

«УТВЕРЖДАЮ»

Первый проректор –

Проректор по научной работе

МФТУ им. Н.Э. Баумана

В.Н. Зимин

«20» февраля 2017 г.



О Т З Ы В

ведущей организации

на диссертационную работу КРАПОШИНА Матвея Викторовича «Математическое моделирование сжимаемых течений с использованием гибридного метода аппроксимации конвективных потоков», представленную диссертационному совету Д 002.024.03 Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Актуальность темы диссертации

Методы математического моделирования в механике жидкости и газа широко используются для решения широкого класса гидрогазодинамических задач и задач инженерного анализа конструкций, взаимодействующих с потоком

среды, в научно-исследовательских и проектно-конструкторских организациях. На сегодня известен ряд пакетов прикладных программ, в которых реализованы весьма надежные и хорошо зарекомендовавшие себя методы моделирования течений и решения сопряженных задач тепломасообмена. Тем не менее, большинство известных методов расчета течений имеет ограниченную область применимости – в частности, они, как правило применимы к расчету либо дозвуковых, либо сверхзвуковых течений. Для расчета других режимов течений данные методы оказываются либо неприменимыми принципиально, либо исключительно неэффективными, поскольку требуют, к примеру, чрезвычайного измельчения шага расчета по времени, либо приводят к появлению «нефизичных» осцилляций численного решения. В то же время в технических приложениях в ряде случаев возникает необходимость расчета таких течений, которые характеризуются широким диапазоном чисел Маха – в части расчетной области течение может быть сверх- или околосзвуковым, тогда как в другой части – глубоко дозвуковым. Основной проблемой здесь является корректная аппроксимация конвективных потоков, которая в случае до- и сверхзвуковых течений выполняется по-разному в силу особенностей соответствующих физических процессов и описывающих их математических моделей. Для решения упомянутых задач предпочтительно иметь возможность использования «универсального» численного метода, который, очевидно, должен иметь «гибридную» природу, сочетая в себе определенные черты методов различных классов. Это, безусловно, расширит возможности численного моделирования применительно к широкому диапазону приложений, как в научно-теоретической сфере, так и в практике конструирования и моделирования функционирования технических систем, взаимодействующих со сжимаемой средой. Отдельной проблемой является корректное моделирование многофазных сред.

В то же время вопросы разработки новых численных методов моделирования течений сжимаемых сред не вполне корректно рассматривать в отрыве от их программной реализации. Следует иметь в виду, во-первых, возможность адаптации разрабатываемых моделей, алгоритмов и программ для решения смежных задач, а во-вторых – возможность использования разработанных программ для проведения расчетов на вычислительных машинах различного класса – от персональных ЭВМ, до вычислительных кластеров, содержащих сотни-тысячи вычислительных ядер. Лишь эффективная работа вычислительных алгоритмов при проведении расчетов на подобных многопроцессорных машинах может позволить решать актуальные на сегодня промышленные задачи. Кроме того, для учета многих эффектов, к примеру, моделирования турбулентности, химических реакций и т.п. целесообразно иметь возможность использования уже имеющихся моделей и алгоритмов.

Указанным требованиям можно удовлетворить в наиболее полной мере, если реализовывать разрабатываемые модели и алгоритмы в виде библиотек (модулей) для пакетов с открытым исходным кодом, среди которых признанным лидером на сегодня является пакет OpenFOAM. Модульная структура пакета позволяет «встраивать» в него вновь разрабатываемые модели и методы расчета с сохранением всего имеющегося функционала, а реализованные в нем алгоритмы распараллеливания вычислений позволяют с высокой эффективностью выполнять расчеты на многопроцессорных кластерах.

В свете вышесказанного не вызывает сомнения актуальность темы диссертационной работы М.В. Крапошина, связанной с разработкой, реализацией в пакете OpenFOAM и использованием гибридного метода аппроксимации конвективных потоков для расчета течений сжимаемых сред.

Научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов, полученных в диссертации

В качестве основного метода исследования было выбрано математическое моделирование, позволившие корректно описать эффективные свойства сложных многофазных сред – в частности, установить существенно нелинейный характер определяющих соотношений для смеси жидкость-газ. Использование методологии интегро-интерполяционного метода (называемого также методом конечных объемов) дало возможность на основе фундаментальных законов сохранения физических величин разработать гибридный численный метод расчета конвективных потоков, который, в свою очередь, положен в основу разработанного метода расчета течений сжимаемых сред. Программная реализация метода выполнена на языке C++ с использованием системы классов открытой свободно распространяемой библиотеки OpenFOAM, что позволяет использовать его для решения широкого класса актуальных задач на многопроцессорных кластерах, а при необходимости – также и модифицировать код, расширяя возможности метода.

Все вышеперечисленное, без сомнения, представляет научную новизну и имеет теоретическую и практическую ценность.

Выносимые на защиту положения, состоящие в разработке гибридного метода аппроксимации конвективных слагаемых в уравнениях газовой динамики в широком диапазоне чисел Маха, создании на его основе метода численного решения уравнений Навье – Стокса, его реализации в виде модуля библиотеки OpenFOAM с возможностью использования всего функционала библиотеки и результатов применения созданного инструментария к решению как тестовых, так и промышленных задач, представляются полностью обоснованными.

Достоверность и обоснованность результатов исследований

Достоверность и обоснованность полученных результатов обеспечиваются математической строгостью, сопоставлением с имеющимися аналитическими решениями, численными и экспериментальными данными и не вызывают сомнений.

Работа прошла широкую апробацию на международных, всероссийских конференциях и семинарах.

Личное участие соискателя в получении результатов, изложенных в диссертации

Основные результаты диссертации содержатся в 5 печатных работах, 4 из которых опубликованы в журналах из перечня ВАК или индексируемых Scopus, что соответствует требованиям ВАК РФ. Личный вклад автора не вызывает сомнения: обзор методов численного моделирования сжимаемых течений, разработка и реализация гибридного метода и его тестирование на широком круге задач выполнены Крапошиным М.В. самостоятельно. Из работ, выполненных совместно с другими авторами, в диссертацию включен лишь тот материал, который непосредственно принадлежит соискателю; заимствованный материал из научных публикаций других авторов в диссертации обозначен ссылками.

Рекомендации по продолжению работ, использованию полученных результатов в практике научных исследований и учебном процессе

Диссертацию М.В. Крапошина можно характеризовать как завершённый комплекс обширных научных исследований, проведенным соискателем в течение нескольких лет. Полученные результаты позволяют значительно упростить моделирование течений в широком диапазоне чисел Маха, и поэтому с целью

расширения области применения развитого в диссертации подхода можно рекомендовать продолжение этих исследований по следующим направлениям:

- разработка модификаций гибридного метода для более широкого класса уравнений состояния газов, таких как covolume gas и Ван-дер-Ваальсовский газ, а также более сложных, используемых для описания реальных сред;
- комплексное исследование диссипативности разработанной гибридной схемы аппроксимации конвективных слагаемых и поиск возможностей ее снижения;
- теоретическое обоснование выбора функции-переключателя, используемой в алгоритме гибридного метода для переключения («смешивания») схем расщепления по физическим процессам и схем Годуновского типа.

Разработанные методы могут быть использованы (и уже используются) в научно-исследовательских и конструкторских подразделениях организаций, занимающихся проектированием и эксплуатацией технических систем, для правильного описания функционирования которых требуется корректное моделирование сложных течений жидкостей и газов, а также многофазных сред в широком диапазоне чисел Маха.

В учебном процессе университетов и высших технических учебных заведений результаты диссертации могут быть использованы при разработке специальных дисциплин для студентов и аспирантов физико-математических и машиностроительных специальностей, занимающихся вопросами разработки математических моделей и методов численного анализа в области механики жидкости и газа.

Форма изложения и качество оформления диссертации

Тема и содержание диссертации соответствуют специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Текст диссертации написан в целом грамотно, четким и ясным языком, весьма лаконично, но вместе с тем с достаточной степенью подробности, необходимой для глубокого понимания читателем сути проведенных исследований и значимости полученных результатов. Стиль изложения материала характерен для научных публикаций. Иллюстративный материал, содержательная часть и список цитируемой литературы диссертации выполнены в соответствии с критериями, предъявляемыми Высшей аттестационной комиссией при Министерстве образования и науки РФ к оформлению диссертационных работ на соискание ученых степеней кандидата наук. Автореферат правильно и в достаточно полной мере отражает основное содержание диссертации, достоверность и обоснованность научных результатов и выводов, практическую значимость и личное участие соискателя в получении результатов, изложенных в диссертации.

Работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка обозначений и списка цитируемой литературы. Объем диссертации составляет 182 страницы, содержит 90 рисунков и 17 таблиц. Список литературы содержит 94 позиции.

Введение содержит краткую характеристику работы, включая обоснование актуальности, формулировку цели, задач и методов исследования, обоснование достоверности получаемых результатов, сведения об основных положениях, выносимых на защиту, научно-теоретической и практической значимости работы.

В первой главе содержится постановка задач расчета сжимаемых и несжимаемых течений одно- и многофазных сред. Приведены базовые соотношения механики жидкостей и газов, обсуждаются вопросы их аппроксимации при про-

ведении численного моделирования, имея в виду проведение расчетов на произвольных неструктурированных многогранных сетках. В качестве базового метода аппроксимации уравнений выбран метод конечного объема. Приведены сведения о наиболее часто используемых схемах аппроксимации различных слагаемых с акцентированием внимания на конвективных слагаемых – применительно к ним описаны методы расщепления и годуновские методы, проанализированы их преимущества и недостатки при решении задач различных классов.

Вторая глава работы посвящена разработке гибридной схемы аппроксимации конвективных слагаемых. Сделан обоснованный выбор базовых схем, применимых для расчета течений со сверх- и дозвуковыми скоростями, предложена методика их «смешивания». Основной целью создания гибридного метода является получение разностной схемы, позволяющей вести расчет со сравнительно крупным шагом по времени при обеспечении требований к устойчивости и (в определенной мере) монотонности численного решения. Приведены необходимые расчетные формулы для вычисления конвективных потоков и возможные виды функции-переключателя. Предложена новая схема связывания полей скорости, давления и плотности, доказавшая свою эффективность. Выполнено обобщение разработанного гибридного метода на случай моделирования течений гомогенных смесей. Проведенный анализ математической модели смеси показал существенно немонотонный характер зависимости скорости звука в зависимости от объемной концентрации фаз – показано, что скорость звука в воздушно-водяной смеси при примерно равной объемной концентрации фаз составляет около 20 м/с, что примерно в 15 раз меньше скорости звука в воздухе и в 70-80 раз меньше скорости звука в воде при тех же внешних условиях.

Данный результат представляет самостоятельный и особый интерес. Он служит обоснованием проявления в подобных средах эффектов, характерных для сверхзвуковых течений, даже при сравнительно малых скоростях, поскольку

диапазон локальных чисел Маха оказывается чрезвычайно широким. Примером технической системы, в которой проявляется подобный эффект, является водокольцевой насос, для правильного моделирования воздушно-водяной смеси в котором автором с успехом применен разработанный метод. Отметим, что моделирование подобных режимов другими методами в настоящее время представляется затруднительным.

Вторая часть второй главы диссертации посвящена программной реализации гибридного метода в виде модуля для библиотеки OpenFOAM с возможностью использования существующего функционала библиотеки, в частности, расчета течений в областях подвижными границами на изменяющихся сетках, расчета стационарных режимов течений, моделирования турбулентности.

Третья, наиболее обширная глава диссертации, содержит результаты тестирования и верификации разработанного метода при решении задач различных классов. Рассмотрены верификационные задачи расчета сжимаемых и несжимаемых течений, задачи моделирования распространения акустических волн, а также ряд представляющих практический интерес промышленных задач. Автором выполнен впечатляющий объем вычислительной работы, результаты которой в обобщенном и проанализированном виде представлены в тексте диссертации. Проведено обстоятельное сравнение с результатами экспериментов, показано хорошее качественное и количественное согласие результатов.

В рассмотренных случаях продемонстрирована высокая эффективность разработанного гибридного метода, полученные с его помощью результаты как правило не уступают, а во многих случаях превосходят по качеству и точности воспроизведения решения результаты расчета с помощью других методов там, где такие расчеты возможны.

В конце третьей главы проведено исследование сеточной сходимости и масштабируемости алгоритма. Показано, что на подробных сетках,

содержащих порядка миллиона и более ячеек наблюдается близкое к линейному, а в ряде случаев и сверхлинейное ускорение при использовании десятков вычислительных ядер. Это подтверждает высокую эффективность разработанного метода и его пригодность для решения актуальных промышленных задач.

Наряду с положительной оценкой научных и прикладных достижений по рассматриваемой диссертационной работе следует сделать и ряд замечаний.

1. Результаты расчета обтекания цилиндра гибридным методом при малых дозвуковых скоростях более чем на 10 % отличаются от результатов эксперимента даже при использовании весьма подробных сеток (на примере средней силы лобового сопротивления, действующей на круговой цилиндр). Другие методы обеспечивают лучшее согласие результатов. Кроме того, не приведены результаты расчета других характеристик в этой же задаче – амплитуды пульсаций подъемной силы, частоты схода вихрей (число Струхала), что не позволяет в полной мере утверждать о высоком качестве моделирования несжимаемых течений разработанным гибридным методом.
2. Говоря о новом способе аппроксимации конвективных слагаемых в определяющих соотношениях, возникает вопрос о необходимости пересмотра подходов к аппроксимации аналогичных членов в используемых моделях турбулентности. Насколько это актуально и может ли привести к повышению качества численного решения?
3. В работе присутствует некоторая небрежность оформления, в ряде случаев – неаккуратность математических формулировок.

Несмотря на сделанные замечания, представленная диссертационная работа является законченным научно-квалификационным трудом, выполненным соискателем самостоятельно на высоком научном и методическом уровне.

Заключение

Диссертационная работа Матвея Викторовича Крапошина на тему: «Математическое моделирование сжимаемых течений с использованием гибридного метода аппроксимации конвективных потоков» является самостоятельной завершенной научно-квалификационной работой, содержащей новые научные результаты, полученные с применением методов математического моделирования, численных методов механики жидкости и газа и современных технологий программирования, удовлетворяет критериям пункта 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям», а ее автор, безусловно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Отзыв на диссертацию и автореферат обсужден на расширенном заседании кафедры «Прикладная математика» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», протокол № 5 от 06.02.2017 г.

Заведующий кафедрой

«Прикладная математика»

д.т.н. профессор

17.02.2017 г.

Георгий Николаевич Кувыркин

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана».

105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д.5, стр. 1

Тел. +7 (499) 263-63-26, fn2@bmstu.ru, www.bmstu.ru,