

УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального

государственного учреждения

«Федеральный исследовательский  
центр «Информатика и управление»  
Российской академии наук»



  
И.А.Соколов

« 04 » марта 2020 г.

### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Родионова Александра Владимировича «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 Родионова А.В. основана на научных исследованиях соискателя за более чем 30-ти летний период и состоит из пяти глав. Первая глава посвящена базовым элементам численного метода (схема Годунова-Колгана-Родионова) и принципам построения программ. Во второй главе приводятся результаты численного моделирования струй продуктов сгорания ракетных топлив с учетом химических процессов. В третьей главе представлены расчеты атмосферы комет в рамках международного проекта Розетта по изучению кометы Чурюмова - Герасименко. В четвертой главе предложенная соискателем разностная схема обсуждается в контексте современных методов сквозного счета. В пятой главе представлен новый способ борьбы с численной неустойчивостью фронтов ударных волн (т.н. «карбункул») в схемах типа Годунова – метод искусственной вязкости.

По теме диссертации опубликовано 48 журнальных статей в изданиях, рекомендованных ВАК, включая 14 статей без соавторов и несколько публикаций в журналах из первого квартиля базы данных Web of Science. Соискатель разработал два комплекса программ:

RZC для решения задач проекта Розетта и NARJ для моделирования струй, истекающих из типовых ЖРД и РДТТ.

### **Актуальность темы диссертационной работы**

Исследование сверхзвуковых течений экспериментальным путем в контексте инженерных приложений сопряжено со значительными техническими трудностями. Для экономии времени и средств целесообразно основные расчетные характеристики изучать методами вычислительной физики. Поэтому развитие численных методов моделирования сверхзвуковых течений является актуальной задачей вычислительной физики на протяжении последних 40 лет.

### **Оценка новизны и практической значимости**

Соискателем предложены оригинальные численные методы и математические модели для моделирования сверхзвуковых течений, которые реализованы в созданных им комплексах программ. Отметим, что в отечественной и иностранной литературе предложено большое количество численных методов моделирования сверхзвуковых течений. Большая часть из них используется только авторами либо их учениками. Предложенные соискателем Родионовым А.В. методы и модели применяются в большом количестве организаций авиационной и ракетно-космической области, что свидетельствует об их безусловной научной и практической значимости.

Наиболее известным и важным методом соискателя является численная схема Годунова-Колгана-Родионова (ГКР) решения уравнений Эйлера сжимаемого газа, опубликованная в работах *Родионов А.В. Монотонная схема второго порядка аппроксимации для сквозного расчета неравновесных течений // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. – 1987. – Т. 27, № 4. – С. 585–593; Родионов А.В. Повышение порядка аппроксимации схемы С.К.Годунова // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. – 1987. – Т. 27, № 12. – С. 1853–1860.* Суммарное количество ссылок на эти две работы по базе Elibrary.ru равно 138, что является очень высоким показателем

Стоит отметить цикл работа соискателя (с соавторами), посвященный численному моделированию атмосферы комет в рамках международного проекта Розетта. Данная задача является очень трудной ввиду сложности протекающих физических процессов и неравномерности формы поверхности кометы. Практическая важность этих расчетов состояла в интерпретации данных, полученных прибором ROSINA, с целью создания карты активности по газу для поверхности. Результаты сравнения численных результатов

и экспериментальных измерений подтверждают адекватность построенной модели и используемых расчетных методов. Основная публикация соискателя по данной тематике комет *Crifo J.F., Rodionov A.V. The dependence of the circumnuclear coma structure on the properties of the nucleus. Part I. Comparison between a homogeneous and an inhomogeneous spherical nucleus, with application to P/Wirtanen // ICARUS. – 1997. – V. 127. – P. 319–353* имеет 126 ссылок по базе Elibrary.ru, что является выдающимся показателем и подтверждает новизну и практическую значимость данной работы.

Практическая значимость работы Родионова А.В. состоит в следующем:

- (1) Предложенное соискателем в работе 1987 года обобщение схемы Колгана широко используется в ряде российских организаций, включая ФИЦ “Информатика и управление” РАН (отделение 2 "Моделирование сложных физических и технических систем"), ЦАГИ им. проф. Н.Е. Жуковского (НИО-1 аэродинамика силовых установок) и ЦНИИмаш.
- (2) Созданные соискателем математические модели и расчетные программы используются как в российских организациях (МИТ, ЦНИИМАШ и другие), так и в Лаборатории аэронамики Национального центра научных исследований Франции (проект “Розетта” Европейского космического агентства).
- (3) Предложенный в работах соискателя [41,42,44-46,48] из списка публикаций по теме диссертации способ подавления численных неустойчивостей при расчете сильных ударных волн может быть рекомендован к использованию в существующих отечественных пакетах программ численного моделирования течений сжимаемого газа, таких как Noisette (ИПМ им. М.В. Келдыша), FlowModellium (МФТИ), Гербера и Zeus (ЦАГИ им. проф. Н.Е. Жуковского), FlowVision (ООО Тезис).
- (4) Предложенный соискателем ограничитель наклонов NOLD (Non-Oscillatory Low-Dissipative) позволяет существенно улучшить точность расчета разрывных решений с помощью схемы Кабаре и увеличить диапазон рабочих чисел Куранта. Он может быть рекомендован к внедрению в основанные на схеме Кабаре пакеты численного моделирования, используемые в МГУ им. М.В. Ломоносова, ИБРАЭ РАН и ЦАГИ.
- (5) Результаты соискателя по проекту Розетта (модель газовой и пылевой комы) в приближении сплошной среды планируются к использованию в проекте Европейского космического агентства “Comet interceptor”.

## **Оценка достоверности результатов**

Соискателем приводится большое количество верификационных расчетов, в которых результаты расчетов с использованием разработанных им программ сравниваются с известными аналитическими и эталонными решениями тестовых задач и экспериментальными данными для струй.

## **Замечания по работе**

1. Моделирование струй в программном комплексе NARJ проводится маршевым методом, что накладывает известные ограничения на моделирование течений с локальными дозвуковыми зонами и сложными геометриями (одновременный расчет несколько струй).
2. На странице 237 текста диссертации соискатель говорится, что искусственная вязкость должна отключаться в пограничном слое, для чего проверяется критерий сильной вытянутости ячеек (длинная сторона ячейки больше короткой в 10 раз и более). Однако, в случае тел сложной формы около угловых элементов поверхности (например, надстройки на космическом корабле), данный критерий будет неприменим. Вместо этого можно «выключать» предложенную соискателем искусственную вязкость, используя расстояние до поверхности тела, как было предложено в работе *М.Н. Петров, А.А. Тамбова, В.А. Тутарев, С.В. Утюжников, А.В. Чикиткин. Программный комплекс FlowModellium для расчета высокоскоростных течений сжимаемого газа // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2018, Т. 58, N. 11, С. 1932-1954.*
3. Хотелось бы видеть эффективность нового метода искусственной вязкости для чисел Маха набегающего потока 25-40, что соответствует прикладным задачам аэрокосмической области.

## **Заключение ведущей организации**

Отмеченные недостатки не снижают научной и практической значимости полученных результатов и общей положительной оценки работы. Диссертация Родионова А.В. является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований получены новые результаты, имеющее существенное значение для

науки и практики. Совокупность полученных результатов можно квалифицировать как крупное научное достижение в области численного моделирования сверхзвуковых течений неравновесных газовых и многофазных сред. Основное содержание диссертации, а также научные положения, вынесенные на защиту, достаточно полно отражены в опубликованных работах. Автореферат отражает содержание диссертации. Работа отвечает требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор, Родионов Александр Владимирович, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.18.

Отзыв на диссертацию и автореферат обсуждены и одобрены на семинаре отдела 24 «Механика» ФИЦ ИУ РАН 13 февраля 2020 года.

Титарев Владимир Александрович,  
доктор физико-математических наук  
ведущий научный сотрудник отдела 24 «Механика» ФИЦ ИУ РАН



**Полное наименование организации:** Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук»

**Адрес:** 119333, Москва, ул. Вавилова, д.44, корп. 2

**Телефон:** +7 499 135-62-60

**Сайт организации:** <http://www.frccsc.ru>

**Электронная почта:** [frccsc@frccsc.ru](mailto:frccsc@frccsc.ru)