Волны и вихри в сложных средах» (Москва, 2016 г.); XXI Школа-семинар молодых учёных и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках» (Санкт-Петербург, 2017 г.); Всероссийская конференция «Физика низкотемпературной плазмы» ФНТП-2017 (Казань, 2017 г.); XVIII Всероссийская конференция молодых учёных по математическому моделированию и информационным технологиям (Иркутск, 2017 г.); Международная молодежная научная конференция «XXIII Туполевские чтения» (Казань, 2017 г.); Новые технологии, материалы и оборудование российской авиакосмической отрасли: Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием (Казань, 2018 г.); Седьмая Российская национальная конференция по теплообмену (Москва, 2018 г.); XIX Всероссийская конференция молодых учёных по математическому моделированию и информационным технологиям (Кемерово, 2018 г.); Научно-

техническая конференция по итогам совместного конкурса фундаментальных исследований РФФИ-РТ: региональная научно-практическая конференция (Казань, 2017 г., 2018 г.); Необратимые процессы в природе и технике: Десятая Всероссийская конференция (Москва, 2019 г.).

Публикации. Результаты диссертации опубликованы в 30 работах, из них 2 статьи в журналах, рекомендованных ВАК, 4 статьи цитируются в базах данных Web of Science, Scopus, 2 патента РФ на изобретение и заявка на изобретение РФ, 21 тезис и материал докладов международных и Всероссийских научных конференций.

Структура и объём диссертационной работы. Диссертация включает в себя список принятых сокращений и условных обозначений, введение, 4 главы, заключение, список используемых источников информации и приложение. Объём диссертации составляет 186 страниц, 91 рисунок, 2 таблицы. Список используемых источников информации включает 110 наименований. Приложение содержит описание способа регазификации и копии патентов на изобретение.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приводятся цель и задачи диссертационной работы, её научная новизна, теоретическая и практическая значимость, формулируются положения, выносимые на защиту.

В первой главе содержится обзор литературы по теме исследования, описаны используемые в работе методы моделирования динамики полидисперсной газозвеси и парокапельной смеси. Приводятся системы уравнений движения несущей среды (1) и фракций дисперсной фазы (2) в декартовых и обобщенных криволинейных координатах. При записи сил аэродинамического сопротивления используются аппроксимации для коэффициентов сопротивления твердых сферических частиц в случае газозвеси и аппроксимации коэффициентов сопротивления для деформирующихся в потоке капель.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = -\frac{\rho v}{y} + j, \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u^2 + p - \tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho uv - \tau_{xy}) = -\frac{\rho uv - \tau_{xy}}{y} - \sum_{i=1,n} F_{xi} + \alpha \frac{\partial p}{\partial x} + j \cdot u,$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho uv - \tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v^2 + p - \tau_{yy}) = -\frac{\rho v^2 + p - \tau_{yy}}{y} - \sum_{i=1,n} F_{yi} + \alpha \frac{\partial p}{\partial y} + j \cdot v,$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} = -\frac{\rho vw}{y} - \sum_{i=1,n} F_{zi},$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial e}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left([e + p - \tau_{xx}]u - \tau_{xy}v + \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left([e + p - \tau_{yy}]v - \tau_{xy}u + \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \\ & = - \frac{[e + p - \tau_{yy}]v - \tau_{xy}u + \lambda \frac{\partial T}{\partial y}}{y} - \sum_{i=1, n} Q_i - \sum_{i=1, n} (|F_{xi}|(u - u_i) - |F_{yi}|(v - v_i)) + \alpha \left(\frac{\partial p u}{\partial x} + \frac{\partial p v}{\partial y} \right) + j \cdot L. \end{aligned}$$

Система уравнений динамики дисперсных фракций состоит из уравнения неразрывности, уравнения сохранения компонент импульса и уравнения сохранения тепловой энергии. При описании движения несущей среды и дисперсных фракций учитывается межфазный обмен массой, импульсом и энергией, а также сила аэродинамического взаимодействия, включающая в себя силу Архимеда, силу аэродинамического сопротивления и силу присоединённых масс.

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_i u_i)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_i v_i)}{\partial y} = -\frac{\rho_i v_i}{y} - j_i, \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho_i u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_i u_i^2) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho_i u_i v_i) = -\frac{\rho_i u_i v_i}{y} + F_{xi} - \alpha_i \frac{\partial p}{\partial x} - j_i \cdot u_i,$$

$$\frac{\partial(\rho_i v_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_i u_i v_i) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho_i v_i^2) = -\frac{\rho_i v_i^2}{y} + F_{yi} - \alpha_i \frac{\partial p}{\partial y} - j_i \cdot v_i,$$

$$\frac{\partial(\rho_i w_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_i u_i w_i) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho_i v_i w_i) = -\frac{\rho_i v_i w_i}{y} + F_{zi},$$

$$\frac{\partial e_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(e_i u_i) + \frac{\partial}{\partial y}(e_i v_i) = -\frac{e_i v_i}{y} + \text{Nu}_i \frac{6\alpha_i}{(2r_i)^2} \lambda (T - T_i) - j_i \cdot L,$$

$$\rho_i = \alpha_i \rho_{i0}, \quad e_i = \rho_i C_{pi} T_i.$$

$$\begin{aligned} F_{xi} = & \frac{3}{4} \frac{\alpha_i}{(2r_i)} C_{di} \rho \sqrt{(u - u_i)^2 + (v - v_i)^2 + (w - w_i)^2} (u - u_i) + \alpha_i \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \\ & + 0,5 \alpha_i \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial u_i}{\partial t} - u_i \frac{\partial u_i}{\partial x} - v_i \frac{\partial u_i}{\partial y} \right), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{yi} = & \frac{3}{4} \frac{\alpha_i}{(2r_i)} C_{di} \rho \sqrt{(u - u_i)^2 + (v - v_i)^2 + (w - w_i)^2} (v - v_i) + \alpha_i \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \\ & + 0,5 \alpha_i \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial v_i}{\partial t} - u_i \frac{\partial v_i}{\partial x} - v_i \frac{\partial v_i}{\partial y} \right), \end{aligned}$$

$$F_{zi} = \frac{3}{4} \frac{\alpha_i}{(2r_i)} C_{di} \rho \sqrt{(u-u_i)^2 + (v-v_i)^2 + (w-w_i)^2} (w-w_i),$$

$$C_{di} = C_{di}^0 \psi(M_{i0}) \varphi(\alpha_i), \quad C_{di}^0 = \left(\frac{24}{Re_{i0}} + \frac{4}{Re_{i0}^{0.5}} + 0,4 \right) (1 + 0,25 We_i^{0.1} / Lp_i^{0.04}),$$

$$\varphi(\alpha_i) = (1-\alpha_i)^{-2.5}, \quad \psi(M_{i0}) = 1 + \exp\left(-\frac{0,427}{M_{i0}^{0.63}}\right), \quad V = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}, \quad V_i = \sqrt{u_i^2 + v_i^2 + w_i^2},$$

$$M_{i0} = |\bar{V} - \bar{V}_i| / c, \quad Re_{i0} = \rho |\bar{V} - \bar{V}_i| 2r_i / \mu, \quad Pr = \mu C_p / \lambda, \quad 0 \leq M_{i0} \leq 2, \quad 0 \leq Re_{i0} < 2 \cdot 10^5.$$

При описании динамики парокапельной смеси к основной системе уравнений для несущей среды и фракций дисперсной фазы добавляются модели отдельных процессов: газодинамическое дробление, коагуляция, испарение капель фракций со скоростным скольжением, конденсация пара. В п. 1.2.4 описана модель коагуляции капель. Если число Вебера для некоторой фракции меньше критического значения (10-12), то для неё и для всех меньших фракций начинает действовать механизм коагуляции капель фракций с относительным скоростным скольжением. Для описания процесса коагуляции используется лагранжева модель Смолуховского, учитывающая парные соударения капель различных фракций. Модель коагуляции позволяет описать уменьшение концентрации капель меньших размеров, соударяющихся с более крупными каплями, уменьшение их средней плотности, изменение импульса капель более крупных фракций, их радиусов, объёмных содержаний и средних плотностей.

Крупные капли с существенной скоростной и температурной неравновесностью испаряются после предварительного нагрева до температуры насыщения при текущем давлении пара в потоке. В п. 1.2.5 описана модель прогрева и испарения крупных капель. Если в результате нагрева температура капли достигала температуры насыщения, начиналось интенсивное испарение с её поверхности. Определялось уменьшение массы, радиуса капли, объёмного содержания фракции, а также увеличение плотности пара.

Процесс испарения крупных капельных фракций учитывался, если число Вебера для капель данной фракции было меньше критического значения, так как предполагалось, что если число Вебера выше критического, то происходит газодинамическое дробление капли, которое уносит массу более интенсивно, чем процесс испарения. Модель дробления предусматривает существование инерционного временного интервала, в течение которого происходит нарастание неустойчивости капли, предшествующее её дроблению. В процессе дробления осколки от дробления пополняют равновесную фракцию, пересчитывается её средняя плотность и объёмное содержание. Затем, если температура пара при текущем давлении выше температуры насыщения или давление пара при текущей температуре меньше давления насыщения, включается механизм рав-

новесного испарения равновесной фракции, пересчитывается её объёмное содержание и определяется новая концентрация (п. 1.2.6).

В конце первой главы приводятся выводы по составу модели парок капельной среды и включенным в неё механизмам, обеспечивающим фазовые переходы и изменение дисперсности.

Во второй главе содержатся результаты тестовых расчётов динамики газа, процессов дробления, коагуляции, нагрева и испарения капель крупных фракций, равновесного испарения и конденсации мелкой фракции. Была выполнена верификация переносных свойств численной схемы на основе решения задачи о колебаниях аэрозоля в закрытой трубе, результаты численного расчёта сопоставляются с известными из литературы результатами физического эксперимента (рис. 1). Решается задача о течении газа в квадратной камере, результаты сравниваются с известным из литературы решением других авторов (рис. 2).

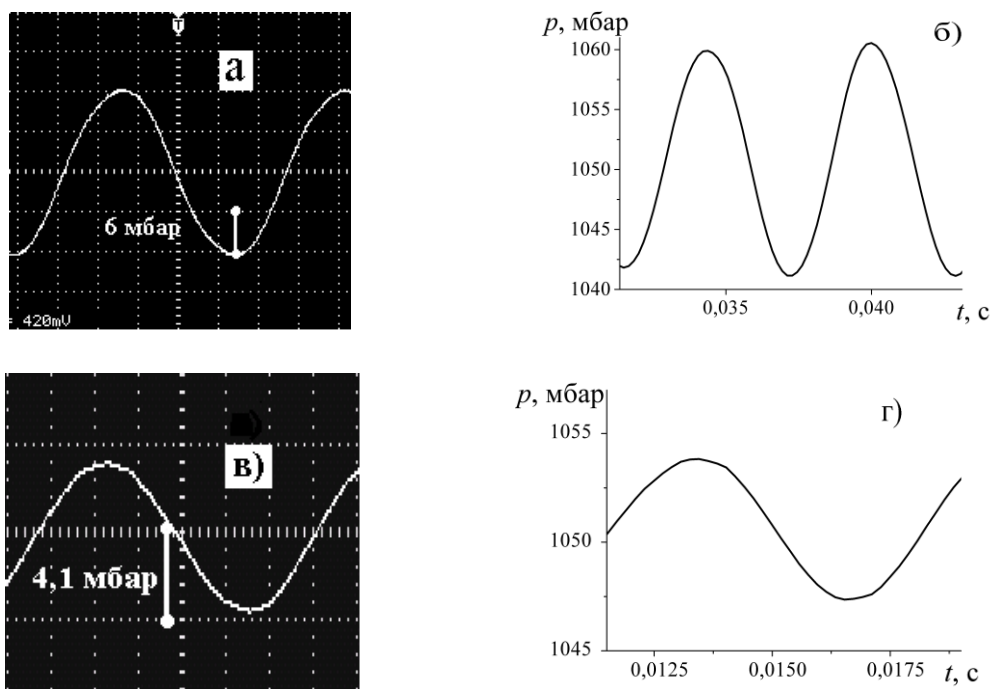


Рисунок 1 – Зависимость давления на закрытом конце трубы от времени для амплитуды хождения поршня $a = 0,3$ мм (а, б) и $a = 0,1$ мм (в, г): а, в – физический; б, г – численный эксперимент

Тестировался процесс дробления капель воды в воздушном потоке по механизму обдирки поверхностного слоя при различных диаметрах капли и относительных скоростях потока, показано качественное и количественное совпадение с известными из литературы результатами (рис. 3, рис. 4).

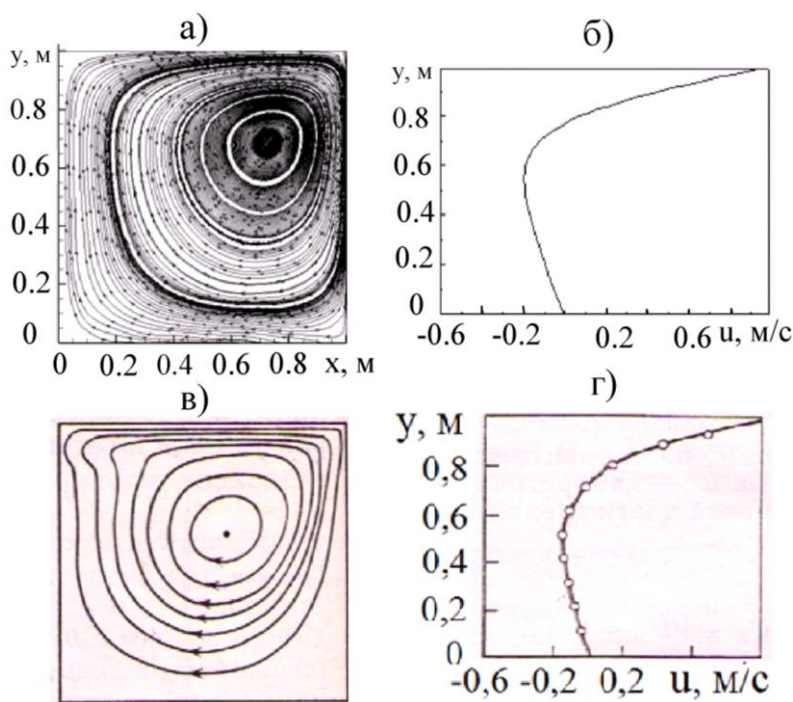


Рисунок 2 – Течение газа в каверне, $u = 1$ м/с: а) поле скоростей газа, сетка 200×200 ; б) распределение x -составляющей скорости газа вдоль прямой $x = 0,5$ м; в), г) поле скоростей и распределение x -составляющей скорости газа вдоль прямой $x = 0,5$ м при $Re = 100$ (Полежаев В.И., Бунэ А.В., Верезуб Н.А. и др. Математическое моделирование конвективного теплообмена на основе уравнений Навье-Стокса. М.: Наука, 1987.)

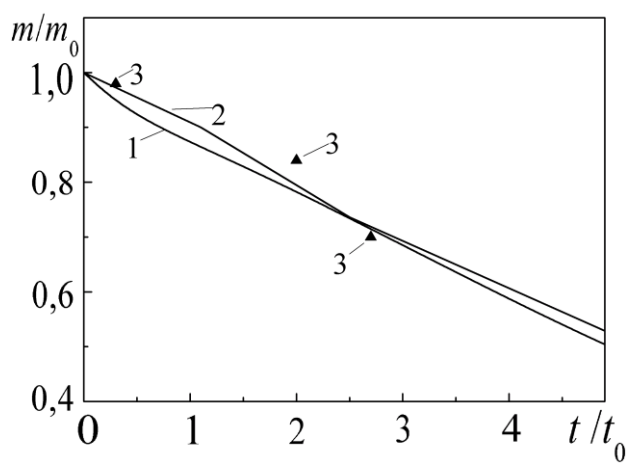


Рисунок 3 – Сопоставление результатов расчётов скорости дробления капель воды в потоке воздуха при $We_{отн} = 25$: 1 – результат расчётов в настоящей работе; 2, 3 – результат расчётов и эксперимента (Арефьев К.Ю., Воронецкий А.В. Моделирование процесса дробления и испарения капель нереагирующей жидкости в высокоэнтальпийных газодинамических потоках // Теплофизика и аэромеханика, 2015. Т. 22, № 5. С. 609–620)

Численно решалась задача о течении полидисперсной парокapельной смеси, в которой, в зависимости от значения числа Вебера в различных фракциях действовали как механизмы дробления, так и механизмы коагуляции капель. Были получены тестовые решения, описывающие прогрев капель до температуры насыщения с последующим испарением, уменьшением радиуса и средней плотности. Результаты расчётов изменения радиусов капель при испарении были сопоставлены с известными из литературы результатами (рис. 5). Верификация численной модели равновесных фазовых переходов, описывающей испарение мелкодисперсной фракции и конденсацию пара при смещении системы от положения термодинамического равновесия, выполнялась путём анализа балансовых термодинамических соотношений для фазовых переходов при различных начальных и конечных состояниях парокapельной системы.

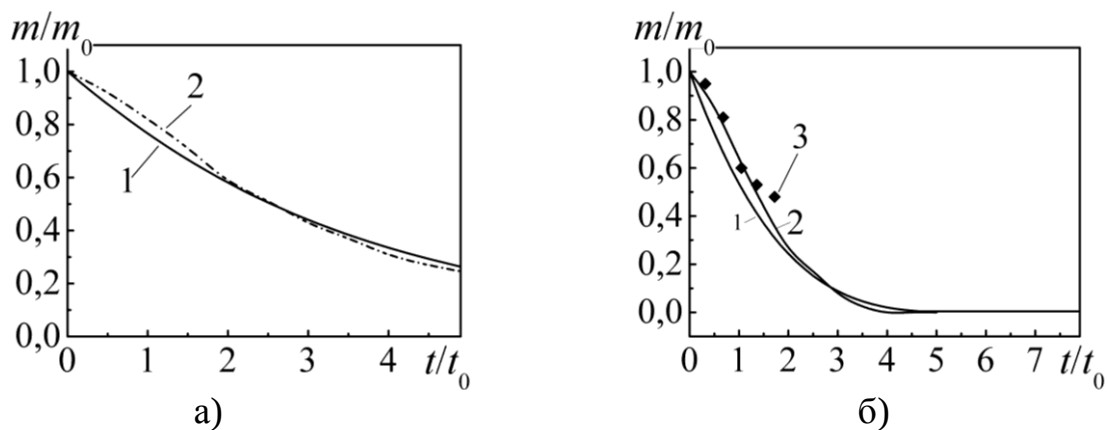


Рисунок 4 – Сопоставление результатов расчётов скорости дробления капель воды в потоке воздуха при $We_{omn} = 75$ (а) и $We_{omn} = 105$ (б): 1 – результат расчётов в настоящей работе; 2, 3 – результаты расчётов и эксперимента (Арефьев К.Ю., Воронецкий А.В. Моделирование процесса дробления ... С. 614)

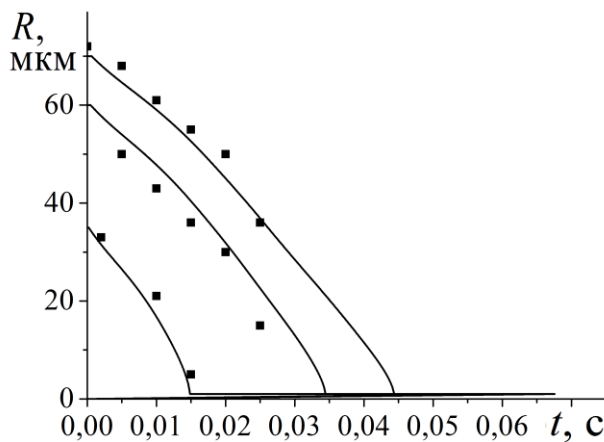


Рисунок 5 – Зависимость радиусов капль от времени при испарении в потоке воздуха с температурой $T = 870$ К и скоростью $u = 0,05$ М. Сплошная линия – расчёт в настоящей работе; точки – эксперимент (Арефьев К.Ю., Воронецкий А.В. Моделирование процесса дробления ... С. 615)

В третьей главе численно исследуются процессы волновой динамики (п. 3.1) и пространственной сепарации полидисперсных газовзвесей (п. 3.2). Волновые процессы в полидисперсных системах могут сопровождаться изменением размера частиц вследствие их коагуляции или дробления. Изменение дисперсности системы при неизменных параметрах внешнего возбуждения может сопровождаться эволюцией её динамического поведения. Такие явления учитываются при разработке систем сепарации и осушки полидисперсных парокapельных сред. В задаче о колебаниях коагулирующей полидисперсной газовзвеси в волновом поле (п. 3.1) предметом исследования является процесс возникновения параметрического резонанса в акустической системе вследствие изменения дисперсности газовзвеси, заполняющей резонатор при фиксированных параметрах внешнего возбуждения. Динамика среды описывается системой уравнений движения многоскоростного многотемпературного континуума

с учётом обмена импульсом и энергией между несущей фазой и дисперсными фракциями. Коагуляция частиц различных фракций моделируется на основе лагранжевой модели Смолуховского, учитывающей парные столкновения. Параметрический резонанс в двухфракционной системе возникает вследствие смещения резонансной частоты за счёт изменения дисперсности газозвеси в процессе коагуляции, инициированной добавлением малого количества фракции крупных частиц в мелкодисперсную газозвесь (рис. 6).

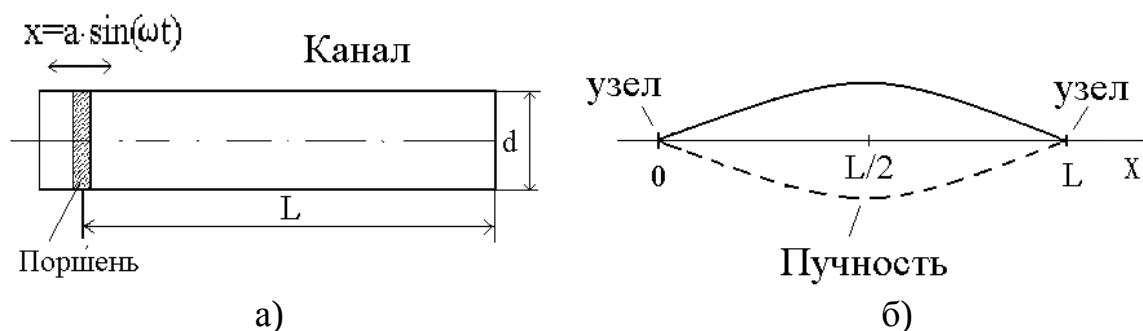


Рисунок 6 – Схема резонатора (а) и форма стоячей волны поля скорости на первой собственной частоте (б)

Изменение дисперсности системы приводит к снижению диссипативности и меняет характер колебаний. На начальном этапе колебаний высокая концентрация мелких частиц приводит к сильному смещению резонансной частоты влево от частоты колебаний поршня, которая с течением времени не меняется и совпадает с первой собственной частотой для несущей среды без дисперсной фазы ($\nu_{11}=137$ Гц). Частота биений на временных зависимостях для осевых составляющих скоростей дисперсных фракций (рис. 7, в, г) составляет приблизительно $\nu \approx 32$ Гц. С течением времени, по мере вызванного коагуляцией уменьшения средней плотности мелкой фракции, период биений увеличивается. Это говорит о том, что разность между резонансной частотой системы и частотой колебаний поршня, равной первой собственной частоте для чистого газа уменьшается. В результате, в системе возникают резонансные в осевом направлении колебания с амплитудой изменения скорости в пучности стоячей волны ($x = L/2$, $y = d/2$), достигающей 20 м/с (рис. 7, в). В результате проведения расчётов получена оценка времени изменения дисперсности системы (рис. 7, а, б) и генерации резонансных колебаний в зависимости от величины константы коагуляции. Таким образом, в результате изменения дисперсности системы – роста в процессе коагуляции частиц крупной фракции и практически полного исчезновения в системе мелкодисперсной фазы – резонансная частота системы приближается к первой собственной частоте продольных колебаний несущей среды, с которой осуществляется внешнее возбуждение, что приводит к возникновению резонансных акустических колебаний.

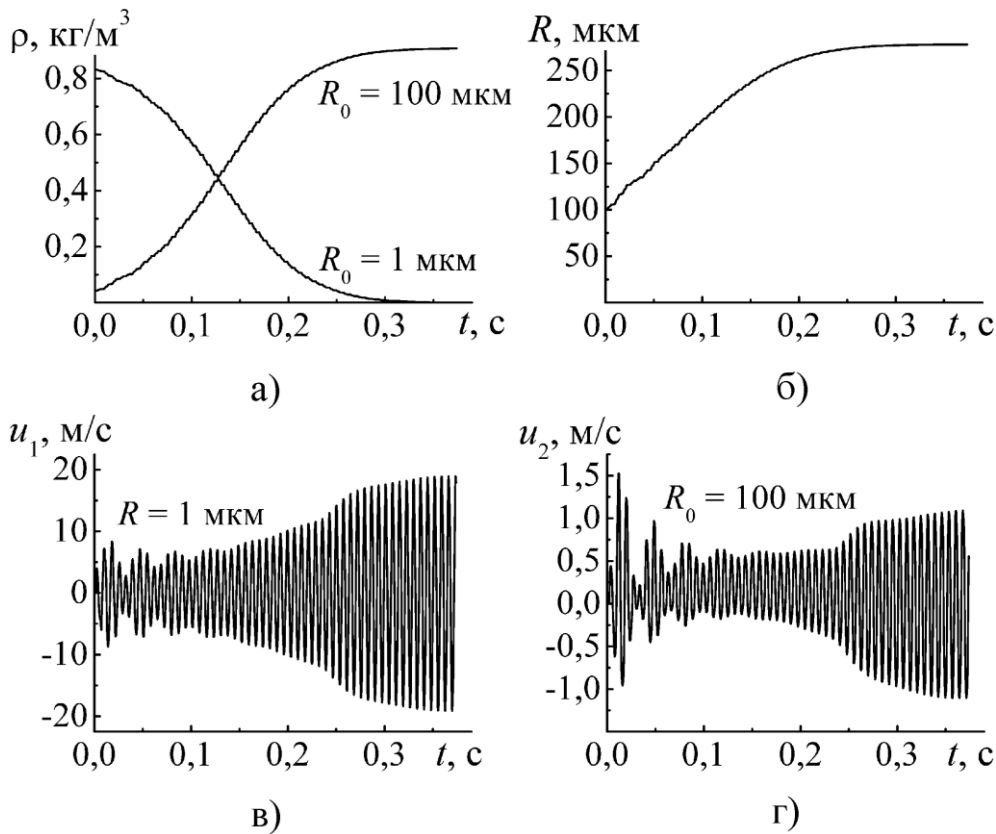


Рисунок 7 – Динамика двухфракционной коагулирующей газовой взвеси в пучности стоячей волны поля скорости ($x = L/2$, $y = d/2$): а – средняя плотность фракций; б – радиус крупной фракции; осевая составляющая скорости мелкой (в) и крупной (г) фракции

Для пространственного разделения несущей и дисперсной фазы используются инерционные сепараторы. Если требуется разделить фракции дисперсной фазы, состоящие из частиц различного размера, метод сепарации может основываться на динамических характеристиках фракций, связанных со скоростным скольжением относительно несущей среды в зависимости от размера и плотности частиц. Известно, что при обтекании обратного уступа чистым газом (задача Прандтля-Майера), вблизи вершины уступа образуется веер волн разрежения, поворачивающий изначально прямолинейный поток газа. В п. 3.2 рассматривается численное моделирование обтекания обратного уступа полидисперсной газовой взвесью. При этом применяется система уравнений движения вязкого сжимаемого теплопроводного газа, учитывающая обмен импульсом и энергией между несущей средой и дисперсными фракциями. В п. 3.2 на основе модели полидисперсной газовой взвеси описана пространственная сепарация фракций частиц различного радиуса, меняющегося от 1 до 100 мкм, возникающая при обтекании обратного уступа в диапазоне скоростей несущей среды от 0,1 М до 1 М.

В расчётах показано, что обтекание обратного уступа полидисперсной газозвесью сопровождается разворотом потока, формированием вихря за уступом и изменением пространственного распределения концентраций фракций вследствие скоростной неравновесности полидисперсной системы, что может быть использовано для построения сепарирующих устройств (рис. 8). Форма вихря зависит от режима течения газозвеси. Минимум средней плотности дисперсных фракций находится в центре вихря, к периферии значение средней плотности фракций увеличивается. Эффект может быть использован для сепарации фаз в каналах с разворотом потока.

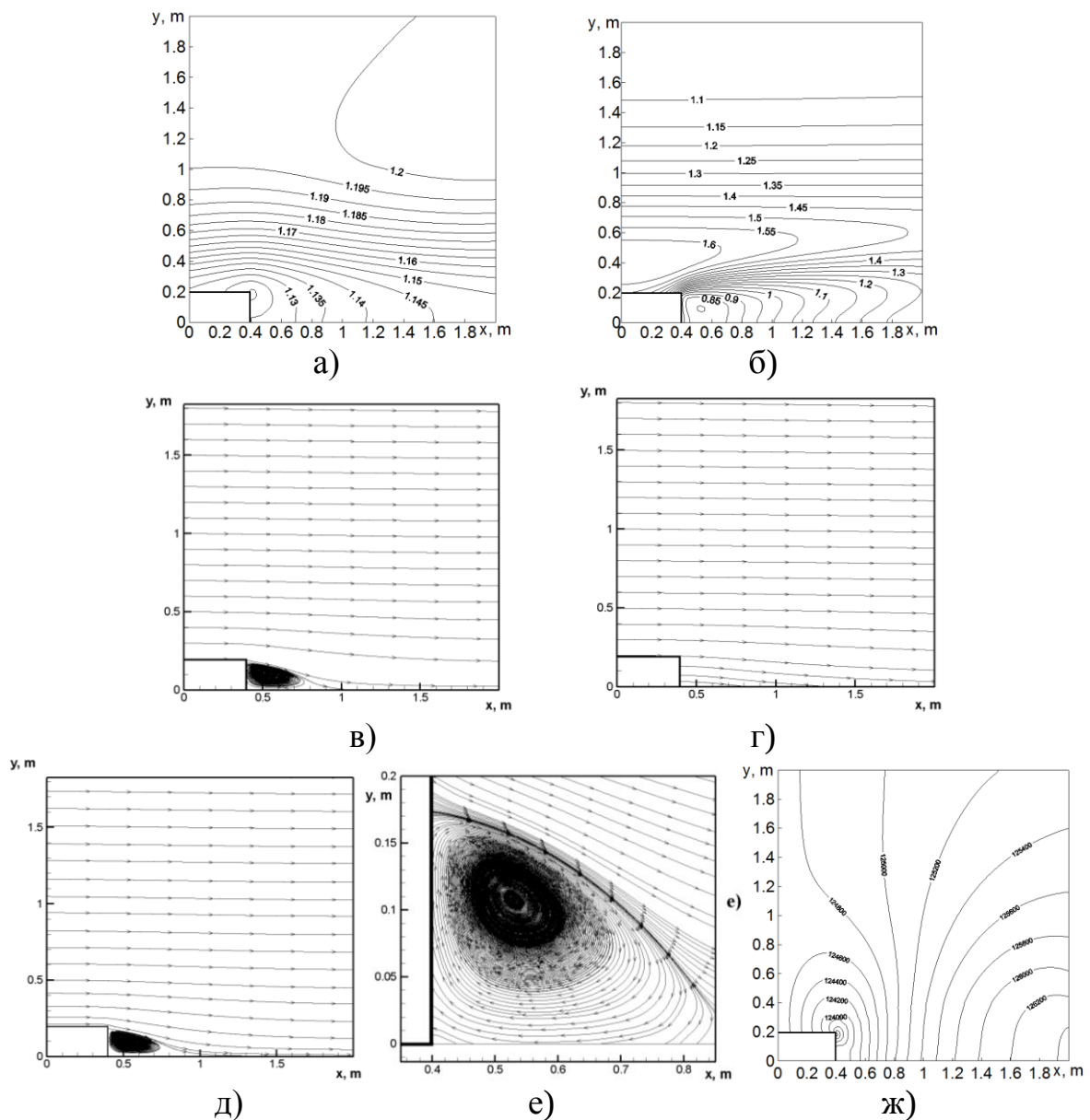


Рисунок 8 – Результаты расчётов обтекания обратного уступа газозвесью, $M = 0,6$. Изолинии средней плотности 1-ой (1 мкм) (а) и 5-ой (100 мкм) (б) дисперсных фракций, векторные поля скоростей 1-ой (в) и 5-ой (г) дисперсных

фракций. Векторное поле скоростей (д), увеличенное изображение вихря, образованного за уступом (е), изолинии поля давлений несущей среды (ж)

Четвёртая глава посвящена моделированию различных режимов течения полидисперсной парок капельной смеси в осесимметричном коаксиальном канале «труба в трубе» (рис. 9) с учётом механизмов дробления, коагуляции, испарения капель и конденсации пара в парок капельных потоках, движущихся в каналах при внешнем нагреве стенок с учётом инерционных сил и закрутки потока применительно к разработке и модификации теплообменников-регазификаторов (рис. 10) с парок капельным рабочим телом для энергетического оборудования и транспорта на сжиженном природном газе.

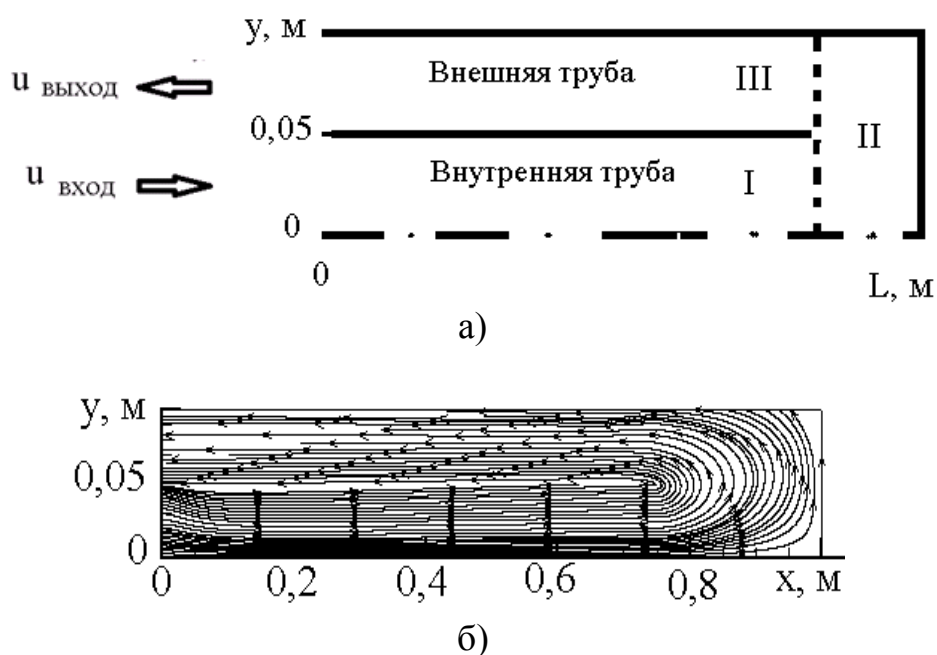
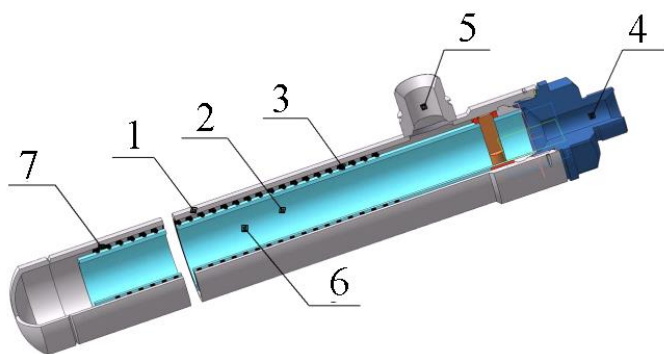


Рисунок 9 – Геометрия расчётной области (а) и векторное поле скоростей несущей среды (б) в момент времени $t = 0,012$ с



ная кольцевыми зазорами между внешней (1) и внутренней (2) трубами

Рисунок 10 – Схематическое изображение нагревателя-регазификатора СПГ: 1 – внешняя, 2 – внутренняя теплообменная труба; 3 – интенсификатор теплоотдачи; 4 – входной, 5 – выходной штуцер; 6 – внутренняя полость теплообменной трубы 2; 7 – внешняя полость, образованная кольцевыми зазорами между внешней (1) и внутренней (2) трубами

В п. 4.1 рассматривается течение парокапельной смеси в коаксиальном канале с теплоизолированной внешней стенкой. На рис. 9, а показана геометрия расчётной области, построенная с учётом осевой симметрии канала, длина которого $L = 1$ м, радиусы внутренней и наружной труб $R_{вн} = 0,05$ м и $R_n = 0,1$ м. Парокапельная метановая смесь втекает во внутреннюю трубу при $x = 0$ (область I, рис. 9, а). Поток разворачивается в области II, протекает через внешний концентрический канал III и вытекает через сечение $x = 0$ (рис. 9, б). В расчётах дисперсная фаза включает в себя 5 капельных фракций. Радиус капель равновесной фракции составляет 1 мкм. Неравновесные по скорости с несущей средой фракции образованы каплями с начальными радиусами 10, 20, 50, 100 мкм. Начальные объёмные содержания фракций одинаковы и составляют $\alpha_i = 0,0001$ при плотности жидкого метана $\rho_{жидк} = 416$ кг/м³. Начальные температура и плотность пара $T_0 = 107$ К, $\rho_0 = 1,29$ кг/м³. Начальная температура равновесной ($R_0 = 1$ мкм) фракции совпадает с начальной температурой пара и равна температуре насыщения для начального давления смеси, составляющего $p_0 = 71499$ Па. Температура капель крупных фракций составляет $T_i = 100$ К.

Расчёты проводились на равномерной в осевом и радиальном направлении блочно-структурированной конечно-разностной сетке, включающей в себя 3 подобласти I–III и содержащей 200×100 узлов (см. рис. 9, а). Граничные условия на линиях стыковки блоков задавались с учётом направления течения. Блоки I, II, III включают в себя узлы: I: $1 \leq j \leq 3n_j/4$, $1 \leq k \leq n_k/2$; II: $3n_j/4 \leq j \leq n_j$, $1 \leq k \leq n_k$; III: $1 \leq j \leq 3n_j/4$, $n_k/2 \leq k \leq n_k$, где n_j , n_k – число узлов в осевом и радиальном направлении. На входе в подобласть I при $x = 0$ задавалось однородное граничное условие Неймана для давления и составляющие скорости несущей среды: $u(t, x = 0) = 0,1$ М, $v(t, x = 0) = 0$. На выходе из области III (см. рис. 9, а) при $x = 0$ задавалось давление несущей среды, а для остальных газодинамических функций ставилось однородное граничное условие Неймана. Для азимутальной составляющей скорости на оси симметрии при $y = 0$ и на боковых стенках (области I, III) ставились однородные граничные условия 1 рода. Закрутка потока моделировалась заданием величины азимутальной составляющей скорости вблизи боковой границы области III. В начальный момент времени в области I задаются составляющие скорости потока. В приведенных ниже расчётах $u(t = 0) = 0,1$ М, $v(t = 0) = 0$, где $M = |V|/c$. В областях II, III начальные скорости парокапельной смеси нулевые. На твердых стенках канала для скорости задается граничное условие прилипания, а для давления, плотности, температуры и энергии пара ставятся однородные граничные условия Неймана. В результате решения задачи были построены временные зависимости для параметров парокапельной смеси, а также поля скоростей, средних плотностей, температур различных фракций и несущей среды.

В случае течения парокапельной смеси в канале с теплоизолированной стенкой выявлен и описан процесс формирования под действием механизмов дробления, коагуляции капель и конденсации пара двухфракционной дисперс-

ной смеси, содержащей равновесную фракцию и фракцию капель с радиусом, близким к среднему для полидисперсной смеси в начальный момент времени (см. рис. 11). Временные зависимости получены для точки в области межтрубного канала с координатами $x = 0,25$ м, $y = 0,075$ м.

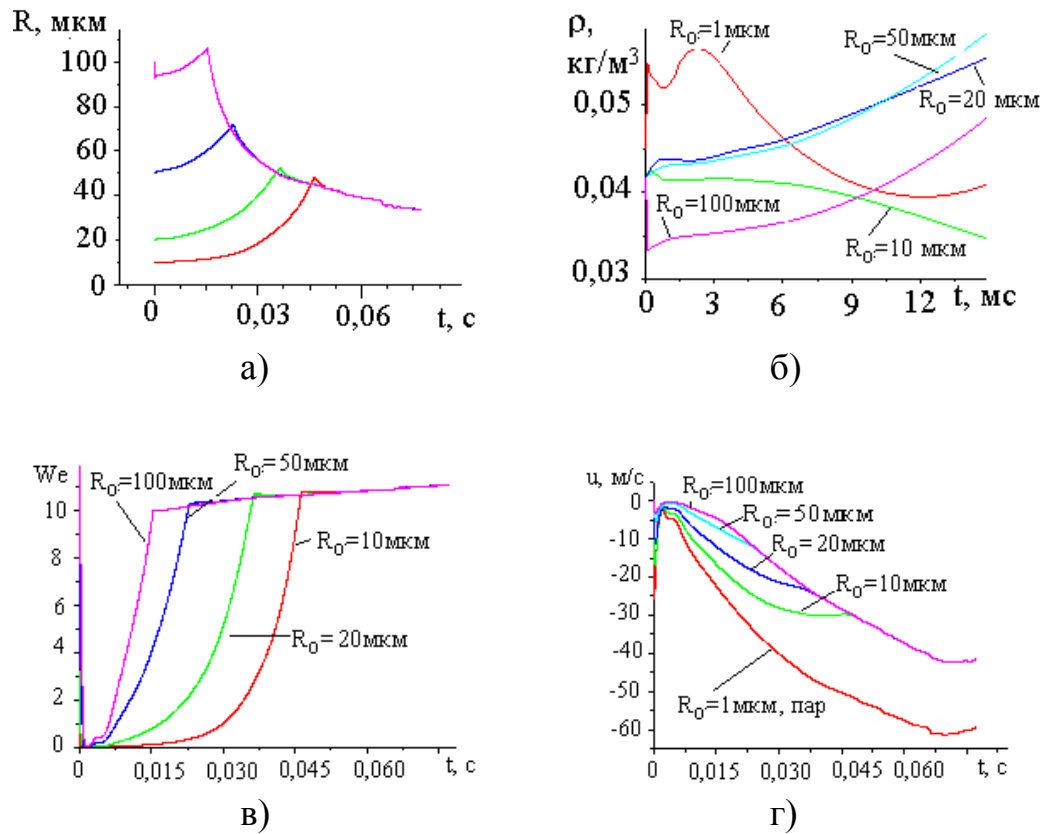


Рисунок 11 – Временные зависимости параметров фракций парокapельной смеси: а) радиусы, б) средние плотности, в) числа Вебера, г) осевые составляющие скорости капель различных фракций

В п. 4.2-4.4 рассмотрены режимы течения полидисперсной парокapельной смеси при различных температурах внешней стенки канала в диапазоне от 162 К (рис. 12, 13) до 300 К. Описано временное и пространственное изменение характера потока, плотности, скорости и температуры пара, давления, скорости, средних плотностей, радиусов капель фракций при различных температурах внешней стенки трубы. Построены временные и пространственные зависимости функций, описывающих течение несущей среды и фракций дисперсной фазы.

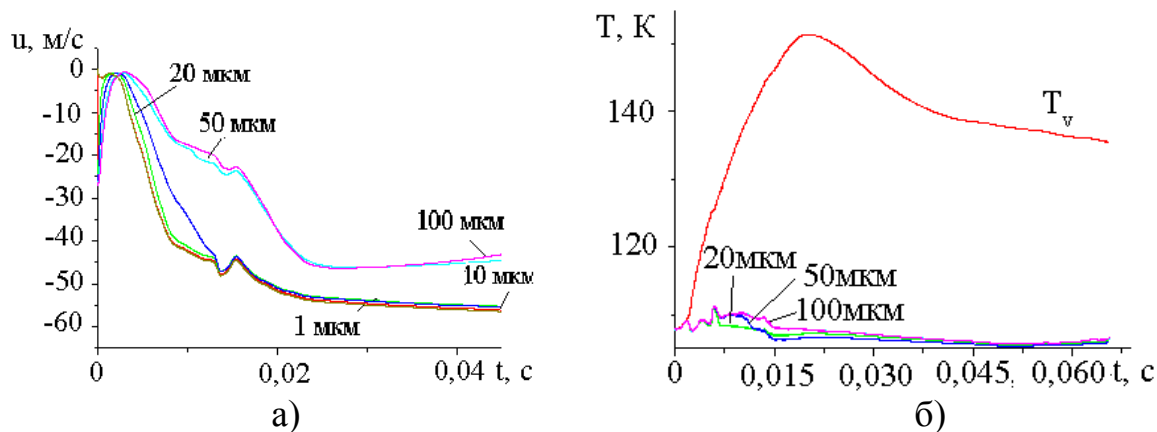


Рисунок 12 – Процесс установления стационарного режима течения: временные зависимости скорости (а), температуры (б) фракций различного радиуса

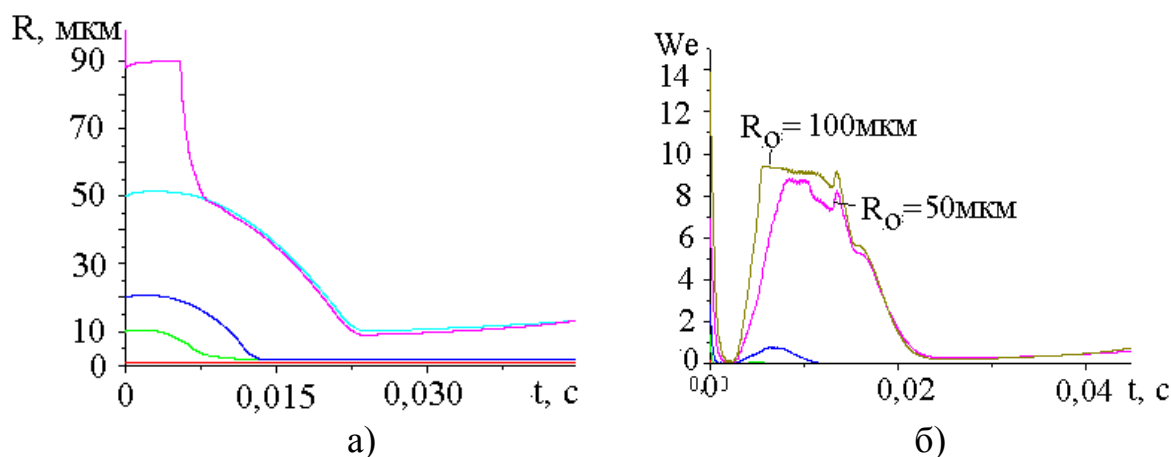


Рисунок 13 – Зависимость от времени радиусов (а), чисел Вебера (б) фракций в потоке

В результате проведения расчетов обнаружен эффект запирания потока при повышении температуры стенки до значения, при котором, вследствие интенсивного испарения капель давление пара в выходном канале превышает давление на входе. Полученные результаты позволяют оценить расход парок капельной смеси и её состав при движении в каналах с различной температурой нагрева внешней поверхности и могут быть использованы в практике проектирования регазификаторов сжиженного природного газа с предварительным диспергированием жидкости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной к защите работе построена математическая модель, численный метод и реализующий его программный комплекс, выполнено тестирование и получены результаты численного моделирования процессов тече-

ния полидисперсных парокapельных смесей и газовзвесей в элементах энергетического оборудования.

В работе:

- построена математическая модель, численный метод и программный комплекс для описания гидро- и термодинамики полидисперсных однокомпонентных парокapельных систем в эйлеровой постановке с учётом межфазного обмена импульсом и энергией между несущей средой и дисперсной фазой, с учётом скоростной и температурной неравновесности, механизмов газодинамического дробления капель, их коагуляции, прогрева и испарения, конденсации пара;

- верифицирован программный комплекс: переносные свойства несущей среды, механизмы газодинамического дробления, коагуляции капель, их прогрева и испарения, конденсации пара;

- численно исследованы процессы, применяемые в технологиях регазификации: пространственная сепарация фракций полидисперсной газовзвеси и волновое воздействие на полидисперсную коагулирующую газовзвесь. Описаны динамические эффекты, сопровождающие пространственную сепарацию фракций полидисперсной газовзвеси при обтекании обратного уступа, а также эффект возникновения резонансных колебаний в трубе-резонаторе при фиксированной частоте внешнего возбуждения вследствие изменения свойств коагулирующей газовзвеси;

- выполнены численные расчёты, выявлены и описаны гидро- и термодинамические эффекты изменения дисперсности и расхода, сопровождающие течение полидисперсной парокapельной смеси метана в коаксиальном канале, геометрия которого используется в регазификаторах сжиженного природного газа;

- выявлен эффект формирования двухфракционной парокapельной системы при течении полидисперсной парокapельной смеси с коагуляцией, дроблением капель и конденсацией пара в канале с теплоизолированной внешней стенкой;

- описано изменение характера потока, плотности, скорости и температуры пара, скорости, средних плотностей, радиусов капель фракций при различных температурах внешней стенки трубы;

- выявлен эффект запираания потока при повышении температуры стенки до значения, при котором, вследствие интенсивного испарения капель, давление пара в выходном канале превышает давление на входе;

- разработан способ регазификации жидкости и схема установки для регазификации жидкости, устройство подачи, измерения, регулирования количества и расхода жидкости, на которые получены 2 патента РФ на изобретение.

Основные положения и результаты диссертационной работы изложены в следующих публикациях:

Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ:

1. Тукмакова, Н.А. Изменение дисперсности двухфазной смеси в процессах дробления и коагуляции капель / Н.А. Тукмакова // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева, 2019. – № 1 (95). – С. 11-17 (100 %).

2. Тукмаков, А.Л. Динамика полидисперсной парокапельной смеси с учётом дробления, коагуляции, испарения капель и конденсации пара / А.Л. Тукмаков, Н.А. Тукмакова // Теплофизика высоких температур, 2019. – Т. 57, №3. – С. 437-445. (Web of Science, Scopus) (50 %).

Патенты РФ на изобретения:

3. Пат. 2636948 Российская Федерация, МПК F04B 43/02, 45/02, 49/00. Устройство подачи, измерения, регулирования количества и расхода жидкости / Тонконог М.И., Тукмакова Н.А., Тонконог В.Г.; 2016146989; опубл. 29.11.2017, Бюл. № 34; приоритет 30.11.2016 (30 %).

4. Пат. 2691863 Российская Федерация, МПК F17C 9/02 Способ регазификации жидкости и установка для регазификации жидкости / Тонконог В. Г., Тукмакова Н. А., Тукмаков А. Л.; 2018123646; опубл. 18.06.2019, Бюл. № 17; приоритет 28.06.2018 (30 %).

Заявка на изобретение:

5. Заявка 2019107326 Российская Федерация. Регазификатор-подогреватель газа / Тонконог В.Г., Тукмаков А.Л., Тукмакова Н.А., Акбиров З.Р.; дата поступления: 14.03.2019 (30 %).

Публикации в научных изданиях, индексируемых базами данных Web of Science, Scopus:

6. Tukmakov, A.L., Tonkonog, V.G., Tukmakova, N.A. Nonlinear Resonance in an Acoustic System with a coagulating gas suspension / Acoustical Physics, September 2017, Volume 63, Issue 5, pp. 566-572 (40 %).

7. Tukmakov, D.A., Tukmakova, N.A. Effect of Dispersed Phase Distribution on the Shock Wave Parameters in a Gas Suspension / Journal of Engineering Physics and Thermophysics, January 2018, Volume 91, Issue 1, pp. 207-211 (50 %).

8. Tukmakova, N.A., Tonkonog, V.G., Tukmakov, A.L. Numerical simulation of the vapour-droplet systems hydrodynamics taking into account particles' coagulation and fragmentation // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, October 2018, Volume 412, Issue 1, 012077 (40 %).

9. Тукмакова, Н.А. Модель динамики полидисперсной парокапельной смеси с газодинамическим дроблением капель / Н.А. Тукмакова, А.Л. Тукмаков // Инженерно-физический журнал, 2019. – Т. 92, № 6. – С. 2511-2519 (50 %).

Публикации в сборниках научных трудов и в материалах конференций:

10. Тукмакова, Н.А. Генерация параметрического резонанса в акустическом резонаторе при изменении дисперсности газовзвеси / Н.А.

Тукмакова, В.Г. Тонконог // Материалы докладов МНТК «Проблемы и перспективы развития двигателестроения» 22-24 июня 2016 г. – Самара: Самарский университет, 2016. – В 2 ч. – Ч.1. – С. 29 – 31 (50 %).

11. Тукмакова, Н.А. Высокоскоростная сепарация фракций полидисперсной газозвеси при обтекании обратного уступа / Н.А. Тукмакова // Проблемы тепломассообмена и гидродинамики в энергомашиностроении: материалы докладов X школы-семинара мол. уч. и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова. Казань, 13 – 15 сентября 2016 г. – Казань: КазНЦ РАН, 2016. – С. 129 – 131 (100 %).

12. Тукмакова, Н. А. Формирование параметрического акустического резонанса в системе коагулирующей газозвеси / Н.А. Тукмакова // Труды X Всеросс. науч. конф. «Нелинейные колебания механических систем» (Н. Новгород, 26-29 сентября 2016 г.) / под ред. Д.В. Баландина, В.И. Ерофеева, И.С. Павлова. – Н. Новгород: Изд. дом «Наш дом», 2016. – С. 722 – 728 (100 %).

13. Тукмаков, Д.А. Численное исследование динамики пылевой плазмы, имеющей полидисперсный состав конденсированной фазы / Тукмаков Д.А., Тукмакова Н.А. // VIII Всеросс. (с междунар. уч.) НТК «Низкотемп. плазма в процессах нанесения функциональных покрытий», г. Казань, 20-23 фев. 2017 г. – Казань: Отечество, 2017. – С. 354-356 (50 %).

14. Тукмакова, Н.А. Обтекание обратного уступа полидисперсной газозвесью / Н.А. Тукмакова, В.Г. Тонконог // Материалы МНТК «Инновационные машиностроит. технологии, оборудование и материалы – 2016» (МНТК «ИМТОМ-2016»). – Казань, 2016. – Ч. 2. – С. 153-156 (50 %).

15. Тукмаков, Д.А. Математическая модель пылевой плазмы, учитывающая полидисперсный состав конденсированной фазы / Д.А. Тукмаков, Н.А. Тукмакова // Материалы 7-й междунар. науч. шк. мол. уч. «Волны и вихри в сложных средах», 30 нояб. – 2 дек. 2016 г. – сб. материалов. – М.: ПРИНТ ПРО, 2016. – С. 161-165 (50 %).

16. Тукмакова, Н.А. Численное моделирование течения газозвеси в трубе Фильда / Н.А. Тукмакова, В.Г. Тонконог // Тез. докл. Юбил. конф. Нац. ком. РАН по тепло- и массообмену «Фундам. и прикл. пробл. тепломассообмена» и XXI Шк.-сем. мол. уч. и спец. под рук. ак. РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках» 22-26 мая 2017 г. С.-Петербург. – М.: Изд. дом МЭИ. – В 2 т. – Т. 1. – С. 275-276 (50 %).

17. Тукмаков, Д.А. Математическая модель течений пылевой плазмы, вызванных самосогласованным электрическим полем / Д.А. Тукмаков, Н.А. Тукмакова // Всеросс. (с междунар. участ.) конф. «Физика низкотемп. плазмы» ФНТП-2017: сб. тезисов. – Казань: Изд-во «Отечество», 2017. – С. 237 (50 %).

18. Тукмакова, Н.А. Математическое моделирование течения газового потока в трубе Фильда / Н.А. Тукмакова, В.Г. Тонконог // Материалы XVIII Всеросс. конф. мол. уч. по матмод.-ию и инф. технологиям. г. Иркутск, Россия,

21–25 авг. 2017 г. – Новосибирск: ИВТ СО РАН, 2017. – С. 58 (50 %).

19. Тукмакова, Н.А. Течение газозвеси в канале из соосных цилиндров / Н.А. Тукмакова, В.Г. Тонконог // XXIII Тупол. чтения (шк. мол. уч.): Междунар. мол. науч. конф., 8-10 нояб. 2017 г.: Материалы конф. Сб. докл.: в 4 т. – Казань: Изд-во АН РТ, 2017. – Т. 1. – 1146 с.: ил. – С. 991 – 998 (50 %).

20. Тукмаков, Д.А. Численное моделирование акустической коагуляции частиц в двухфазном полидисперсном потоке / Д.А. Тукмаков, Н.А. Тукмакова // XXIII Тупол. чтения (шк. мол. уч.): Междунар. мол. науч. конф., 8-10 нояб. 2017 г.: Материалы конф. Сб. докл.: в 4 т. – Казань: Изд-во АН РТ, 2017. – Т. 2. – 984 с.: ил. – С. 562-567 (50 %).

21. Тукмакова, Н.А. Численное моделирование гидродинамики парокапельных систем с учётом коагуляции и дробления частиц / Н.А. Тукмакова, В.Г. Тонконог, А.Л. Тукмаков // Материалы VIII МНТК «Инновац. машиностроительные технологии, оборудование и материалы – 2017» (МНТК «ИМТОМ-2017»), Казань, 2017. – Ч. 2. – С. 253 – 257 (35 %).

22. Тукмакова, Н.А. Динамика полидисперсной парокапельной смеси с учётом механизмов дробления и коагуляции капель / Н.А. Тукмакова, В.Г. Тонконог // Новые технологии, материалы и оборудование российской авиакосмической отрасли: Всеросс. НПК с междунар. участ., 8-10 авг. 2018 г.: материалы конф. – Казань: Изд-во КНИТУ-КАИ, 2018. – Т. 2. – С. 82-88 (50 %).

23. Тукмакова, Н.А. Численное моделирование течения полидисперсной парокапельной смеси в теплообменнике-регазификаторе / Н.А. Тукмакова, В.Г. Тонконог, А.Л. Тукмаков, С.Н. Арсланова // Численное моделирование течения полидисперсной парокапельной смеси в теплообменнике-регазификаторе. тр. 7 РНКТ (22-26 окт. 2018 г., Москва). – М.: Изд. дом МЭИ, 2018. – в 3 т. – Т. 3. – С. 473-477 (25 %).

24. Тукмаков, А.Л. Численная модель динамики полидисперсной парокапельной смеси с испарением, дроблением, коагуляцией капель и конденсацией пара / А.Л. Тукмаков, В.Г. Тонконог, С.Н. Арсланова, Н.А. Тукмакова // Тр. 7 РНКТ (22-26 окт. 2018 г., Москва). – М.: Изд. дом МЭИ, 2018. – в 3 т. – Т. 2. – С. 114-118 (25 %).

25. Тонконог, В.Г. Технологические схемы регазификации криогенных жидкостей / В.Г. Тонконог, А.Л. Тукмаков, Н.А. Тукмакова // Тр. 7 РНКТ (22-26 окт. 2018 г., Москва). – М.: Изд. дом МЭИ, 2018. – в 3 т. – Т. 2. – С. 199-202 (30 %).

26. Тукмакова, Н.А. Численная модель динамики полидисперсной парокапельной смеси с учётом испарения капель и конденсации пара // Тезисы XIX Всеросс. конф. мол. уч. по матмод. и инф. технолог. г. Кемерово, Россия, 29 октября – 2 ноября 2018 г. – Новосибирск: ИВТ СО РАН, 2018. – С. 45-46 (100 %).

27. Тукмаков, А.Л. Разработка малоинерционного регазификатора СПГ на основе численного моделирования термо- и гидродинамики парокапельных

систем / А.Л. Тукмаков, В.Г. Тонконог, Н.А. Тукмакова, П.А. Чибирёв // НТК по ит. совмест. конк. фундам. исслед. РФФИ-РТ: сб. докл. рег. НПК. – Казань: Изд-во «Фэн» АН РТ, 2017. – С. 325-329 (25 %).

28. Тукмакова, Н.А. Движение парокапельной смеси с нагревом и испарением капель крупных фракций / Н.А. Тукмакова, В.Г. Тонконог, А.Л. Тукмаков // Материалы IX МНТК «Инновац. машиностр. технологии, оборудование и материалы – 2018». – Казань, 2018. – Ч. 2. – С. 247-251 (35 %).

29. Арсланова, С.Н. Модель динамики полидисперсной парокапельной смеси с фазовыми переходами, дроблением и коагуляцией капель / С.Н. Арсланова, В.Г. Тонконог, А.Л. Тукмаков, Н.А. Тукмакова // Необр. проц. в прир. и техн.: 10 Всерос. конф.: тр.– М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. – в 3 ч. – Ч. 2. – С. 141-144 (30 %).

30. Тукмаков, А. Л. Разработка конструкции тепловоспринимающих элементов регазификатора-подогревателя сжиженного природного газа на основе анализа структуры полидисперсных парокапельных потоков, формирующейся с учётом механизмов конденсации, испарения, дробления и коагуляции / А. Л. Тукмаков, В. Г. Тонконог, Н. А. Тукмакова // НТК по ит. совмес. конк. фундам. исслед. РФФИ-РТ: сб. докл. рег. НПК. – Казань: Изд-во АН РТ, 2018. – С. 564-568 (30 %).