

ОТЗЫВ

на диссертацию Родионова Александра Владимировича на тему: «Разработка методов и программ для численного моделирования неравновесных сверхзвуковых течений в приложении к аэрокосмическим и астрофизическим задачам», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Диссертация Александра Владимировича Родионова посвящена построению математических моделей, развитию вычислительных алгоритмов и разработке программных комплексов для расчета сверхзвуковых неравновесных течений газовых и многофазных сред.

Актуальность работы связана с приложениями в областях аэрокосмической техники (определение параметров струй, истекающих из ракетных двигателей в атмосферу на различных этапах/высотах полета летательных аппаратов) и астрофизики (определение параметров внутренней атмосферы комет, формируемой сверхзвуковыми струями компонентов ядра, испаряющихся под действием солнечного излучения).

Расчет пространственных сверхзвуковых течений, сопровождающихся образованием газодинамических разрывов, представляет собой сложную вычислительную задачу и требует создания соответствующих моделей и алгоритмов. В первой главе диссертации подробно излагаются основы разработанных А.В. Родионовым комплексов программ. Приведены системы решаемых уравнений, схемы численной аппроксимации, изложены аспекты моделирования неравновесных течений и метода маршировки по пространству, описаны принципы построения вычислительных алгоритмов. Следует отметить, большой вклад, внесенный автором в развитие расчетных методик, базирующихся на решении задачи Римана. А.В. Родионовым предложена новая оригинальная схема для сквозного расчета течений, позволившая повысить порядок аппроксимации по времени по отношению к «классическим» схемам Годунова и Колгана. Повышение порядка аппроксимации достигается при минимальных вычислительных затратах. Верификация предложенной схемы и алгоритма расчета проведена на решении тестовых задач: течения в сверхзвуковой части осесимметричного сопла и одномерное распространения ударной волны по неравновесному газу.

А.В. Родионов является автором пакета NARJ (Numerical Analysis of Real Jets). Данный комплекс программ является мощным инструментом численного моделирования струй продуктов сгорания ракетных топлив методом сквозного счета (на базе схемы Годунова-Колгана-Родионова). Пакет позволяет проводить моделирование истечения газовой смеси из различных типов ракетных двигателей (ЖРД, РДТТ) и для различных режимов течения (истечение в вакуум, дозвуковой, сверхзвуковой спутный

поток). К преимуществам разработанного А.В. Родионовым программного комплекса относится заложенная в пакет полная физическая модель протекающих процессов в струе, включающая описание химических реакций, колебательной релаксации, процесса конденсации паров воды, турбулентного смешения и многофазности. Следует отметить, что пакет нашел широкое применение для решения практических задач и использовался, в том числе, для решения инженерных задач Российского Космического Агентства. Основы пакета NARJ и вычислительные аспекты численного моделирования ракетных струй изложены во второй главе диссертации. Среди результатов, представленных во второй главе, заслуживает внимание решение проблемы моделирования турбулентных сверхзвуковых струй в рамках RANS подхода. Автором предложена новая альтернативная форма для тензора турбулентных напряжений, обладающая преимуществами перед гипотезой Буссинеска.

С учетом реализованных и планируемых мировым сообществом космических миссий по исследованию комет особое место занимают представленные в третьей главе диссертации результаты численного моделирования атмосферы комет с использованием схемы ГКР.

К особенностям моделирования кометных атмосфер относятся: (i) необходимость моделирования многофазных многокомпонентных течений (помимо описания движения газовой фазы – молекул воды, углекислого газа, CO и пр. необходимо учитывать унос с поверхности частиц минеральной и органической пыли (с размерами от нанометров до сантиметров)), (ii) сложность постановки граничных условий на поверхности кометы (испарение одних компонентов с поверхности и диффузия других из внутренних слоев), (iii) необходимость учета физико-химических процессов (таких как фотодиссоциация молекул в дальней коме), (iv) необходимость расчета разреженных течений при малых числах Рейнольдса.

Несмотря на крайнюю сложность математического описания данного явления А.В. Родионов успешно справился с поставленной задачей. Показана некорректность однофракционного приближения Китамуры для описания динамики пылевого облака и предложен оригинальный многофракционный подход. Разработана модель поверхностного ядра кометы с учетом наличия процессов испарения элементов с поверхности и диффузии компонент из внутренних слоев. Выполнено моделирование как ближней, так и дальней комы с учетом процессов фотодиссоциации молекул воды. Очень ценный результат представляет собой анализ степени применимости сплошносредних подходов Эйлера и Навье-Стокса на основе сравнения полученных данных с данными расчетов методом прямого статистического моделирования (ПСМ).

В настоящий момент газодинамические задачи в областях аэрокосмической техники и астрофизики можно решить с помощью коммерческих пакетов программ или кодов с открытым доступом. Поэтому принципиально важным моментом является сравнение возможностей разработанных автором пакетов программ с имеющимися мировыми

аналогами. Четвертая глава диссертации посвящена рассмотрению данного вопроса. Результаты расчетов с использованием разработанных автором диссертации алгоритмов и программ сравниваются с результатами расчетов аналогичных задач, полученных с использованием пакетов Fluent, OVERFLOW и пр. Для определенных классов задач показано превосходство по точности и вычислительной эффективности схемы ГКР над рядом коммерческих комплексов. Приводится крайне полезный для научного сообщества анализ эффективности схем повышенного порядка аппроксимации.

Глава 5 диссертационной работы посвящена исследованию численных неустойчивостей при применении низкодиссипативных решателей задачи Римана к сквозным расчетам сильных ударных волн (феномен «карбункула»). Феномен «карбункула» приводит к существенному повреждению формы ударной волны при применении методов сквозного счета, использующих наиболее точные и популярные решатели задачи Римана, такие, как решатель схемы Годунова, решатели схем Роу и HLLC. Поэтому изучение и «минимизация» данного феномена представляется крайне актуальной задачей, успешно решенной автором диссертации. Для борьбы с численными неустойчивостями А.В. Родионов предложил новый оригинального подход – использование метода искусственной вязкости. Автор диссертации продемонстрировал эффективность предложенного метода и его «конкурентные» преимущества по отношению к оригинальным схемам без искусственной вязкости.

Результаты, представленные в диссертационной работе А.В. Родионова крайне важны для разработки новых и оптимизации имеющихся двигателей космических летательных аппаратов, для целей минимизации воздействия ракетных струй на окружающую среду. Разработанные автором диссертации вычислительные технологии и пакеты программ, несомненно, будут способствовать прогрессу аэрокосмической техники.

Особую важность представляют результаты диссертационной работы А.В. Родионова в области моделирования внутренней атмосферы комет. Исследования параметров атмосферы позволяют получить важную информацию о составе кометного ядра. Наличие информации о структуре и составе ядер комет в свою очередь способствует расширению наших представлений об эволюции Солнечной системы и процессе формирования Земли. Модели, численные методы и программы, разработанные А.В. Родионовым позволяют провести интерпретацию результатов наблюдений, полученных в результате как завершившихся (проект Rosetta по исследованию кометы 67P/Чурюмова-Герасименко), так и будущих (программа Европейского космического агентства Comet Interceptor, японского космического агентства JAXA/DESTINY+) космических миссий.

Работа А.В. Родионова вносит существенный вклад в область вычислительной газовой динамики и заслуживает наивысшей оценки. Полученные результаты являются крупным научным достижением.

Диссертационная работа Родионова А. В. “Разработка методов и программ для численного моделирования неравновесных сверхзвуковых течений в приложении к аэрокосмическим и астрофизическим задачам” соответствует п.9 Положения о присуждении ученых степеней, а ее автор Родионов Александр Владимирович заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.18 – “Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ”.

/Быков Н.Ю./

19.02.20

Быков Николай Юрьевич,
доктор физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник
НИО вычислительной физики сложных систем
федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования
“Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого”,
195251, Санкт-Петербург, ул.Политехническая, д.29,
тел +7-921-9502546, эл. почта nbykov2006@yandex.ru, bykov_nyu@spbstu.ru

Я, Быков Николай Юрьевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Родионова Александра Владимировича, и их дальнейшую обработку.



Подпись	
удостоверяю	
ующий специалист	
докт. наук	Кринке М. А. / К
«19»	02 2020 г.

/Быков Н.Ю./