

**Отзыв официального оппонента на диссертационную работу  
А.В. Родионова «Разработка методов и программ для численного  
моделирования неравновесных сверхзвуковых течений в приложении  
к аэрокосмическим и астрофизическим задачам», представленной  
на соискание ученой степени доктора физико-математических наук  
по специальности 05.13.18 – математическое моделирование,  
численные методы и комплексы программ**

Диссертационная работа А.В. Родионова суммирует достижения соискателя по развитию математических моделей и численных методов механики сплошной среды, созданию опирающихся на них совершенных программных комплексов и исследованию с их помощью течений, представляющих несомненный теоретический и прикладной интерес.

Актуальность обсуждаемой диссертации обусловлена важностью развития вычислительной газовой динамики и механики сплошной среды. Новизна исследования следует уже из того, что результаты диссертанта опубликованы в весьма престижных отечественных и зарубежных научных журналах. Степень обоснованности результатов, выводов и заключений соискателя следует из всей методологии его работы, которая включает обоснованные физические модели, совершенные численные методы, демонстрацию сходимости результатов на измельчающихся сетках и сравнения с результатами экспериментов (для реактивных струй) и наблюдений (для комет).

В 5 главах диссертации представлены основные результаты исследований, выполненных диссертантом почти за 40 лет. В эти годы монотонные разностные схемы повышенного порядка аппроксимации (на непрерывных решениях), восходящие к опирающейся на решение задачи о распаде разрыва схеме Годунова, стали главным инструментом вычислителей-газодинамиков всего мира. Включившись в развитие и применение этих схем, А.В. Родионов в качестве создателя новых математических моделей и разностных схем, разработчика вычислительных алгоритмов и создателя программных комплексов во многом определил уровень данного научного направления. Сказанное подтверждает вся диссертация. В ней на высоком научном уровне изложены теоретические основы, достоинства и недостатки таких схем, предложены новые схемы и продемонстрированы возможности опирающихся на них алгоритмов и оригинальных программных комплексов автора.

По мнению оппонента, оригинальных результатов А.В. Родионова, на самом деле, с избытком хватает на три докторских диссертации, причём не только по избранной специальности, но и по механике жидкости, газа и плазмы (01.02.05). Так, опубликованная им в 1987 г. двухшаговая по времени разностная схема, обеспечившая второй порядок по всем независимым переменным и названная впоследствии (не им!) его именем (схема Годунова-Колгана-Родионова – схема ГКР), заслуженно получив широкое распространение, представляет целое семейство разностных схем второго порядка, отличающихся

выбором ограничителя-реконструкции и реализацией шага предиктор. Кроме разностной схемы ГКР с ограничителем-реконструкцией "minmod" В.П. Колгана диссертант предложил и всесторонне изучил достоинства и недостатки разностных схем ГКР с другими ограничителями-реконструкциями: "MC" ("Monotonized Central-Difference Reconstruction") Ван Лира и собственным низкодиссипативным ограничителем-реконструкцией "NOLD" ("Non-Oscillatory Low-Dissipative"), а также исходных и модифицированных им схемы "КАБАРЕ" и метода "Разрывный Галёркин".

Быстрая и точная маршевая схема расчёта стационарных сверхзвуковых струй, реализованная диссертантом со вторым порядком аппроксимации по всем переменным, не работает при истечении в неподвижное затопленное пространство, дозвуковой спутный поток и в дозвуковом потоке за диском Маха у оси симметрии струи. Не работает она и при описании течений вязкого газа в приближении полных уравнений Навье-Стокса (FNS) и результата их осреднения. Чтобы воспользоваться преимуществами маршевого счёта таких течений, в диссертации, во-первых, реализован переход от FNS к параболизированным уравнениям Навье-Стокса (PNS), причём, что важно, более аккуратный, чем получающийся выбрасыванием всех производных по маршевой координате. Во-вторых, в узких зонах, включающих низкоэнергетические дозвуковые слои смещения, выполнена модификация уравнений, исключая распространение противопотоковых возмущений. В-третьих, в тех же целях модифицированы уравнения, описывающие дозвуковой высокоэнергетичный поток за диском Маха у оси симметрии недорасширенных сверхзвуковых струй. Во всех случаях законность введённых модификаций подтверждена сравнением результатов, полученных маршевым счётом по упрощённым математическим моделям и интегрированием с установлением по времени полных уравнений Эйлера или Навье-Стокса.

Большой интерес представляют предложенные диссертантом математическая модель истечения неизобарических турбулентных струй. Диссертант показал, что в приближении полных осреднённых по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (RANS) и определённого гипотезой Буссинеска тензора турбулентных напряжений затухание волновой структуры неизобарических струй описывается неверно, объяснил обнаруженный эффект, предложил альтернативное, устраняющее его представление турбулентных напряжений и установил, что параболизация осреднённых уравнений практически устраняет этот недостаток гипотезы. Использование альтернативного представления турбулентных напряжений позволяет естественным образом избавиться от паразитного нарастания турбулентности перед телами, обтекаемыми в приближении RANS.

В последней (пятой) главе диссертации дано решение важной проблемы вычислительной газовой динамики, связанной с "карбункул неустойчивостью" при сквозном счёте течений с ударными волнами. Такая неустойчивость может проявляться в форме пилообразных возмущений размазанной ударной волны и параметров за ней, в виде изолированного опухолеподобного нароста на ударной волне или её нефизичного изгиба. Для избавления от этого вида неустойчивости А.В. Родионов предложил метод искусственной вязкости. Суть метода

заключается том, что в базовый метод решения уравнений Эйлера добавляется диссипация в форме правых частей уравнений Навье-Стокса с заменой молекулярных вязкости и теплопроводности на искусственные. Для искусственной вязкости подбирается выражение, согласующееся с искусственной вязкостью фон Неймана и Рихтмайера, но имеющее свои особенности (обобщение на многомерность и введение пороговой величины). Действие искусственных вязкости и теплопроводности ограничивается только зоной размазанной ударной волны. Во всех рассмотренных задачах меры, предложенные диссертантом, полностью устранили "карбункул неустойчивость".

В предпоследней (четвёртой) главе диссертации решение разных задач предложенными реализациями схемы ГКР и другими известными разностными схемами повышенного порядка аппроксимации сравнивается по сходимости с измельчением сеток, по качеству получающихся результатов и по временам счёта. Как правило, та или иная реализация схемы ГКР оказывается в числе лидеров.

Наряду с развитием методов численного решения уравнений Эйлера, Навье-Стокса, RANS и их обобщений на уравнения, описывающие неравновесные и двухфазные течения, диссертация даёт достаточно полное представление о результатах, которые с помощью созданного инструмента были получены А.В. Родионовым в двух самостоятельных аэрокосмическом и астрофизическом приложениях. Аэрокосмические результаты диссертанта, составившие важную часть второй главы диссертации, посвящены математическому моделированию сложных по учитываемым физическим процессам течений в соплах и струях жидкостных и твёрдотопливных ракетных двигателей (ЖРД и РДТТ). Учитываемые процессы включают неравновесные химические реакции и колебательную релаксацию, конденсацию паров воды, взаимодействие газообразных продуктов сгорания с жидкими, затвердевающими и кристаллизирующимися частицами окиси алюминия (в соплах и струях РДТТ), а также излучение. Главный итог данного направления – программный комплекс "NARJ (Numerical Analysis of Real Jets)", созданный в ЦНИИМашиностроения при решающем вкладе А.В. Родионова.

Программный комплекс "NARJ" активно использовался, в частности, при решении экологических проблем, ибо истекающие из ЖРД и РДТТ продукты сгорания – один из важных факторов воздействия ракетно-космической техники на окружающую среду. При испытании двигателя на стенде и при движении ракеты по траектории выбрасываются сотни и тысячи тонн продуктов сгорания. Некоторые из их компонент, такие как вода, углекислый газ и азот безвредны, другие же, такие как окись углерода, продукты сгорания с хлором и окись азота – весьма опасны. При старте ракеты и при её движении на начальном участке траектории образуется приземное облако, опасное для живого и растительного мира. В верхних слоях атмосферы возможно губительное воздействие на озоновый слой. С помощью NARJ анализировались выбросы из двигателей ракетных систем "Энергия", "Протон" и "Шаттл". Было показано, что при оценке воздействия выбросов на окружающую среду необходимо учитывать химическую неравновесность в сопле и в зоне смешения продуктов сгорания с воздухом.

Было установлено, что для ракетных систем «Шаттл» и «Энергия» вредные выбросы в стратосферу на порядок меньше величин, заявляемых в отечественных и зарубежных публикациях.

Трудно переоценить вклад диссертанта в расчётно-теоретическое исследование атмосферы (комы) комет, важнейшую часть которого составил полёт космического аппарата Розетта ("Rosetta mission"), успешно реализованный Европейским космическим агентством ("ESA") в 2004-2016 гг. с посадкой (12.11.2014) отделяемого модуля "Philae lander" на поверхность кометы Чурюмова-Герасименко и контролируемым столкновением Розетты с кометой (30.09.16). Участие А.В. Родионова в этом исследовании, начавшееся в 1995 г., нашло отражение в 25 публикациях (из них 24 в зарубежных изданиях) и в третьей главе диссертации. Основные расчётно-теоретические результаты включают математические модели с одножидкостным и двухжидкостным описанием дисперсной фазы (пыли). В результате работы, проделанной по проекту Розетта до начальной фазы изучения кометы Чурюмова-Герасименко, была отработана расчетная модель и сформирован комплекс программ, названный "RZC" (по начальным буквам фамилий авторов – Rodionov, Zakharov, Crifo). Комплекс RZC включает газодинамические коды для расчёта параметров газа (смеси паров воды, окиси и двуокиси углерода) в рамках уравнений Эйлера или Навье-Стокса и облака частиц в газодинамическом приближении. В комплексе RZC реализован расчёт атмосферы кометы на блочно-структурированной сетке. Параметры математической модели подбирались так, чтобы рассчитанная с помощью RZC атмосфера кометы соответствовала данным измерений комы, полученным прибором "ROSINA (Rosetta Orbiter Spectrometer for Ion and Neutral Analysis)". Еще одно направление работ с применением комплекса RZC состояло в интерпретации данных прибора ROSINA с целью создания карты газовой активности поверхности кометы Чурюмова-Герасименко. Данные моделирования атмосферы этой кометы использовались при выборе места посадки отделяемого модуля.

Диссертация практически лишена сколь-либо серьёзных недостатков. Из несерьёзных отмечу такие. При обширном списке литературы не мешало сослаться на статьи: Камзолов В.Н., Пирумов У.Г. Расчет неравновесных течений в соплах // МЖГ. 1966. № 6. С. 25-33 (эти авторы первыми применили метод Ньютона при решении уравнений химической кинетики); Тилляева Н.И. Обобщение модифицированной схемы С.К. Годунова на произвольные нерегулярные сетки // Учен. зап. ЦАГИ. 1986. Т. 17. № 2. С. 18-26 (автор за 10 лет до диссертанта сохранила аппроксимацию (с первым порядком), в частности, на изломах сеточных линий). Неудачен используемый диссертантом термин "двухфракционная модель" (для частиц пыли). Обычно "фракции частиц" различают по их размерам. В рассматриваемом случае правильнее: "двускоростная" или "двухжидкостная модель". Кстати, какой из возможных сценариев реализуется, (односкоростной с разделительной "пеленой" или двускоростной без такой пелены) зависит от длины свободного пробега, причём не в каждой "жидкости", а между ними. Поэтому на больших расстояниях пелена обязательно возникнет и течение станет односкоростным (по пыли). Эти вопросы рас-

Крайко А.Н. О поверхностях разрыва в среде, лишенной собственного давления // ПММ. 1979. Т. 43. Вып. 3. С. 500-510; Крайко А.Н. Математические модели для описания течений газа и инородных частиц и нестационарной фильтрации жидкости и газа в пористых средах // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математическое моделирование и программирование». 2014. Т. 7. № 1. С. 34-48.

Сделанные, к тому же несущественные замечания не меняют высокой оценки выполненного исследования и её автора – одного из бесспорных лидеров данного научного направления.

В соответствии со сказанным, опираясь на диссертацию, на 48 статей только в ведущих отечественных и престижных зарубежных журналах (соответственно 17 и 31 статья, из них 14 без соавторов), на многие десятки докладов на известных научных форумах в России и за рубежом, в том числе, на семинарах в профильных отечественных и иностранных научных организациях, и признавая, что исследования, выполненные при определяющем вкладе соискателя, приобрели все необходимые черты важного научного направления, считаю, что обсуждаемая работа с избытком удовлетворяет требованиям ВАК РФ к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, а ее автор – Александр Владимирович Родионов безусловно заслуживает искомой степени.

Автореферат с необходимой полнотой передаёт основные результаты диссертации.

Официальный оппонент,  
начальник отдела ФГУП "Центральный институт  
авиационного моторостроения им. П.И. Баранова",  
д.ф.-м.н., профессор

/Крайко А.Н./

« 05 » 03 2020 г.

Подпись руки А.Н. Крайко заверяю:  
Ученый секретарь ФГУП "Центральный институт  
авиационного моторостроения им. П.И. Баранова",  
д.э.н.



/Джамай Е.В./

Адрес: 111116, г. Москва, ул. Авиамоторная, д. 2  
Адрес электронной почты: [akrayko@sci.am](mailto:akrayko@sci.am)  
Телефон: (495) 361-6640