

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора технических наук, Ткаченко Игоря Вячеславовича на работу Матвея Викторовича Крапошина: «**Математическое моделирование сжимаемых течений с использованием гибридного метода аппроксимации конвективных потоков**», представленную в качестве диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 - «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Актуальность работы. Диссертационная работа М.В. Крапошина посвящена разработке и реализации гибридного метода, позволяющего исследовать как дозвуковые, так и около- и сверхзвуковые течения жидкости в рамках единого подхода. Для моделирования дозвуковых течений на сегодняшний день преимущественно используются методы переменных направлений (методы расщепления по физическим процессам), в то время как для анализа сжимаемых потоков – характеристические подходы. Применение первой группы методов к решению сжимаемых задач приводит к появлению немонотонного решения, в то время как использование характеристических методов для моделирования несжимаемых течений приводит к серьёзным ограничениям на шаг интегрирования по времени. Однако, существует класс задач, в которых имеют место как дозвуковые, так и сверхзвуковые течения, например, динамика плазмы, течения с пульсирующими источниками и т.д. Поэтому разработка универсальных методов, алгоритмов и программ является востребованной и актуальной.

Цели работы являются обоснованными. М.В. Крапошин их полностью достиг: разработаны гибридный метод, алгоритмы и программные реализации в виде самостоятельных приложений на основе открытой платформы OpenFOAM, позволяющие решать задачи гидро-, аэро- и газодинамики сжимаемых течений в широком диапазоне чисел Маха.

Новизна исследований. Научная новизна работы, безусловно, обоснована. Автором были разработаны новый численный метод моделирования сжимаемых течений жидкости в широком диапазоне чисел Маха, представ-

ляющей собой комбинацию метода расщепления и метода гоуновского типа (схема Курганова - Тадмора), модели и алгоритмы решения задачи о движении двухфазной среды с учётом её сжимаемости и нелинейного уравнения состояния (модель водокольцевого насоса с учетом сжимаемости), комплекс программ (решатели для OpenFOAM).

Практическая ценность работы. Получены следующие, практически значимые результаты:

1. Разработаны численный метод и алгоритмы, позволяющие решать широкий круг прикладных задач, такие как расчет течений однокомпонентных, многокомпонентных и двухфазных сжимаемых сред.

2. Созданы программные реализации в виде самостоятельных приложений на основе открытой платформы OpenFOAM, расширяющие функционал последней и предоставляющие собой новый инженерный инструментарий.

Методология и методы исследования основываются на аппроксимации и численном анализе математических моделей движения сплошной жидкой и газообразных сред, представляющих собой дифференциальные уравнения в частных производных, а именно, уравнения Навье-Стокса, неразрывности и баланса энергии.

Достоверность результатов. Теоретические исследования соискателя и анализ результатов работы базируется на фундаментальных физических закономерностях, достоверных и общепринятых гипотезах, применении строгих математических методов численного интегрирования систем дифференциальных уравнений, на сравнении с экспериментальными данными и результатами расчетов других авторов.

Апробация. Результаты диссертационной работы получили апробацию в период с 2014-2016 гг. в докладах на Международных и Всероссийских научных и научно-технических конференциях. Основные результаты диссертации изложены в 5 научных работах соискателя, 4 из которых опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК РФ или индексируемых Scopus.

Структура работы. Диссертационная работа состоит из оглавления, введения, трех глав, заключения, списка литературы из 94 наименований (всего 182 стр.).

Введение содержит обоснование актуальности, научной и практической значимости, структуру работы и выносимых на защиту положений.

В первой главе приводятся обобщенные уравнения гидро-, аэро- и газодинамики, описывающих движение сплошных сред, и производится математическая постановка задач о течении сжимаемого теплопроводного газа, несжимаемой неизотермической среды и гомогенной смеси жидкости и газов.

В этой же главе описываются основные методы аппроксимации дифференциальных уравнений в частных производных и делается вывод о целесообразности использования для решения поставленной задачи метода контрольного объема (МКО). Также приводятся схемы аппроксимации производных по времени, источниковых слагаемых, диффузионных членов и конвективных потоков.

Задачи гидро-, аэро- и газодинамики представляют собой системы уравнений, включающих уравнения переноса массы, импульса, энергии и уравнение состояния. Выбор способа их совместного решения влияет на характеристики численного решения. В работе рассматриваются два типа методов: явные явновские (характеристические) методы и полунявные методы расщепления по физическим процессам. Анализируются их достоинства и недостатки для моделирования сжимаемых и несжимаемых течений и производится сопоставление между собой.

Во второй главе содержится описание предлагаемого автором гибридного численного метода и его программной реализации. Суть метода состоит в поиске компромисса между явными явновскими методами, которые теряют устойчивость либо требуют малого шага интегрирования по времени при малых числах Маха, и методами расщепления (PISO/SIMPLE), которые могут приводить к появлению нефизических осцилляций численного реше-

ния, вплоть до потери устойчивости схемы, при высоких числах Маха. В разработанном гибридном методе вводится функция смешивания, которая в случае несжимаемого режима течения переключается от неосциллирующей схемы Курганова – Тадмора (Курганова – Ноэль - Петрова) для конвективных слагаемых в уравнениях переноса к стандартному аппроксимирующему выражению, используемому в алгоритмах типа PISO/SIMPLE. Согласно этой схеме, функция-переключатель в зависимости от локального числа Маха и локального акустического критерия Куранта принимает значение равное единице в случае сжимаемой среды и ноль в случае несжимаемой.

В рамках нового гибридного подхода предлагается модифицированный алгоритм PISO/SIMPLE, который учитывает сжимаемость среды в уравнении неразрывности. Разработанный метод является достаточно универсальным и позволяет решать задачи о течении многокомпонентных и многофазных сред.

Третья глава посвящена верификации гибридной схемы. Были протестированы четыре группы задач: моделирование сжимаемых и несжимаемых течений, распространение акустических колебаний и промышленные приложения.

В рамках первой группы были решены задачи о распространении волн в прямом канале (задача Сода), распаде разрыва при большом перепаде давления, об обтекании плоского клина, обратного и прямого уступа сверхзвуковым потоком и о течении в сверхзвуковом сопле при наличии прямого скачка уплотнения в закритической части. Результаты расчетов хорошо согласуются с известными аналитическими решениями, экспериментальными данными и расчетами других авторов и показывают работоспособность предложенного метода. В случае сжимаемых течений новый гибридный подход обладает свойствами, близкими к явному методу Курганова – Тадмора при малых значениях характеристического числа Куранта и превосходящим по своим качествам стандартный PISO алгоритм, а также схему Курганова – Тадмора при высоких значениях характеристического числа Куранта.

Для исследования несжимаемых течений были решены задачи об обтекании цилиндра ламинарным и турбулентным потоками жидкости и о смешении струй газов. Расчеты показывают, что предлагаемый метод дает решения близкие к несжимаемому приближению, хотя в случае турбулентного течения наблюдаются некоторые отличия от экспериментальных данных.

Распространение акустических волн было изучено для случаев пульсирующей и колеблющейся сфер. Можно утверждать, что результаты численного моделирования хорошо согласуются с известными аналитическими решениями.

Наибольший интерес представляет четвертая группа тестовых задач: моделирование истечения струи газа из сверхзвукового сопла, расчет истечения квазиравновесной расширяющейся струи плазмы в область низкого давления, моделирование течения в высокоскоростном компрессоре, моделирование систем генерации газа в подушке безопасности и моделирование гидродинамики водокольцевого насоса. Был проведен как качественный, так и количественный анализ численных решений, который показывает в целом удовлетворительное и хорошее согласование с экспериментальными данными и результатами численного моделирования других авторов. В частности, были выполнены оценки распределения давления на поверхности двумерного сопла, при истечении из него сверхзвукового газа, распределение поля скорости и температуры на оси канала, по которому движется горячая плазма аргона, анализ мод течений в модели компрессора, показывающий наличие характерных частот, соответствующих оборотной, лопаточной импеллера и лопаточной диффузора частотам.

В этой же главе приводятся результаты сеточной сходимости и оценки порядка аппроксимации в зависимости от решаемой задачи, влияние функции-переключателя на численное решение, влияние параметров схемы на монотонность получаемого решения при больших градиентах давления и масштабируемость реализации гибридного метода.

Замечания по работе. Можно сделать следующие замечания:

1. Анализ значений коэффициента лобового сопротивления цилиндра при турбулентном режиме его обтекания показывает, что в случае использования предлагаемой гибридной схемы его значение занижено по сравнению с экспериментальными данными на 12%, в то время как стандартные схемы PISO занижают на 5,7%. Чем вызвано это увеличение расхождений?

2. Количественная оценка достоверности метода в основном дается для двумерных задач. В трехмерных приложениях в большинстве случаев приводятся качественные оценки его работоспособности.

3. К сожалению, отсутствует информация о сеточном разрешении для ряда промышленных задач, представляющая собой практический интерес.

Выводы. Автореферат соответствует диссертации и достаточно полно отражает ее содержание.

Несмотря на сделанные замечания, представленная диссертационная работа является законченным научно-квалификационным трудом, выполненным на высоком научном уровне

Диссертационная работа Матвея Викторовича Крапошина удовлетворяет всем требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 - «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Официальный оппонент
Заведующий кафедрой гидроаэромеханики
и морской акустики, Санкт-Петербургского
государственного морского технического
университета, д.т.н., профессор РАН

Ткаченко И.В.

190121 Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, д. 3,

Тел.: +7 812 494-09-30


e-mail: igor.v.tkachenko@mail.ru

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет» (СПбГМТУ)

Подпись Ткаченко И.В.

Зем Начальник отдела кадров А.И. Бураков

20 17 г.



«22»

февраля 2017 г.