

Результаты публичной защиты

Дата защиты: 02 июля 2020 г.

Соискатель: **Родионов Александр Владимирович.**

Диссертация на соискание ученой степени **доктора** физико-математических наук на тему: «Разработка методов и программ для численного моделирования неравновесных сверхзвуковых течений в приложении к аэрокосмическим и астрофизическим задачам».

Специальность 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Состав диссертационного совета утвержден в количестве 24 человек, присутствовали на заседании - 17 человек, из них 5 докторов по профилю рассматриваемой диссертации:

Председатель: академик РАН, д.ф.-м.н., профессор Б.Н. ЧЕТВЕРУШКИН.

Секретарь: к.ф.-м.н. М.А. КОРНИЛИНА.

Присутствовали:

- | | | |
|-----|------------------|-----------|
| 1. | ЧЕТВЕРУШКИН Б.Н. | д.ф.-м.н. |
| | 05.13.18 | |
| 2. | ТИШКИН В.Ф. | д.ф.-м.н. |
| | 01.01.07 | |
| 3. | КАЛИТКИН Н.Н. | д.ф.-м.н. |
| | 01.02.05 | |
| 4. | КОРНИЛИНА М.А. | к.ф.-м.н. |
| | 05.13.18 | |
| 5. | АНДРЕЕВ В.Б. | д.ф.-м.н. |
| | 01.01.07 | |
| 6. | ВАСИЛЕВСКИЙ Ю.В. | д.ф.-м.н. |
| | 01.01.07 | |
| 7. | ДОЛГОЛЕВА Г.В. | д.ф.-м.н. |
| | 01.01.07 | |
| 8. | ЕЛИЗАРОВА Т.Г. | д.ф.-м.н. |
| | 01.01.07 | |
| 9. | ЗМИТРЕНКО Н.В. | д.ф.-м.н. |
| | 01.02.05 | |
| 10. | КАРАМЗИН Ю.Н. | д.ф.-м.н. |
| | 01.01.07 | |
| 11. | КОВАЛЕВ В.Ф. | д.ф.-м.н. |
| | 05.13.18 | |
| 12. | КОЗЛОВ А.Н. | д.ф.-м.н. |
| | 01.02.05 | |
| 13. | КУЛЕШОВ А.А. | д.ф.-м.н. |
| | 05.13.18 | |
| 14. | ЛУЦКИЙ А.Е. | д.ф.-м.н. |
| | 01.02.05 | |

- | | | |
|-----|-----------------------------|-----------|
| 15. | МАЖУКИН В.И.
05.13.18 | д.ф.-м.н. |
| 16. | ПЕТРОВ И.Б.
01.02.05 | д.ф.-м.н. |
| 17. | ЯКОВОВСКИЙ М.В.
05.13.18 | д.ф.-м.н. |

Вопросы соискателю задали:

д.ф.-м.н., проф. А.Л. Афендииков; академик РАН, д.ф.-м.н., проф. Б.Н. Четверушкин; д.ф.-м.н., с.н.с. А.Е. Луцкий; чл.-корр РАН, д.ф.-м.н., проф. Н.Н. Калиткин; чл.-корр РАН, д.ф.-м.н., проф. Ю.В. Василевский; д.ф.м.н., доц. Я.А. Холодов.

В поддержку диссертации выступили д.ф.м.н., проф. Т.Г. Елизарова, к.ф.-м.н. П.А. Бахвалов, чл.-корр РАН, д.ф.-м.н., проф. В.Ф. Тишкин, академик РАН, д.ф.-м.н., проф. Б.Н. Четверушкин.

По результатам публичной защиты диссертационный совет принял следующее заключение:

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 002.024.03,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УЧРЕЖДЕНИЯ
«ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР ИНСТИТУТ
ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ ИМ. М.В. КЕЛДЫША РАН»
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 02 июля 2020 г. № 4

О присуждении **Родионову Александру Владимировичу**, гражданину Российской Федерации, ученой степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Разработка методов и программ для численного моделирования неравновесных сверхзвуковых течений в приложении к аэрокосмическим и астрофизическим задачам» по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ принята к защите 19 декабря 2019 г., протокол № 11, диссертационным советом Д 002.024.03 на базе Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша Российской академии наук» Федерального агентства научных организаций Российской Федерации по адресу 125047, г. Москва, Миусская пл., 4 (утвержден приказом № 105/нк от 11 апреля 2012 года).

Первоначальная дата защиты, назначенная на 26.03.2020 г., была перенесена связи со сложившейся и развивавшейся неблагоприятной эпидемиологической обстановкой на 21 мая 2020 г. (протокол №4/пз от

19.03.2020 г.), далее на 18 июня 2020 г. (решение от 12.05.2020 г.) и в итоге на 02 июля 2020 г. (решение от 08.05.2020 г.).

Соискатель Родионов Александр Владимирович 1954 года рождения.

В 1977 году соискатель окончил Московский инженерно-физический институт (МИФИ) с присуждением квалификации инженер-физик по специальности «Теоретическая ядерная физика».

Диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук «Расчет пространственных и неравновесных струйных течений, вызванных расширением газа в вакуум» защитил в 1985 году в диссертационном совете при Центральном научно-исследовательском институте машиностроения (ЦНИИМАШ).

Работает ведущим научным сотрудником в Институте теоретической и математической физики (ИТМФ) федерального государственного унитарного предприятия «Российский федеральный ядерный центр - Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики (ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»); ведомственная принадлежность – Государственная корпорация по атомной энергии "Росатом".

Диссертация выполнена в Институте теоретической и математической физики (ИТМФ) федерального государственного унитарного предприятия «Российский федеральный ядерный центр - Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики (ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»); ведомственная принадлежность – Государственная корпорация по атомной энергии "Росатом".

Официальные оппоненты:

1. **Крайко Александр Николаевич** – доктор физико-математических наук, профессор; начальник отдела «Теоретической газовой динамики, аэроакустики, численных методов и математического эксперимента» ФГУП «Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова»;

2. **Босняков Сергей Михайлович** – доктор технических наук; заместитель начальника отделения аэродинамики силовых установок ФГУП

«Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского»;

3. Меньшов Игорь Станиславович – доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник; ведущий научный сотрудник ФГУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук» дали **положительные** отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, г. Москва, в своем **положительном** заключении, подписанном **Титаревым Владимиром Александровичем**, доктором физико-математических наук, ведущим научным сотрудником отдела 24 “Механика”, указала, что диссертация Родионова А.В. является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований получены новые результаты, имеющие 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. Диссертация 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 физико-математических наук, а ее автор Родионов Александр Владимирович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.18.

Соискатель имеет 88 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликованных 84 работ, из них в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК опубликовано 48 работ (всего 94 усл. печ. листов, авторский вклад - 61 усл. печ. лист, 14 статей без соавторов). Недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах, в

которых изложены основные научные результаты диссертации, отсутствуют. Диссертация не содержит некорректных заимствований.

Наиболее значимые научные работы соискателя по теме диссертации:

1. 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.

2. Родионов А.В. Повышение порядка аппроксимации схемы С.К.Годунова // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. – 1987. – Т. 27, № 12. – С. 1853–1860.

3. Родионов А.В. Численный метод решения уравнений Эйлера с сохранением аппроксимации на деформированной сетке // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. – 1996. – Т. 36, № 3. – С. 117–129.

4. Родионов А.В. Моделирование истечения пространственных многофазных струй с поверхности ядра кометы // *Астрономический вестник*. – 1996. – Т.30, №3.–С. 265–275.

5. Родионов А.В. Новый маршевый метод расчета струй продуктов сгорания // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. – 2002. – Т. 42, № 7. – С. 1093–1104.

6. Rodionov A.V. On the use of Boussinesq approximation in turbulent supersonic jet modeling // *Int. J. of Heat and Mass Transfer*. – 2010. – V. 53. – P. 889–901.

7. Родионов А.В. Сопоставление схемы КАБАРЕ со схемами типа MUSCL // *Матем. Моделирование*. – 2013. – Т. 25, № 9. – С. 109–136.

8. Родионов А.В. О взаимосвязи разрывного метода Галеркина со схемами MUSCL-типа // *Матем. Моделирование*. – 2015. – Т. 27, № 10. – С. 96–116.

9. Rodionov A.V. Artificial viscosity in Godunov-type schemes to cure the carbuncle phenomenon // *J. Comput. Phys*. – 2017. – V. 345. – P. 308–329.

10. Rodionov A.V. Artificial viscosity to cure the carbuncle phenomenon: The three-dimensional case // *J. Comput. Phys*. – 2018. – V. 361. – P. 50–55.

11. Родионов А.В. Искусственная вязкость для подавления численной неустойчивости типа «карбункул» в расчетах трехмерных задач – Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. –2018. –Вып.3. –С. 44–51.

12. Rodionov A.V. Artificial viscosity to cure the shock instability in high-order Godunov-type schemes // Computers and Fluids. – 2019. – V. 190. – P. 77–97.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы ведущей организации, официальных оппонентов и на автореферат поступили семь отзывов. **Все отзывы положительные.** В отзывах содержатся следующие замечания:

***Ведущая организация** ФИЦ «Информатика и управление» РАН:*

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 говорит, 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. Титарев, 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.

Официальный оппонент д.ф.-м.н., проф. Крайко А.Н.:

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 (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. 17ю № 2. С. 18-26 (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 рассмотрены в статье: Крайко А.Н. О поверхностях разрыва в среде, лишенной собственного давления // ПММ. 1979. Т. 43. Вып. 3. С. 500-510 и вновь повторены в: 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.

Официальный оппонент д.т.н. Босняков С.М.:

1. Недостаточно продуманная последовательность изложения и использования материала в диссертации. Методические разделы в

обоснование преимуществ предложенного автором метода ГКР размещены в главах 4 и 5. С другой стороны, практические аспекты работы изложены в главах 1 – 3. При этом, важные теоретические разработки автора, такие как ограничитель NOLD в методе ГКР, новый вариант схемы КАБАРЕ для течений с разрывами, улучшенный вариант схемы Галеркина с алгоритмом «супер-сходимости», искусственная вязкость для улучшения свойств схемы Годунова на скачках в рабочий вариант расчетной методологии и разработанные программы NARJ и RZC не вошли.

2. Разработанные автором программы NARJ и RZC описаны достаточно формально, что не позволяет судить о степени их программного совершенства.

3. При проведении верификации и валидации разработанной методологии и программ автор не использует технически обоснованных критериев, чтобы обосновать понятие «хорошее соответствие». Например, на рис. 2.28 (страница 93) при $\lambda > 0.3$ наблюдается значительное отклонение расчетных и экспериментальных данных в логарифмическом масштабе. На взгляд трудно оценить, является это соответствие хорошим или нет.

4. В диссертации наблюдаются досадные сбои индексации. Так, рисунок 2.28 находится на странице 93, другой рисунок на странице 94 имеет тот же номер 2.28. В оглавлении на странице 3 легко обнаружить два параграфа с номером 2.5.3. Имеются и другие недочеты.

5. В диссертации отсутствуют данные, которые позволяют оценить степень отличия методологии организации маршевого расчета в дозвуковых областях струи, предложенной автором, от методологии, описанной в диссертации Vigneron (1978).

6. Предложенная автором альтернативная форма тензора турбулентных напряжений является техническим приемом, который путем отказа от принципа симметрии решает проблему перепроизводства турбулентности в рамках поставленной узкой задачи истечения неизобарических струи.

Обоснованность широкого применения предложенных уравнений на практике не доказана.

7. Предложенный автором ограничитель NOLD имеет заметное преимущество, но использует расширенный шаблон, что ставит вопрос о реализации граничных условий.

*Официальный оппонент д.ф.-м.н. **Меньшов И.С.**:*

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 приводить 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 гоуновского 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 погранслойные 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.

В отзывах на автореферат содержатся следующие замечания:

1) *В отзыве Суржикова Сергея Тимофеевича, академика РАН, главного научного сотрудника ФГБУН «Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского» РАН:*

1. В разделе 2.3 несколько раз упоминается процедура инициирования турбулентности в слоях смешения, предложенная автором, и подчеркивается её важность. Но в автореферате нет её даже краткого описания, что затрудняет оценку результатов, представленных в этом разделе.

2. На рис. 4-10 показаны результаты тестовых расчетов, выполненных автором с использованием комплекса программ NARJ. Для большей наглядности стоило на этих рисунках привести экспериментальные или расчетные данные других авторов для сравнения.

3. Предложенный автором метод искусственной вязкости для подавления численной неустойчивости типа "карбункул" создает дополнительный источниковый член в уравнении для энтропии. В автореферате автор не указывает, проводился ли анализ влияния этого источникового члена на поведение энтропии в поле течения и каковы результаты этого анализа.

2) *В отзыве Лунева Владимира Васильевича, доктора физико-математических наук, профессора, главного научного сотрудника и Липницкого Юрия Михайловича, доктора технических наук, профессора, главного научного сотрудника АО «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения»:*

Замечаний нет.

3) В отзыве **Знаменской Ирины Александровны**, доктора физико-математических наук, профессора, профессора физического факультета ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»:

Замечаний нет.

4) В отзыве **Исаева Сергея Александровича**, доктора физико-математических наук, профессора, заведующего лабораторией фундаментальных исследований ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации»:

Каковы пределы применимости разработанного вычислительного и программного обеспечения по набору определяющих параметров (M , Re)?

5) В отзыве **Быкова Николая Юрьевича**, доктора физико-математических наук, ведущего научного сотрудника НПО вычислительной физики сложных систем ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»:

Замечаний нет.

6) В отзыве **Мордвинцева Геннадия Георгиевича**, доктора технических наук, начальника отделения аэрогазодинамики АО «Корпорация «МИТ»:

Замечаний нет.

7) В отзыве **Усачова Александра Евгеньевича**, доктора физико-математических наук, ведущего научного сотрудника «Научно-Исследовательского Московского комплекса ЦАГИ»:

Во второй главе показан пример расчета обтекания затупленного тела с использованием стандартной $k-\epsilon$ модели турбулентности, в котором происходит нефизическая интенсификация турбулентности. В современных исследованиях стандартная $k-\epsilon$ модель турбулентности практически не используется, вводятся различные поправки, которые устраняют эту проблему.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их широко известной компетенцией в вопросах

вычислительной аэрогазодинамики, применения математического моделирования и математических методов в научных исследованиях. Это подтверждается многочисленными научными публикациями оппонентов и сотрудников ведущей организации (перечень публикаций отражен в сведениях, представленных на сайте организации, где проходила защита).

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

– **разработан** оригинальный метод повышения точности схемы Годунова на базе элементов схемы Колгана и вычислительной процедуры типа предиктор-корректор; новая схема (схема Годунова-Колгана-Родионова или схема ГКР) обобщена на случай моделирования течений неравновесного газа; показана высокая эффективность схемы ГКР при моделировании сложных ударно-волновых течений с неравновесными физико-химическими процессами;

– на базе схемы ГКР **разработана** методика маршевого расчета сверхзвуковых струй, истекающих в спутный дозвуковой поток; новая методика обобщена на случай образования локальной дозвуковой зоны в ядре потока (за диском Маха).

– **построена** комплексная математическая модель течения продуктов сгорания, истекающих из типовых ракетных двигателей на жидком и твердом топливах;

– **разработан** комплекс программ NARJ для численного моделирования одно- и многофазных неравновесных струй продуктов сгорания, истекающих в атмосферу на различных высотах полета;

– впервые **показано**, что в рамках приближения гипотезы Буссинеска (определяет форму тензора турбулентных напряжений в традиционных моделях турбулентности) не удастся адекватно описать процесс затухания волновой структуры неизобарической струи, и что процедура параболизации осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса практически устраняет этот недостаток гипотезы Буссинеска; **получено** строгое теоретическое

объяснение обнаруженного эффекта и **предложена** альтернативная форма тензора турбулентных напряжений, устраняющая обнаруженную проблему в моделировании неизобарических струй;

– **развита** математическая модель ближней атмосферы кометы, включающая в себя несколько моделей производства газопылевого потока с поверхности и учитывающая многофазную неравновесность и фотодиссоциацию;

– впервые **показано**, что в случае истечения потока частиц с нескольких активных пятен на поверхности кометы, однофракционная модель облака частиц физически неадекватно описывает их движение; **предложена** многофракционная расчетная модель, которая свободна от этого недостатка;

– **разработаны** газодинамические коды в составе комплекса программ RZC, нашедшего применение в научно-исследовательских работах по изучению атмосферы кометы Чурюмова-Герасименко в рамках международного проекта Розетта;

– **предложены** (1) новое представление схемы КАБАРЕ, относящееся к классу схем MUSCL-типа; (2) низкодиссипативная реконструкция-ограничитель NOLD для схемы ГКР, обладающая высокой эффективностью в задачах с разрывами решения; (3) новый вариант разрывного метода Галеркина, обладающий свойством суперсходимости;

– **разработан** метод искусственной вязкости, как универсальный и высокоэффективный способ решения проблемы «карбункул»-неустойчивости в схемах типа Годунова.

Теоретическая значимость исследования заключается в:

– разработке эффективной схемы Годунова-Колгана-Родионова для сквозного расчета течений совершенного и неравновесных газов;

– выработке комплексной математической модели течения продуктов сгорания, истекающих из типовых ЖРД и РДТТ;

– разработке метода искусственной вязкости, как универсального подхода к решению проблемы «карбункул»-неустойчивости в схемах типа Годунова;

– развитии методики маршевого расчета сверхзвуковых струй с дозвуковыми областями (внешний дозвуковой поток и течение за диском Маха).

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

– предложенная более 30-ти лет тому назад схема Годунова-Колгана-Родионова нашла широкое признание среди отечественных специалистов и используется в различных учебных и научно-исследовательских институтах, таких как ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского, ЦИАМ им. П.И. Баранова, ЦНИИМАШ, РФЯЦ–ВНИИЭФ, МАИ им. С. Орджоникидзе;

– разработанные соискателем программы нашли практическое применение в Московском институте теплотехники, ЦНИИМАШ, РФЯЦ–ВНИИЭФ, а также в Лаборатории аэрономии Национального центра научных исследований (Франция).

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

– достоверность разработанных в диссертационной работе моделей, методов и программ подтверждена результатами их верификации и валидации;

– верификация проводилась путем сопоставления результатов расчетов с известными аналитическими и эталонными решениями тестовых задач (одномерные и многомерные задачи; решения линейных уравнений, уравнений Эйлера и уравнений Навье-Стокса), с расчетами других авторов, а также с экспериментальными данными (данные по натурным и модельным исследованиям сверхзвуковых неизобарических струй).

Личный вклад соискателя состоит следующем:

– представленные в диссертации численные методы (схема ГКР, методика маршевого расчета сверхзвуковых струй с дозвуковыми областями, реконструкция-ограничитель NOLD, новые представления схемы КАБАРЕ и разрывного метода Галеркина, метод искусственной вязкости для подавления «карбункул»-неустойчивости) разработаны автором лично;

– комплекс программ NARJ и газодинамические коды в составе комплекса программ RZC разработаны автором лично;

– разработка математических моделей проводилась автором как лично (новая форма тензора турбулентных напряжений, многофракционная модель для расчета облака частиц), так и с участием соавторов (математическая модель продуктов сгорания ракетных топлив, математическая модель ближней атмосферы кометы) при определяющем вкладе соискателя;

– вклад соискателя в опубликованные работы является определяющим.

На заседании 02 июля 2020 года диссертационный совет принял решение присудить Родионову А. В. ученую степень доктора физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 5 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, из 24 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 17, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Председатель

диссертационного совета Д002.204.03

академик РАН, д.ф.-м.н, профессор

Четверушкин Б. Н.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д002.204.03

к.ф.-м.н.

Корнилина М. А.

02 июля 2020 года.