

Отзыв официального оппонента
доктора физико-математических наук
Колдобы Александра Васильевича
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

Для численного моделирования задач гидрогазодинамики на параллельных вычислительных системах широко применяются явные разностные схемы. За счет своей логической простоты они обладают высокой степенью параллелизма, однако имеют жесткое ограничение на шаг интегрирования по времени. В ряде современных задач, таких как расчет трехмерных турбулентных течений при больших числах Рейнольдса, для адекватного разрешения особенностей решения необходимо использовать расчетные сетки, содержащие миллионы ячеек. Задачи, рассматриваемые в диссертации, осложнены учетом диссипативных процессов, обусловленных турбулентными пульсациями скорости вещества и других газодинамических величин. Для описания турбулентности автор использует полуэмпирическую модель Спаларта–Аллмараса и в итоге приходит к необходимости разработки вычислительных алгоритмов для численного интегрирования уравнений типа Навье-Стокса с коэффициентами переноса, определяемыми локальными характеристиками течения. Использование явных разностных схем в этом случае приводит к тому, что временной шаг интегрирования, который для явной схемы пропорционален квадрату минимального сеточного шага по пространству, может быть существенно ограничен. Таким образом, общее время работы программы может занимать дни или недели даже в случае проведения расчетов на параллельных вычислительных системах. Для производственных расчетов, когда имеется необходимость «просмотра» многих вариантов геометрии изделия, параметров внешнего воздействия на него и моделей протекающих при его эксплуатации процессов, такое положение дел не является приемлемым. Это обстоятельство является причиной интереса к неявным вычислительным алгоритмам, в данном случае применительно к уравнениям типа Навье-Стокса.

Неявные разностные схемы не обладают формальными ограничениями на временной шаг. Однако построение неявной разностной схемы не сводится к аппроксимации пространственных производных на неявном временном слое. При использовании неявной схемы возникает необходимость решения системы нелинейных уравнений, для которых так или иначе приходится решать систему линейных алгебраических уравнений, связывающих все расчетные ячейки области. Эти проблемы могут решаться различными способами, важно чтобы

разработанный вычислительный алгоритм «ложился» на ту или иную параллельную архитектуру используемого вычислительного комплекса. В силу этого обстоятельства параллельная реализация любой неявной схемы достаточно сложна и трудоемка. Она включает в себя не только построение сходящегося итерационного процесса, но и достижение компромисса между скоростью сходимости и накладными расходами на промежуточные вычисления и пересылку данных. Тем самым рассматриваемая в диссертационной работе Борисова В.Е. задача посвящена актуальной теме, а именно – построению и реализации параллельных неявных вычислительных алгоритмов для эффективного численного решения пространственных задач гидрогазодинамики на высокопроизводительных вычислительных системах.

Диссертационная работа изложена на 93 страницах, состоит из введения, трех глав, заключения, приложения и списка цитируемой литературы (содержит 99 наименований).

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели работы и основные задачи, решение которых необходимо для достижения поставленных целей. Представлен обзор соответствующей литературы.

Первая глава содержит описание используемой в работе математической модели и вычислительных алгоритмов для ее решения. Математическая модель представлена нестационарными уравнениями Рейнольдса для вязкого сжимаемого газа, для замыкания которых используется одна из модификаций модели турбулентности Спаларта–Аллмараса. Представлена дискретизация уравнений модели, а также основные и вспомогательные алгоритмы неявной схемы для их решения.

Во второй главе описывается созданный автором программный комплекс, особенности его параллельной реализации. Приведено исследование масштабируемости и эффективности разработанных алгоритмов. Валидация комплекса проведена как для стационарного, так и для нестационарного случаев. А именно, смоделированы: трансзвуковое течение вокруг крыла с симметричным профилем, сверхзвуковое течение между двумя симметричными клиньями, в котором рассмотрен инициируемый энерговложением переход от регулярной к маховской конфигурации ударных волн. Результаты расчетов сравнивались с экспериментальными данными и работами других авторов.

В третьей главе рассмотрено моделирование различных режимов работы воздухозаборника прямого воздушного двигателя, которое проведено с помощью разработанного программного комплекса. Исследована зависимость положения ударных волн в псевдоскачке от толщины пограничного слоя на входе в воздухозаборник, для этого разработана и реализована вспомогательная модель для получения характеристик турбулентного пограничного слоя заданной толщины. Приводятся результаты расчетов течений с энерговложением в поток, которое моделирует работу камеры сгорания двигательной установки. Показано его критическое влияние на течение. При этом энерговложение осуществляется согласно разработанной автором методике.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

Научная новизна. Полученные в диссертационной работе результаты являются новыми. В частности, автором разработаны алгоритмы неявной схемы на основе методов LU-SGS и BiCGStab для решения нестационарных уравнений Рейнольдса с моделью турбулентности Спаларта–Аллмараса для сжимаемых течений и возможностью вложения энергии в поток. Разработанный параллельный программный комплекс позволяет проводить моделирование трехмерных турбулентных течений вязкого сжимаемого газа с энерго-вложением в поток на высокопроизводительных вычислительных системах, что позволяет решать промышленные задачи актуальной сеточной размерности. Это было продемонстрировано при моделировании течений в тракте воздухозаборника прямоточного воздушно-реактивного двигателя.

Обоснованность и достоверность полученных результатов и защищаемых положений обеспечивается корректностью математического аппарата, аккуратным тестированием программного комплекса на примере решения валидационных задач и сравнением полученных результатов с данными натурных экспериментов и опубликованными в литературе данными других авторов.

Практическая и научная ценность работы заключается в том, что она содержит как теоретические разработки по построению алгоритмов неявной схемы, так и существенные практические результаты. Разработанный автором программный комплекс продемонстрировал свою эффективность для расчета газодинамических задач большой сеточной размерности.

Диссертация выполнена на высоком научном уровне и представляет собой законченное научное исследование. Результаты работы полностью опубликованы в печати. Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации.

Недостатки работы

1. Для описания турбулентных течений автором используется модель Спаларта–Аллмараса, но ничего не сказано о том, почему именно этой модели отдано предпочтение.
2. Описание расчетного алгоритма выполнено очень конспективно. Из этого описания сложно понять как последовательность действий, так и их логику.
3. В диссертационной работе представлены результаты тестирования алгоритмов и программ, разработанных автором. Однако критерии, которые использовал автор, являются в основном качественными. Валидация была бы более корректной, если бы в работе были приведены результаты количественного анализа расчета тестовых задач,

представленных в литературе.

4. В работе декларируется построение разностных схем на неравномерных сетках. Однако из описания алгоритма расчета потоков следует, что используемые расчетные сетки действительно неравномерные, но их шаги связаны некоторыми соотношениями. Судя по рисункам, используемые расчетные сетки не являются, вообще говоря, прямоугольными, но это обстоятельство никак не прокомментировано в работе.

Указанные недостатки не являются препятствием для заключения о том, что диссертация Борисова Виталия Евгеньевича заслуживает положительной оценки. Работа полностью соответствует специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, удовлетворяет общим требованиям, предъявляемым к диссертационным работам на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук согласно Положению о порядке присуждения ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013г. №842. Считаю, что Борисов Виталий Евгеньевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент

доктор физико-математических наук, с.н.с,
заведующий лабораторией флюидодинамики и
сейсмоакустики МФТИ

141700, Московская область,
г. Долгопрудный, Институтский переулок, д.9.
+7 (495) 408-45-54, info@mipt.ru

Колдоба А. В.

26.12.2016.

Подпись заведующего лабораторией флюидодинамики и сейсмоакустики МФТИ Колдобы Александра Васильевича удостоверяю.

Ученый секретарь МФТИ, к.ф.-м.н.



Скалько Ю. И.