ФАНО РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ТЕПЛОФИЗИКИ
им. С.С. КУТАТЕЛАДЗЕ
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИТ СО РАН)
проспект Академика Лаврентьева, 1
г. Новосибирск, 630090
Тел.: (383)330-70-50; 330-84-80; факс 330-84-80
Эл. почта: aleks@itp.nsc.ru
ИНН/КПП 5408100040/540801001
ОКПО 03534009 ОГРН 1025403648786

От _____ № 15314 _____

На _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, академик РАН

_____Алексеенко С.В.

«_09_» _декабря_ 2016 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу

Белозерова Александра Александровича

«Консервативная модель и численные методы для течений многофазных сжимаемых сред», представленную на соискание степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Диссертация посвящена развитию вычислительных моделей многофазных течений. Цель работы состоит в построении общей модели, описывающей течения многофазных сжимаемых сред с произвольным количеством фаз, определяющие дифференциальные уравнения которой образуют гиперболическую систему и записываются в дивергентной форме; в построении на основе общего случая модели для описания течений газожидкостных смесей в трубах; в разработке и верификации вычислительных алгоритмов и программных средств, а также в численном исследовании сформулированных математических моделей.

Моделирование многофазных течений является актуальной и востребованной областью исследований и применяется для описания различных природных и технологических процессов. Несмотря на развитость данного направления и наличие множества подходов к построению моделей многофазных сред, в данной области имеются нерешённые проблемы. Так, широко известные математические модели многофазных сред обычно обладают одним из недостатков: отсутствие гиперболичности системы определяющих дифференциальных

уравнений; наличие уравнений, не приводимых к дивергентной форме. Данные свойства затрудняют применение моделей для решения практических задач с точки зрения корректности постановок начально-краевых задач и разработки численных методов. В диссертации рассматриваются задачи построения математических моделей многофазных течений, лишённых упомянутых недостатков, и демонстрируется применимость подхода для решения важных с практической точки зрения задач, что обосновывает **актуальность исследования**.

Научные результаты и их новизна

1. В работе предложена новая термодинамически согласованная математическая модель течений многофазной сжимаемой среды с произвольным количеством фаз, полученная как обобщение модели двухфазной среды (Romenski et al., J. Sci. Computing, 2010). Сформулированная модель обладает рядом важных математических свойств: определяющие дифференциальные уравнения модели образуют гиперболическую систему, и все уравнения системы имеют дивергентный вид.
2. Построена нестационарная осреднённая одномерная модель трубных течений сжимаемых газожидкостных смесей с двумя давлениями. Уравнения модели представляют собой осреднённые по сечению трубы трёхмерные уравнения модели двухфазного течения.
3. Разработаны и реализованы в виде комплекса программ вычислительные алгоритмы на основе методов Рунге-Кутты-TVD, Рунге-Кутты-WENO для численного решения предложенных уравнений.
4. Проведены численные эксперименты для ряда тестовых задач, результаты которых демонстрируют применимость подхода для моделирования различных режимов течения многофазных смесей. Численно исследовано влияние параметра релаксации на свойства вычислительного алгоритма и на воспроизводимый периодический режим течения газожидкостной смеси в горизонтальных трубах.

Структура и содержание работы

Во **введении** приведён обзор результатов исследований в области моделирования многофазных сред, сформулированы цели и задачи диссертационной работы, выделена научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, сформулированы выносимые на защиту положения диссертации.

Первая глава содержит описание изучаемых в работе математических моделей. На основе полученной ранее модели двухфазной сжимаемой среды (Romenski et al., J. Sci. Computing, 2010) строится обобщение на случай произвольного количества фаз. Проводится анализ, показывающий принадлежность полученной системы уравнений к семейству симметрических гиперболических по Фридрихсу систем. Вводятся замыкающие соотношения для определения внутренней энергии смеси и диссипативных членов как алгебраических функций параметров состояния. Приводится вывод нестационарных осреднённых одномерных уравнений для описания трубных течений, которые получены осреднением по сечению трубы уравнений

трёхмерной модели двухфазной среды. Проводится анализ характеристических свойств модели, необходимый для построения численных алгоритмов.

Во **второй главе** описываются численные алгоритмы, используемые для решения сформулированных уравнений. Для численного решения уравнений общей модели на примере случая четырёхфазной смеси используется схема первого порядка по времени в совокупности с TVD-методом с лимитером типа minmod для вычисления начальных данных задачи о распаде разрыва. Интегрирование по времени уравнений модели трубных течений осуществляется с помощью метода типа Рунге-Кутты третьего порядка. Для вычисления начальных данных задачи Римана используется один из двух методов реконструкции значений в вычислительных ячейках: TVD-реконструкция с лимитером типа minmod или полиномиальная WENO-реконструкция пятого порядка. Для моделирования релаксации давлений реализуется неявная процедура. Граничных условия учитываются стандартным образом с использованием характеристических свойств линеаризованных систем.

Третья глава содержит описание результатов численных экспериментов, а также программной реализации вычислительных алгоритмов. Численное исследование общей модели многофазной сжимаемой среды осуществляется на примере решения задач о распаде разрыва для модели четырёхфазной смеси. Для верификации вычислительной модели трубных течений и сравнения различных численных алгоритмов используется серия тестовых задач с известным аналитическим решением. Кроме того, исследуются задачи моделирования пробковых трубных течений двух видов: пробковых течений, возникающих в трубах сложной геометрии под действием силы тяжести, и т.н. гидродинамических трубных течений, возникающих вследствие неустойчивости границы раздела жидкость-газ в окологоризонтальных трубах. Изучается влияние параметра релаксации на характер течения в горизонтальных трубах.

В **заключении** сформулированы основные результаты работы. **Приложения А** и **Б** содержат технические детали вывода уравнений модели трубных течений и её представления в характеристической форме.

Теоретическая и практическая значимость

Результаты, полученные в диссертационной работе Белозерова А.А., имеют значимость как с точки зрения развития теории моделирования многофазных сред, так и с точки зрения применения для решения прикладных задач. Теоретическая значимость результатов состоит в развитии подхода термодинамически согласованных систем законов сохранения применительно к моделированию многофазных сред. Сформулированные математические модели могут быть использованы для построения более сложных моделей многофазных сред. Кроме того, в работе продемонстрирована возможность адекватного описания пробковых трубных течений с использованием предложенных моделей и методов, что может найти практическое применение в задачах проектирования и оптимизации трубопроводных систем транспортировки.

Результаты диссертационной работы рекомендуются для использования в организациях: Новосибирский государственный университет, Институт вычислительной математики и

математической геофизики СО РАН, Институт вычислительных технологий СО РАН, Институт вычислительной математики РАН, Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, а также в других организациях, где ведутся исследования в области моделирования многофазных течений.

Соответствие специальности

Диссертационная работа Белозерова А.А. соответствует следующим пунктам паспорта специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ:

Пункт 1. Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений.
Пункт 3. Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий.
Пункт 4. Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента.
Пункт 5. Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента.

Достоверность и апробация научных результатов

Использованные автором подходы обеспечивают согласованность полученных математических моделей с законами механики и термодинамики, а также корректность постановок начально-краевых задач во всей области изменения физических параметров. Вычислительные алгоритмы получены на основе широко используемых численных методов, адекватных математическим свойствам решаемых уравнений. Для разработки комплекса программ использованы современные и зарекомендованные средства разработки программного обеспечения. Предложенные математические модели, алгоритмы и программные средства верифицированы на решении классических тестовых задач.

Результаты работы докладывались и обсуждались на нескольких международных конференциях, а также различных научных семинарах институтов СО РАН.

Содержание диссертационной работы опубликовано в научной печати в достаточной мере: имеется 4 работы, опубликованные в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК. Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации.

По материалам диссертации имеются следующие вопросы и замечания:

1. Из приведённого в разделе 1.3.2 описания способа вычисления сил трения неясна область применимости используемой модели. Следует пояснить, для каких режимов течения газожидкостной смеси применимы используемые соотношения, и как это соотносится с рассмотренными в третьей главе численными экспериментами.
2. Из сделанных в главе 3 выводов следует, что параметр релаксации давлений tau играет важную роль в рамках изучаемого подхода, и его величина может влиять на характер течения в горизонтальных трубах как качественно, так и количественно. Однако выводы и предположения относительно влияния tau делаются исключительно на

основе результатов численных экспериментов и не содержат информации об области устойчивости решения. Предпринимались ли попытки аналитического исследования с целью определения зависимости области устойчивости от параметра релаксации?

3. Одной из важных и наиболее трудных задач при моделировании течений многофазных смесей является корректное воспроизведение границы раздела фаз в сепарированной смеси. Например, при исследовании стратифицированного, пузырькового, пробкового и других режимов течения, при которых имеет место разделение фаз. Однако в диссертационной работе данный вопрос не освещён. Следовало бы пояснить возможность описания указанных явлений в рамках развиваемого подхода.
4. В работе не проводится сопоставлений с данными других авторов. Диссертационная работа только бы выиграла от сравнения с данными экспериментов других авторов. Также было хорошо произвести сопоставления, разработанной диссертантом физико-математической модели, с приведенными в литературе подходами для описания процессов переноса в многофазных средах, например, известной модели взаимодействующих и взаимопроникающих континуумов Р.И. Нигматулина. Это позволило бы показать преимущества модели диссертанта более ярко и наглядно.

Сделанные замечания не влияют на общую положительную оценку работы.

Доклад по материалам диссертации Белозерова А.А. был рассмотрен на заседании семинара Отдела термогазодинамики ФГБУН Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН под руководством заведующего отделом, д.т.н., проф. Терехова В.И. 2 декабря 2016 г., протокол № 8.

Заключение

На основании изложенного можно сделать вывод, что диссертация Белозерова А.А. «Консервативная модель и численные методы для течений многофазных сжимаемых сред» является законченной научно-квалификационной работой, соответствующей требованиям ВАК России, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук в соответствии с «Положением о порядке присуждения учёных степеней», а её автор **Белозеров Александр Александрович** заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Сведения о ведущей организации

Наименование: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук Федерального агентства научных организаций
Почтовый адрес: Просп. Академика Лаврентьева, д. 1, Новосибирск, Россия, 630090
Сайт: http://www.itp.nsc.ru/
e-mail: aleks@itp.nsc.ru
Телефон: +7-(383)-330-70-50

Отзыв составили:

И.о. заведующего Лаборатории термогазодинамики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук Федерального агентства научных организаций (ИТ СО РАН), Профессор РАН, д.ф.-м.н. по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника,
630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 1,
тел.: +7 (383) 330-67-36
e-mail: terekhov@itp.nsc.ru

Терехов Владимир Викторович

Ведущий научный сотрудник Лаборатории термо-газодинамики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук Федерального агентства научных организаций (ИТ СО РАН), Профессор РАН, д.ф.-м.н. по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника,
630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 1,
тел.: +7 (383) 316-53-36
e-mail: pakhomov@itp.nsc.ru

Пахомов Максим Александрович

Отдел кадров

С собственноручную подпись Терехова В.В., Пахомова М.А.
УДОСТОВЕРЯЮ
Начальник отдела кадров ИТ СО РАН
С.Ю. Грехнева