

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
Уфимский федеральный исследовательский центр Российской академии наук
(УФИЦ РАН)

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова – обособленное структурное
подразделение Федерального государственного бюджетного научного
учреждения Уфимского федерального исследовательского центра
Российской академии наук
(ИМех УФИЦ РАН)

На правах рукописи

Баширова Карина Ильдаровна

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИСПЕРСНЫХ ПОТОКОВ В ВИХРЕВОЙ ТРУБЕ ПРИ
НАЛИЧИИ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ**

01.06.01 – Математика и механика

Механика жидкости, газа и плазмы

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

Уфа – 2025

Работа выполнена в Институте механики им. Р.Р. Мавлютова – обособленном структурном подразделении Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук

Научный руководитель:

Михайленко Константин Иванович,

кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории «Дифференциальные уравнения механики» Института механики им. Р.Р. Мавлютова – обособленного структурного подразделения Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук

Рецензенты:

Урманчиев Саид Федорович,

доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, заведующий лаборатории «Механика многофазных систем» Института механики им. Р.Р. Мавлютова – обособленного структурного подразделения Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук

Мальшев Виктор Леонидович,

кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры «Разработка и эксплуатация газовых и нефтегазоконденсатных месторождений» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет»

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Исследование поведения газов и жидкостей с дисперсными частицами актуально в наши дни. В качестве примера использования можно привести задачи охлаждения жидкостей и газов, очищения природных газов от примесей, очистки воздуха и воды. Практическое применение установок крайне удобно благодаря отсутствию движущихся деталей и устойчивости к поломкам, а также из-за отсутствия необходимости в постоянном обслуживании и ремонте. Помимо этого, в системах на основе вихревого эффекта явным преимуществом является неиспользование хладагентов и теплоносителей. При наличии источника сжатого газа системы на основе вихревого эффекта являются наиболее удобной альтернативой для получения горячего и холодного потоков.

Для практического использования вихревых установок необходимо понимание механизма протекающих в газах и жидкостях процессов, а также динамики дисперсных частиц в канале. Поскольку аналитическое решение задачи отсутствует, решение проблемы осуществляется при помощи вычислительного моделирования и натурных экспериментов. Так, для обеспечения оптимального разделения на горячие и холодные потоки необходимо исследование геометрических размеров установки, начальных и граничных условий для несущей фазы. Для очистки от примесей необходимо изучить поведение дисперсных частиц в трубе, взаимодействие со стенками и попадание в тот или иной поток несущей среды.

В большинстве численных исследований используется газ в качестве несущей среды. Однако возможно применение установки и для очистки жидкостей. Таким образом, важным становится и моделирование процессов с жидкостями с учетом сжимаемости. Наиболее важным является исследование зависимости между начальным давлением в трубе и разницей температур на выходах из вихревой трубы.

Таким образом, несмотря на активное изучение и применение, математическое и вычислительное моделирование поведения потоков жидкости и газа с дисперсными частицами является актуальной научной задачей.

Целью научно - квалификационной работы является теоретический анализ и вычислительное моделирование поведения сферических частиц в вихревой трубе.

Задачи исследования:

1. Разработать модель жидкости или газа с дисперсной средой, описывающую поведение смеси в вихревой трубе.

2. Реализовать модификацию существующего решателя открытого программного пакета OpenFOAM, реализующего описанную модель.

3. Исследовать поведение сферических частиц в трубе с учетом их геометрических размеров и возможного осаждения на стенках трубы.

4. Определить особенности температурного распределения несущей среды.

Научная новизна работы

Записана математическая модель поведения несущей среды с дисперсными частицами в канале вихревой трубы с учетом уравнения энергии и уравнения состояния.

Создана модификация стандартного решателя в программном комплексе OpenFOAM, реализующая предложенную модель.

Показано влияние плотности частиц на скорость осаждения с учетом различных моделей тензора напряжений.

Рассмотрено температурное распределение несущей фазы с учетом использования слабосжимаемых жидкостей.

Практическая значимость

Используемые математические модели и полученные численные результаты углубляют понимание явлений, связанных с динамикой дисперсных частиц в вихревых трубах. Результаты работы могут быть использованы для решения задач очистки газов и жидкостей от примесей.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Развита модель несущей среды с дисперсными частицами в канале вихревой трубы, учитывающая уравнение энергии и уравнения состояния для несущей среды. Полученная модель численно реализована путем модификации существующего решателя пакета OpenFOAM.

2. Оценено влияние параметров частиц на скорость их осаждения в трубе, предложен способ оценки времени нахождения частиц в канале. Получена модель прогнозирования времени пребывания частиц в трубе.

3. Исследовано влияние модели тензора напряжений на вычисляемую скорость осаждения частиц в канале вихревой трубы.

4. Получено температурное распределение в несущей фазе в канале вихревой трубы. Оценена достоверность полученных численных результатов путем сравнения с экспериментальными данными.

Достоверность полученных результатов обусловлена построением физико-математических моделей согласно фундаментальным законам механики многофазных сред, корректной постановкой задач, использованием апробированных численных методов. Реалистичность вычислительных решений подтверждена их согласованием с результатами известных экспериментов и расчетами, полученными при помощи других численных методов.

Апробация работы

Основные результаты научно – квалификационной работы докладывались и обсуждались на XI Международной молодежной научно-практической конференции «Математическое моделирование процессов и систем» (Стерлитамак, 2021); XV Всероссийской молодежной научной конференции «Мавлютовские чтения» (Уфа, 2021); XVI Всероссийской молодежной научной конференции «Мавлютовские чтения» (Уфа, 2022); XIII Всероссийском Съезде по теоретической и прикладной механике (Санкт-Петербург, 2023); Международной летней конференции «Физико-химическая гидродинамика: модели и приложения» (д. Исяново Баймакского района Республики Башкортостан (озеро Талкас), 2023); 14-ой международной конференции – школы молодых ученых «Волны и вихри в сложных средах» (Москва, 2024).

Публикации

По результатам проведенных исследований опубликованы: 1 статья в научном журнале из перечня ВАК РФ; 3 статьи в журналах, входящих в РИНЦ, 5 тезисов по материалам докладов на конференциях.

Личный вклад автора

Построение математической модели, постановка задач, анализ полученных результатов и написание статей осуществлены совместно с научным руководителем. Численная реализация модели, выполнение расчетов, обработка, оформление результатов, подготовка части публикаций проведены автором самостоятельно.

Объем и структура работы

Научно – квалификационная работа объемом 70 страниц состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы из 101 наименований. Работа содержит 13 рисунков и 1 таблицу.

Благодарности

Автор выражает глубокую признательность и благодарность своему научному руководителю канд. физ.-мат. наук Михайленко Константину Ивановичу за постановку задач, полезные советы, постоянное внимание и поддержку при подготовке диссертации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Уточнена модель поведения несущей фазы (газ, жидкость) с дисперсными частицами в канале вихревой трубы, включающая в себя уравнения неразрывности, моментов, состояния и сохранения энергии для несущей фазы, а также функцию распределения частиц для несомой фазы

2. Описанная модель реализована при помощи модификации стандартного солвера пакета OpenFOAM путем добавления уравнения сохранения энергии.

Для учета возможности слабой сжимаемости несущей фазы использовано несколько вариантов уравнения состояния.

3. Проведен анализ поведения частиц в вихревой трубе для серии различных плотностей. Установлена зависимость между плотностью частиц и временем достижения ими противоположного конца трубы с диафрагмой горячего выхода. Предложена аппроксимирующая модель для определения времени начала стратификации частиц из канала. Определено среднее отклонение результатов вычислительных экспериментов от предложенной аппроксимации.

4. Изучены температурные градиенты, полученные при помощи модифицированного решателя *rhoDenseParticleFoam*. Показано существенное влияние начального давления на входах в вихревую трубу на температурный градиент между горячим и холодным выходами. Определено незначительное влияние выбора уравнения состояния на результаты. Полученные температурные градиенты соотнесены с экспериментальными данными. Сравнение показало качественную сопоставимость результатов. Установлено существенное влияние увеличения входного давления на увеличение температурного градиента. Тем не менее, количественное сравнение указало на большую разницу температур в эксперименте.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ НАУЧНО – КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ:

1. **Баширова, К. И.** Две модели динамики лагранжевых частиц в канале вихревой трубы / К.И. Баширова, К.И. Михайленко // Многофазные Системы. 2023. Т. 18. № 3. – С. 186-188. (РИНЦ)

2. **Баширова, К. И.** Метод оценки времени нахождения дисперсных частиц в канале противоточной вихревой трубы / К.И. Баширова, К.И. Михайленко // Вестник Пермского Университета. Физика. 2024. № 3. – С. 60-66. (ВАК)

3. **Баширова, К. И.** Моделирование процесса сепарации дисперсной фазы в вихревой трубе / К.И. Баширова, К.И. Михайленко // Физико-химическая гидродинамика: модели и приложения сборник тезисов. третья международная летняя конференция «физико-химическая гидродинамика: модели и приложения». – д. Исяново Баймакского района Республики Башкортостан (озеро Талкас): БашАльфаПринт, 2023. – С. 18. (РИНЦ)

4. **Баширова, К. И.** Проникновение и отражение ударной волны при взаимодействии с гранулированным слоем / К.И. Баширова, К.И. Михайленко // Материалы XI Международной молодежной научно-практической конференции «Математическое моделирование процессов и систем». Том Часть 1. – С. 73-78. (РИНЦ)

5. **Баширова, К. И.** Исследование искажений проходящей и отраженной ударных волн при взаимодействии со слоем гранулированной среды / К.И. Баширова // Материалы XV Всероссийской молодежной научной конференции «Мавлютовские чтения». В 7-ти томах. XV Всероссийская молодежная научная конференция «Мавлютовские чтения». – Уфа: Уфимский государственный авиационный технический университет, 2021. – С. 316-320. (РИНЦ)

6. **Баширова, К. И.** Математическое моделирование дисперсных потоков в вихревой трубе / К.И. Баширова // Многофазные Системы. 2023. Т. 18. № 2. – С. 80-81. (РИНЦ)

7. **Баширова, К. И.** Моделирование осаждения гранулированной среды в закрученном потоке методом MP-PIC / К.И. Баширова // Материалы XVI Всероссийской молодежной научной конференции «Мавлютовские чтения». В 6-ти томах. XVI Всероссийская молодежная научная конференция «Мавлютовские чтения». – Уфа: Уфимский государственный авиационный технический университет, 2022. Т. 5. – С. 1187-1191. (РИНЦ)

8. **Баширова, К. И.** Моделирование осаждения закрученного потока разреженной гранулированной среды в цилиндрической области методом MP-PIC / К.И. Баширова // Многофазные Системы. 2021. Т. 16. № 3-4. – С. 144-148. (РИНЦ)

9. **Баширова, К. И.** Стратификация дисперсных частиц различных плотностей в канале вихревой трубы / К.И. Баширова // XIII Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике сборник тезисов докладов. в 4-х томах. XIII Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2023. – С. 907-909. (РИНЦ)