

Отзыв официального оппонента Бочарова Алексея Николаевича на диссертационную работу Борисова Виталия Евгеньевича «Разработка параллельного неявного метода решения задач динамики вязкого сжимаемого газа», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Актуальность темы диссертации

В последние десятилетия наблюдается все возрастающий интерес к разработке новых возможностей управления перспективными летательными аппаратами или, в более широком смысле – управления высокоскоростными газодинамическими течениями. Одним из подходов является энергозатратное в поток, связанное с потенциальным воздействием на локальные и интегральные характеристики обтекания тел: модификацию скачков уплотнения, управление пограничными слоями и отрывом потока, воздействие на вихревые структуры и т.д. Поскольку в большинстве случаев экспериментальные условия существенно отличаются от условий реального полета, численное моделирование становится, по существу, основным инструментом для анализа таких течений.

Сложность рассматриваемых задач приводит к необходимости создания соответствующих математических моделей и вычислительных алгоритмов для их решения. В частности, таких численных методов, которые позволили бы разрешать разномасштабные особенности течений, при этом обеспечивая приемлемое время полного расчета. Разработке одного из таких методов и посвящена работа Борисова В.Е. Таким образом, актуальность темы диссертационной работы не вызывает сомнений.

Научная новизна полученных результатов

В диссертации получены следующие результаты, отражающие научную новизну работы:

1. Разработаны алгоритмы неявной схемы на основе методов LU-SGS и BiCGStab для решения нестационарных осреднённых по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса URANS совместно с дивергентной формой уравнения однопараметрической модели турбулентности Спаларта–Аллмараса для сжимаемых течений с модификацией Эдвардса и возможностью подвода энергии в поток.

2. Разработан и реализован параллельный программный комплекс для расчёта трёхмерных турбулентных течений вязкого сжимаемого газа, в том числе течений с энергосложением в поток. Программный комплекс предназначен для работы на высокопроизводительных вычислительных системах, в процессе расчётов подтверждены его эффективность и масштабируемость.
3. Проведено моделирование стационарных и нестационарных течений в псевдоскачке в тракте воздухозаборника прямого воздушного реактивного двигателя. Показано существенное влияние толщины пограничного слоя на положение и характер ударно-волновой структуры в псевдоскачке, а также влияние инициируемого энергосложением противодавления на возможность выхода на нерасчётные режимы работы воздухозаборника.

Степень обоснованности и достоверности

В основе математической модели, используемой в диссертационной работе, лежат нестационарные осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье–Стокса совместно с моделью турбулентности Спаларта–Алмараса, которые являются достаточно изученными и широко применяются для задач данного класса. Валидация разработанного программного комплекса проведена в серии вычислительных экспериментов. Достоверность и обоснованность результатов обеспечена строгостью используемого математического аппарата и приведенными результатами расчетов. Результаты исследования представлены в рецензируемых изданиях, в том числе входящих в Перечень ВАК РФ, а также апробированы на нескольких международных конференциях.

Содержание работы

Диссертационная работа содержит Введение, три главы, Заключение и Приложение. Она представлена на 93 страницах, список литературы содержит 99 позиций.

Во введении дан краткий обзор работ по тематике диссертации. Обосновывается актуальность, формулируются цели работы, положения, выносимые на защиту, и основные новые научные результаты.

Глава 1 посвящена разработке математической модели, используемой в работе для моделирования трехмерных турбулентных течений вязкого сжимаемого газа с возможностью энергосложения в поток,

а именно – системы нестационарных осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса с источниковым членом в уравнении энергии и однопараметрической модели турбулентности Спаларта–Аллмараса для сжимаемых течений в модификации Эдвардса. Далее следует описание используемых и разработанных численных методов. Аппроксимация уравнений модели по пространству проводится методом конечного объема с использованием схемы высокого порядка точности WENO3. Расчет невязких газодинамических потоков осуществляется с помощью обобщенной схемы Годунова, которая подробно описывается в Приложении. Приводится описание явной и неявной дискретизации по временной переменной. Алгоритмы неявной схемы основаны на использовании метода Ньютона и алгоритмов LU-SGS и BiCGStab, детально представленных в соответствующих подразделах. В конце главы записан общий алгоритм решения задачи с помощью разработанной неявной схемы на одном временном шаге.

В **Главе 2** представлен разработанный программный комплекс, в основу которого положены математическая модель и алгоритмы из главы 1. Отдельный раздел посвящен особенностям программной реализации параллельных алгоритмов. Программный комплекс валидирован на задачах об обтекании крыла ONERA M6 с симметричным профилем и задаче о переходе между регулярным и маховским отражением ударных волн в области двойных решений. Обе задачи хоть и использованы в качестве тестовых, однако и сами по себе представляют отдельный научный интерес. В конце главы представлены результаты численного исследования эффективности параллельной реализации разработанной методики.

Глава 3 описывает применение реализованного программного комплекса для расчета различных режимов работы воздухозаборника прямоточного воздушно-реактивного двигателя. Получены несколько вариантов течений, для которых исследовано влияние параметров потока на входе и выходе из воздухозаборника на течение в нем. Для моделирования этих параметров были разработаны соответствующие вспомогательные модели. Одна из них предназначена для описания характеристик пограничного слоя заданной толщины, вторая представляет собой физически обоснованную модель энергоисточника, моделирующего работу камеры сгорания.

В **заключении** приведены основные результаты диссертационной работы.

Автореферат отвечает основному содержанию диссертации, дает правильное представление о полученных в процессе выполнения работы результатах.

Полученные в диссертации результаты, разработанные алгоритмы и программный комплекс могут быть использованы в организациях, занимающихся вопросами аэродинамики и разработки летательных аппаратов: ЦАГИ им. проф. Н.Е. Жуковского, ЦНИИМаш, ОАО МИТ, ОАО ГРЦ им. Академика В.П. Макеева и др.

Замечания по диссертационной работе

1. В работе подробно описан метод повышения порядка аппроксимации WENO3. Но, к сожалению, не представлено доказательств того, что используется действительно схема высокого порядка.
2. Одним из элементов разработанной математической модели является модель турбулентности. Было бы логичным подробнее остановиться на аппроксимации уравнения для турбулентной вязкости, как это сделано для газодинамических переменных.
3. В задачах Главы 2 не очень «видна» роль турбулентности: модель используется, а в чем это проявляется в течениях с большими числами Рейнольдса, не очень видно. Было бы интересным, на мой взгляд, сравнить полученные результаты с результатами, полученными, например, с ламинарной моделью течения.
4. Результаты всех рассмотренных в работе задач сравниваются либо с имеющимися численными результатами, либо – с экспериментальными. Но для полноты характеристики вычислительной модели было бы, тем не менее, неплохо убедиться, что все полученные результаты являются сеточно-независимыми.
5. Отмечая свой личный вклад, автор «скромно» умалчивает о своем вкладе в разработку вычислительного алгоритма и программного комплекса, что является одной из главных целей работы.

Тем не менее, отмеченные замечания не умаляют всех достоинств работы. В диссертации затронуты важные и актуальные проблемы. Можно сказать, что автором разработан новый и эффективный инструмент для получения новых знаний во многих областях аэродинамики.

Работа выполнена на высоком научном уровне с использованием современных вычислительных методов и с использованием современных

компьютерных технологий. Автореферат достаточно полно отражает основные результаты работы. Результаты диссертации опубликованы в четырех журналах из списка ВАК и сборниках трудов научно-технических конференций по профилю работы.

Соответствие содержания диссертации специальности

Диссертация Борисова Виталия Евгеньевича является самостоятельной завершенной научно-исследовательской работой. По актуальности, научному уровню, теоретической и практической значимости она полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, выполненным по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ; соответствует критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней (п.9), утвержденным Правительством Российской Федерации от 24 сентября 2013 года №842, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Официальный оппонент

заведующий отделением магнитоплазменной аэродинамики и МГД преобразования энергии ОИВТ РАН, доктор физико-математических наук (защита докторской диссертации в 2011г. по специальности 01.02.05)
125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр. 2,
тел. +7(495) 484-26-38, e-mail: bocharov@ihed.ras.ru

Бочаров Алексей Николаевич
Дата: 27 декабря 2016г.

Подпись Бочарова Алексея Николаевича заверяю
Ученый секретарь Объединенного института высоких температур РАН

Д.ф.-м.н.



Амиров Р.Х.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«Объединенный институт высоких температур РАН» (ОИВТ РАН)
125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр. 2.
+7 (495) 485-90-09, amirovravil@yandex.ru