

## ОТЗЫВ

**Официального оппонента на диссертационную работу Родионова Александра Владимировича «Разработка методов и программ для численного моделирования неравновесных сверхзвуковых течений в приложении к аэродинамическим 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 А.В. Родионова посвящена разработке математических моделей, численных методов и программ для исследования многофазных сверхзвуковых течений с неравновесными процессами в приложении к аэрокосмическим и астрофизическим задачам. Сложность моделирования такого рода задач связана с необходимостью учета множества разномасштабных физико-химических процессов в течениях с газодинамическими особенностями – ударными волнами и тонкими слоями смешения. Поэтому проблема разработка универсальных и надежных вычислительных алгоритмов здесь выходит на первый план, представляя собой сложную задачу.

**Актуальность темы** диссертации обусловлена тем, что, с одной стороны, неравновесные сверхзвуковые течения рассматриваются во многих областях науки и техники, а, с другой стороны, возможности их экспериментального исследования существенно ограничены. В этих условиях численное моделирование играет решающую роль – оно позволяет либо полностью заменить эксперимент, либо оказать существенную помощь в его интерпретации, обогатив данные измерений более детальной информацией.

Диссертация А.В. Родионова состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Объем работы составляет 299 страниц, список литературы включает 261 наименование.

**Введение** содержит общую характеристику работы. Здесь обосновывается актуальность темы, дается краткий обзор работ других авторов, определяются цели и задачи диссертационного исследования, формулируются положения, выносимые на защиту, и перечисляются публикации автора по теме работы.

**Первая глава** посвящена разработке метода сквозного счета неравновесных течений и принципам конструирования программ. В ней приводятся уравнения газовой динамики, определяются сеточные величины (в рамках метода конечных объемов на гладкой структурированной сетке) и описываются схемы Годунова и Колгана. На этой базе строится оригинальная схема второго порядка аппроксимации по пространству и по времени, обладающая свойством монотонности. Новая схема (схема Годунова-Колгана-Родионова или, сокращенно, схема ГКР) обладает рядом достоинств: она состоит только

из вычислительных элементов схемы Колгана, проста в реализации и универсальна. Далее проводится обобщение схемы ГКР на случай расчета неравновесных течений, дается описание базовых принципов построения программ и приводятся примеры тестовых расчетов, демонстрирующих высокую эффективность схемы ГКР в задачах с гладкими и разрывными решениями.

**Вторая глава** посвящена численному моделированию струй продуктов сгорания ракетных топлив и комплексу программ NARJ. Здесь подробно описывается объект моделирования – течение продуктов сгорания типовых топлив ЖРД и РДТТ в сопле и в струе при различных режимах истечения в спутный поток воздуха. Во втором разделе главы описывается математическая модель течения продуктов сгорания, объединяющая в себе химические реакции, неравновесную релаксацию колебательных степеней свободы молекул, гомогенную конденсацию паров воды, турбулентное перемешивание и многофазность (частицы  $Al_2O_3$ ) с учетом неравновесных фазовых переходов. В третьем разделе на базе схемы ГКР разрабатывается универсальный маршевый метод расчета стационарной струи. Его особенность и практическая ценность заключается в том, что он позволяет проводить «маршевый» счет сверхзвуковых неравновесных струй с локальными дозвуковыми областями (внешний дозвуковой поток и/или течение за диском Маха). Приводятся результаты тестирования маршевого метода (сравнение с более затратным методом установления по времени) и показывается его высокая эффективность. В четвертом разделе приводятся многочисленные примеры применения комплекса программ NARJ, а в пятом разделе обсуждается проблема моделирования турбулентных струй в рамках RANS, где выявляются недостатки моделей турбулентности, базирующихся на гипотезе Буссинеска, и предлагается альтернативный вид для тензора турбулентных напряжений, свободный от отмеченных недостатков.

**Третья глава** посвящена работам по численному моделированию атмосферы комет в рамках подготовки и осуществления международного проекта Розетта по изучению кометы Чурюмова-Герасименко. Здесь автором проделан большой объем работ, в том числе построена единая математическая модель течения в атмосфере комет, на базе схемы ГКР разработаны газодинамические коды и проведены многочисленные параметрические исследования.

**Четвертая глава** посвящена сопоставлению схемы ГКР с современными методами сквозного счета и коммерческими кодами. Схема ГКР является разновидностью схем типа MUSCL, которые весьма популярны и широко используются при решении различного класса задач. На ряде тестовых примеров автор показал, что схема ГКР не уступает по точности современным пакетам программ, таким как OVERFLOW, CFL3D и FLUENT. В одном из разделов главы схема ГКР сравнивается со схемой КАБАРЕ и выявляются их общие свойства и различие. В результате проведенного анализа автор получил еще одно

представление схемы КАБАРЕ – в виде MUSCL-схемы, которое в линейном случае эквивалентно базовой схеме КАБАРЕ. Также было проведено усовершенствование самой схемы ГКР – в дополнение к уже известным реконструкциям-ограничителям была предложена новая низкодиссипативная реконструкция NOLD. Отдельный раздел главы посвящен сопоставлению схем типа MUSCL с разрывным методом Галеркина, пользующимся в настоящее время большой популярностью. Автором прослеживается интересная связь между методом Галеркина и предложенной Ван Лиром первой версией схемы MUSCL. Глава завершается примерами расчета нескольких тестовых задач, из которых видно, что в задачах с сильными ударными волнами схема ГКР может не уступать по эффективности, как методу Галеркина, так и схеме WENO – еще одной популярной схеме сквозного счета.

**Пятая глава** посвящена проблеме «карбункула» в схемах типа Годунова. Эта проблема представляет собой особый вид численной неустойчивости, которая появляется при сквозном расчете сильных ударных волн с применением наиболее точных (и популярных) решателей задачи Римана. Такая неустойчивость наблюдается в лишь случаях, когда линии сетки в окрестности ударной волны ориентированы вдоль линий тока. В первом разделе главы дается подробный анализ публикаций по численной неустойчивости типа «карбункул» и предлагается оригинальный подход к решению этой проблемы – метод искусственной вязкости. Во втором разделе главы метод искусственной вязкости адаптируется к схемам первого порядка аппроксимации. Здесь предлагается универсальная формула для коэффициента искусственной вязкости и на базе параметрического исследования подбираются: (1) выражение для характерного размера ячейки и (2) значение свободного параметра модели, обеспечивающее подавление неустойчивости при любых режимах сквозного расчета ударной волны. В следующем разделе метод искусственной вязкости обобщается на случай его применения в схемах повышенной точности. Важной особенностью предложенного А.В. Родионовым метода решения проблемы «карбункула» является то, что он (метод), будучи внешним по отношению к конкретной численной схеме и входящему в ее состав решателю задачи Римана, является универсальным средством подавления ударно-волновой неустойчивости, не оказывая при этом влияния на параметры течения в гладких областях решения. Этим метод искусственной вязкости выгодно отличается от других методик, предложенных ранее для решения проблемы «карбункула».

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

В целом диссертация производит очень хорошее впечатление. Особо стоит отметить, что в работе автора широта охвата актуальных проблем из области вычислительной газовой динамики сочетается с фундаментальным, углубленным подходом к их решению. Все результаты обоснованы и прошли экспертизу в виде публикаций в научных журналах,

процитированных в международных базах цитирования Web of Science и Scopus, докладов на представительных международных конференциях и в виде экспертных заключений по российским и французским проектам (гранты РФФИ, CNRS и CNES), в рамках которых частично проводились данные исследования.

Автореферат правильно и полностью отражает содержание диссертационной работы.

Основное содержание диссертационной работы отражено в 73 публикациях, из которых 48 – журнальные статьи в печатных изданиях, рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертационных работ, 21 – труды конференций, 4 – препринты. Личный вклад соискателя в эти работы значителен (в 14 журнальных статьях он является единственным автором). Результаты диссертации докладывались на многих представительных российских и международных конференциях и семинарах.

По диссертационной работе есть несколько замечаний.

- 1) Описание базового численного метода, схемы ГКР, рассматривается в работе для случая гладких структурированных сеток с использованием криволинейной системы координат. Это сильно сужает область применения метода. Метод конечного объема, на основе которого строится схема ГКР, работает с произвольными сетками. Поэтому возникает естественный вопрос об обобщении схемы ГКР на неструктурированные сетки. В диссертации этот вопрос не обсуждается. Вместе с тем, имеется работа (M. Borrel, J.L. Montagne, AIAA Papers 85-1497, 1985), в которой схема типа предиктор-корректор, являющаяся в терминах градиента аналогом ГКР, строится для сетки произвольной топологии; ссылка на нее в диссертации была бы вполне уместной.
- 2) Моделирование неравновесных физико-химических процессов, связанных с протеканием химических реакций и релаксационных термодинамических процессов, проводится в диссертации стандартным методом расщепления по физическим процессам. Система уравнений расщепляется на гиперболическую часть и параболическую часть (релаксация, вязкость, диффузия), которая трактуется как источниковый член. Решение гиперболической части при этом находится прямым применением схемы ГКР в предположении замороженности массового состава смеси. При таком подходе должно нарушаться свойство сбалансированности (PV-свойство) – точное воспроизведение в численном решении однородного распределения скорости и давления при переменном массовом составе, что должно приводит к возникновению нефизичных осцилляций в окрестности контактных разрывов со скачком концентраций. Проблема хорошо известна; ей посвящено много публикаций, в которых предлагаются различные способы модификации схем Годуновского типа с целью

устранения этого недостатка. В диссертации этот вопрос не обсуждается, и остается неясным насколько велико влияние этого паразитного эффекта в схеме ГКР.

- 3) В главе 2 приводится сравнительный анализ двух методик расчета стационарных сверхзвуковых струй – маршевого метода и метода установления по времени. Первый основан на существенной модификации базовых уравнений газовой динамики и является, в некотором смысле, приближенным, второй решает полную систему уравнений Навье-Стокса. Приведенные результаты показывают более точное совпадение с экспериментальными данными у маршевого приближенного метода, чем у второго. Анализ этого странного эффекта приводит автора к интересной идее модифицировать гипотезу Буссинеска в модели турбулентности. Полученная таким образом новая модель турбулентности показывает очень хорошие результаты в струйных течениях. Но возникает вопрос, насколько она универсальна. Будет ли она, например, адекватно описывать турбулентные пристеночные пограничные течения?
- 4) Смешанная методика, применяемая к задачам расчета атмосферы комет, использует гибридный подход, когда в ближней к комете области решаются нестационарные уравнения методом установления, а во внешней области применяется маршевый метод. Численное решение при таком подходе будет зависеть от положения границы между стационарной и нестационарной областями и граничных условий, если течение на этой границе частично будет дозвуковым. Но область сверхзвукового течения заранее не известна, поэтому не ясно, на чем основывается выбор внутренней области.
- 5) Модель Марбла, которая применяется для расчета многофазных газовых течений, при пересечении траекторий дисперсной компоненты приводит к возникновению поверхностей с сингулярной плотностью. Предлагаемая диссертантом многофракционная модель лишь частично решает эту проблему, так как появление таких пересечений возможно и в одной фракции.
- 6) Значительная часть раздела 3.4 посвящена деталям космической миссии Розетта, которая не имеет непосредственного отношения к исследовательской работе диссертанта.

Указанные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы.

Диссертация написана на высоком научном уровне. Она показывает, что автор провел всестороннее научное исследование, включающее разработку новых математических и физических моделей, построение численных методов, программную реализацию и проведение вычислительных экспериментов. Диссертация представляет

собой законченное самостоятельное исследование на актуальную тему. В ней представлены все этапы решения крупной научной и практической проблемы, связанной с эффективным и точным моделированием сверхзвуковых неравновесных течений газовых и многофазных сред. Содержание диссертации и полученные результаты соответствуют паспорту специальности 05.13.18.

Диссертационная работа соответствует критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней (п.9), утвержденным Правительством Российской Федерации от 24 сентября 2013 года №842. Автор диссертационной работы Родионов Александр Владимирович заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

02.03.2020

Официальный оппонент,  
ведущий научный сотрудник Института  
прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН,  
доктор физико-математических наук

Игорь Станиславович Меньшов

Почтовый адрес: 125047 Москва Миусская пл., д. 4

Телефон: +7 906 067 1101

Адрес электронной почты: menshov@kiam.ru

Подпись Меньшова Игоря Станиславовича заверяю

Ученый секретарь Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН

к.ф.-м.н.



/Маслов А.И./

02.03.2020