

## Результаты публичной защиты

Дата защиты: 12 апреля 2018 г.

Соискатель: **Титарев Владимир Александрович.**

Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук на тему: «Численное моделирование пространственных течений разреженного газа с использованием суперЭВМ».

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

На заседании председательствует – Председатель диссертационного совета, академик РАН, д.ф.-м.н., профессор Б.Н. ЧЕТВЕРУШКИН.

Ученый секретарь – к.ф.-м.н. М.А. КОРНИЛИНА.

На заседании из 25 членов диссертационного совета присутствовали 21, из них 7 докторов по профилю рассматриваемой диссертации:

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. ГОЛОВИЗНИН В.М.	д.ф.-м.н.	01.02.05
8. ДОЛГОЛЕВА Г.В.	д.ф.-м.н.	01.01.07
9. ЕЛИЗАРОВА Т.Г.	д.ф.-м.н.	01.02.05
10. ЗМИТРЕНКО Н.В.	д.ф.-м.н.	01.02.05
11. КАРАМЗИН Ю.Н.	д.ф.-м.н.	01.01.07
12. КОВАЛЕВ В.Ф.	д.ф.-м.н.	05.13.18
13. КОЗЛОВ А.Н.	д.ф.-м.н.	01.02.05
14. КОЛЕСНИЧЕНКО А.В.	д.ф.-м.н.	05.13.18
15. КУЛЕШОВ А.А.	д.ф.-м.н.	05.13.18
16. ЛУЦКИЙ А.Е.	д.ф.-м.н.	01.02.05
17. МАЖУКИН В.И.	д.ф.-м.н.	05.13.18
18. ПЕТРОВ И.Б.	д.ф.-м.н.	01.02.05
19. ПОЛЯКОВ С.В.	д.ф.-м.н.	01.01.07
20. ШПАТАКОВСКАЯ Г.В.	д.ф.-м.н.	05.13.18
21. ЯКОБОВСКИЙ М.В.	д.ф.-м.н.	05.13.18

По результатам публичной защиты диссертационный совет принял следующее заключение:

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 002.024.01,  
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
УЧРЕЖДЕНИЯ «ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ ИМ. М.В. КЕЛДЫША РАН»  
(ФАНО РОССИИ)  
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ  
ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от « 12 » апреля 2018 г., № 12

О присуждении **Титареву Владимиру Александровичу**, гражданину Российской Федерации, ученой степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Численное моделирование пространственных течений разреженного газа с использованием суперЭВМ» по специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» принята к защите 11 января 2018 года (протокол заседания № 1) диссертационным советом Д002.024.03 на базе ФГУ ФИЦ «Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН», 125047, Москва, Миусская пл., д.4, приказ №105/нк от 11 апреля 2012 года.

Соискатель Титарев Владимир Александрович, 1976 года рождения, работает ведущим научным сотрудником в ФГУ ФИЦ "Информатика и управление" Российской академии наук, ФАНО России (ФИЦ ИУ РАН).

Диссертацию на соискание ученой степени доктора физико-математических наук "Численное решение некоторых задач для модельного кинетического уравнения Больцмана" защитил в 2004 году, в диссертационном совете, созданном на базе ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)».

Диссертация выполнена в отделе механики ФГУ ФИЦ «Информатика и управление» Российской академии наук.

**Официальные оппоненты:**

1. **Дерюгин Юрий Николаевич**, доктор физико-математических наук, с.н.с, главный научный сотрудник Института теоретической и математической физики Федерального государственного унитарного предприятия **РОССИЙСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ЯДЕРНЫЙ ЦЕНТР** Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики ФГУП «РФЯЦ – ВНИИЭФ», г. Саров;

2. **Зайцев Дмитрий Кириллович**, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры «Гидроаэродинамика, горение и теплообмен» ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург;

3. **Кустова Елена Владимировна**, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры Гидроаэромеханики ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет», г. Санкт-Петербург,

дали **положительные** отзывы на диссертацию.

**Ведущая организация ФГБУН Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН (ФАНО России)** в своем положительном отзыве, подписанном сотрудниками лаборатории разреженных газов Ребровым Алексеем Кузьмичем, главным научным сотрудником, академиком РАН, доктором физико-математических наук; Сухининым Геннадием Ивановичем, главным научным сотрудником, академиком РАН, доктором физико-математических наук; и Плотниковым Михаилом Юрьевичем, кандидатом физико-математических наук, старшим научным сотрудником, указала, что диссертация Титарева В.А. является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований получены новые научные результаты, имеющие существенное значение для науки и практики. Совокупность полученных результатов можно квалифицировать как крупное

научное достижение в области численного моделирования течений разреженного газа. Работа отвечает требованиям Постановления Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 "О порядке присуждения ученых степеней", предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора наук, а её автор, Титарев Владимир Александрович, заслуживает присуждения ему учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Соискатель имеет 95 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации 30 работ в рецензируемых научных изданиях, включая 10 работ без соавторов. Результаты диссертации опубликованы как в ведущих российских журналах (Журнал вычисл. математики и мат. физики; Известия РАН. Механика жидкости и газа), так и в ведущих международных изданиях, включая журналы из первого и второго квартилей (J. Comp. Phys.; Computers & Fluids; Comm. in Comp. Phys., Eur. J. Mech. B Fluids). Основные результаты работы были представлены многочисленных российских и международных конференций, включая приглашенные доклады на следующих конференциях:

- European Workshop on High Order Nonlinear Numerical Methods for Evolutionary PDEs (HONOM 2011), University of Trento, Italy, April;
- 28th International Symposium on Rarefied Gas Dynamics, Zaragoza, Spain, July 9-13th, 2012;
- The Third Russian-Chinese Workshop on Numerical Mathematics and Scientific Computing, ИВМ РАН, 11 - 13 сентября 2013 года;
- HONOM - Conference on High Order Numerical Methods for Evolutionary PDEs, Штутгарт, Германия, 27-31 марта 2017 г.;
- The 29th International Conference on Parallel CFD, the University of Strathclyde, Glasgow, Scotland, 15-17 May 2017.

К числу наиболее значительных работ соискателя можно отнести следующие публикации:

1. **V.A. Titarev.** Conservative numerical methods for model kinetic equations // *Computers and Fluids*. 2007. V. 36, № 9. P.1446--1459. (2 печатных листа, WoS, Scopus, Q1).
2. M. Dumbser, M. Kaser, **V.A. Titarev**, E.F. Toro. Quadrature-free non-oscillatory finite volume schemes on unstructured meshes for nonlinear hyperbolic systems // *J. Comput. Phys.* 2007. V. 226, № 2. P. 204-243. (4.4 печатных листа, WoS, Scopus, Q1).
3. **В.А. Титарев.** Неявный численный метод расчета пространственных течений разреженного газа на неструктурированных сетках // *Ж. вычисл. матем. и матем. физ.* 2010. Т. 50, № 10. С. 1811--1826 (*перевод V.A. Titarev. Implicit numerical method for computing three-dimensional rarefied gas flows using unstructured meshes // Computational Mathematics & Mathematical Physics. 2010. V. 50. N. 10. p. 1719–1733*). (2 печатных листа, WoS, Scopus, Q2).
4. P. Tsoutsanis, **V.A. Titarev**, D. Drikakis. WENO schemes on arbitrary mixed-element unstructured meshes in three space dimensions // *J. Comput. Phys.* 2010. V. 230. P. 1585 – 1601 (1.8 печатных листа, WoS, Scopus, Q1).
5. **V.A. Titarev.** Implicit high-order method for calculating rarefied gas flow in a planar microchannel // *J. Comput. Phys.* 2012. V. 231. N. 1. P. 109--134. (2.8 печатных листа, WoS, Scopus, Q1).
6. **V.A. Titarev.** Efficient deterministic modelling of three-dimensional rarefied gas flows // *Commun. Comput. Phys.* 2012. V. 12, No. 1. P. 161--192. (2.5 печатных листа, WoS, Scopus, Q1).
7. **V.A. Titarev**, E.M. Shakhov. Computational study of a rarefied gas flow through a long circular pipe into vacuum // *Vacuum, Special Issue 'Vacuum Gas Dynamics: Theory, experiments and practical applications'*. 2012. V. 86, No 11. P. 1709--1716. (1 печатный лист, WoS, Scopus, Q3).

8. **V.A. Titarev.** Rarefied gas flow in a circular pipe of finite length // Vacuum. 2013. V. 94. P. 92--103. (1.5 печатных листа, WoS, Scopus, Q3).

9. **V.A. Titarev, M. Dumbser, S.V. Utyuzhnikov.** Construction and comparison of parallel implicit kinetic solvers in three spatial dimensions // J. Comput. Phys. 2014. V. 256. P. 17--33 (1.8 печатных листа, WoS, Scopus, Q1).

10. **V.A. Titarev, E.M. Shakhov.** Rarefied gas flow into vacuum through a pipe composed of two circular sections of different radii // Vacuum. Special Issue "Advances in Vacuum Gas Dynamics". 2014. V. 109. P. 236--245. (1.25 печатных листа, WoS, Scopus, Q3).

11. **В.А. Титарев, С.В. Утюжников, А.В. Чикиткин.** OpenMP+MPI параллельная реализация численного метода для решения кинетического уравнения // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2016. Т. 56, № 11. С. 1949--1959 (1.2 печатных листа, WoS, Scopus, Q2).

12. **V.A. Titarev.** Numerical modeling of high-speed rarefied gas flows over blunt bodies using model kinetic equations // European Journal of Mechanics / B Fluids, Special Issue on Non-equilibrium Gas Flows. 2017. V. 64. P. 112--117. (0.8 печатного листа, WoS, Scopus, Q2).

Вклад автора в совместные работы заключался в разработке численного метода, формулировке тестовых задач, написании программного кода, проведении вычислений, анализе результатов и написании публикаций. Недостоверных сведений в тексте диссертации об опубликованных соискателем работах не выявлено.

**На диссертацию и автореферат поступили следующие отзывы:**

**Отзыв официального оппонента д.ф.-м.н., с.н.с. Дерюгина Ю.Н.**

В отзыве указаны следующие замечания:

1. Предлагаемая методология решения пространственных течений разреженного газа отражает общие идеи, используемые при создании комплексов инженерного анализа для решения задач механики сплошных

сред. Основными потребителями таких комплексов являются специалисты других специальностей: экспериментаторы, конструктора, расчетчики и т.д. Поэтому, в части методологии решения, по-видимому, больше надо было уделить внимание вопросам, как облегчить труд пользователей таких комплексов, у которых нет возможности проведения полномасштабных исследований при решении конкретных задач. В связи с этим также возникают следующие вопросы: возможно ли включение методов моделирования разреженных течений в коды инженерного анализа, как изменится методология решения и что для этого надо сделать?

2. Основное внимание при построении решения кинетического уравнения с приближенным интегралом столкновения уделено одноатомному газу, что может быть оправданно для течения в микроэлектромеханических устройствах. Однако для задач аэродинамики космических аппаратов больший интерес представляют двухатомные молекулы. Может ли развиваемый автором подход быть обобщен на многоатомные молекулы?

3. Во второй главе отмечается, что методика построена на использовании как многоблочных структурированных, так и произвольных неструктурированных сеток независимо в физическом и скоростном пространствах. Если в физическом пространстве использование неструктурированных сеток определяется геометрией задачи и возможностью генератора сеток, то для построения скоростной сетки дается только оценка линейного размера ячеек и нет информации о качестве скоростной сетки и методах ее построения. Отметим, что частный пример построения скоростной сетки приводится только в пятой главе.

4. При представлении методик было бы желательно привести результаты численных исследований (расчеты на сходимость, порядок сходимости, зависимость результатов от способов реконструкции и т.д.) на задачах имеющих аналитическое или известное решение, которые бы демонстрировали возможности разработанных методик. Отметим, что такие исследования приведены в четвертой главе на одном классе задач.

5. По направлениям аэродинамики, гидродинамики, газовой динамики, прочности и т.д. создаются верификационные базы для проверки расчетных методик. Хотелось бы услышать позицию автора диссертации по вопросу создания верификационной базы для течения разреженного газа и возможности ее реализации.

6. При описании двухуровневого распараллеливания вычислений не указан способ декомпозиции расчётной сетки на верхнем уровне MPI-распараллеливания.

7. В настоящее время в современных процессорах реализована возможность векторизации вычислений. В связи с этим встает вопрос, почему в созданных автором пакетах программ не используется векторизация вычислений, которая является общепринятым третьим уровнем распараллеливания?

8. Для двухуровневого распараллеливания (MPI + OpenMP) указано ускорение в 1.5 раза по сравнению с чисто MPI-распараллеливанием. Было бы желательно привести условия проведения численного эксперимента: количество вычислительных ядер, количество MPI-процессов и количество OpenMP-потоков.

9. Не уточняется, есть ли в программе конфликты доступа к памяти при OpenMP-распараллеливании и способы решения этой проблемы.

10. В результате проведенных численных исследований дано обоснование применимости созданных автором расчетных моделей к решению широкого класса задач внутренних и внешних течений разреженного газа, однако отсутствуют яркие примеры использования результатов моделирования для решения практических задач, связанных с разработкой новых образцов техники.

**Отзыв официального оппонента д.ф.-м.н., доцента Зайцева Д.К.**

В отзыве указаны следующие замечания:



1) В диссертации не приводятся данные о сравнительной вычислительной эффективности популярного метода прямого статистического моделирования течений разреженного газа и развиваемого автором метода на основе решения приближенного кинетического уравнения. Было бы крайне интересно, в частности, сравнить время расчета гиперзвукового обтекания спускаемого аппарата с помощью разработанного комплекса «Несветай» и известного комплекса SMILE.

2) Расчеты течения газа через микроканалы конечной длины выполнены в полной трехмерной постановке без учета очевидных условий симметрии, что увеличило вычислительные затраты, как минимум, в четыре раза (при том, что время расчета одного варианта на мощнейшем кластере России доходило до 14 дней). Из текста диссертации неясно, чем обусловлена такая расточительность.

3) При решении задачи об истечении газа в вакуум в упрощенной постановке без расчета течения во входном резервуаре, автор задает на входе в канал условие «испарения», которое не учитывает наличия средней скорости направленного движения молекул. Принимая во внимание, что для некоторых рассмотренных вариантов скорость направленного движения газа сопоставима с тепловой скоростью молекул (например, на рисунке 4.47 число Маха на входе в канал более 0.4), такое приближение представляется неоправданно грубым. Возможно, именно это явилось одной из причин отмеченной автором большой погрешности такого упрощенного расчета при малых числах Кнудсена.

#### **Отзыв оппонента д.ф.-м.н., доцента Кустовой Е.В.**

В отзыве указаны следующие замечания:

1. При построении математической модели и в разработанных программных комплексах не учитываются внутренние степени

свободы молекул и химические реакции. Утверждается, что при верном выборе числа Прандтля точность определения аэродинамических коэффициентов слабо зависит от учета внутренней энергии. Однако данный вывод сделан на основе решения некоторых частных задач, в которых роль возбуждения внутренних степеней свободы не слишком велика. В гиперзвуковых течениях, особенно при учете каталитических свойств поверхности, пренебрежение физико-химическими процессами может приводить к заметной потере точности при расчете тепловых потоков.

2. Использование модельного уравнения накладывает некоторые ограничения на условия решаемых задач, в частности, оно может применяться в случае достаточно слабых отклонений от равновесия. При этом полное уравнение Больцмана применимо при произвольной степени отклонения от равновесия. Интересно было бы на примере решения конкретных задач в полной и модельной постановке выявить критерии применимости модельного уравнения.

3. В работе отмечаются сложности реализации предложенного метода численного моделирования при малых числах Кнудсена. При этом не совсем понятна целесообразность применения именно кинетического подхода в условиях, когда методы механики сплошной среды дают вполне удовлетворительную точность. Каково преимущество подхода, развиваемого автором, при малых  $K_n$  по сравнению с решением уравнений Навье-Стокса с учетом граничных условий скольжения и скачка температуры? Вероятно, следует более четко определить условия, при которых действительно необходимо применение кинетического подхода, особенно для задач гиперзвуковой аэродинамики тел сложной геометрии.

4. В диссертации используется граничное условие диффузного отражения на поверхности (и зеркального отражения от плоскости симметрии). Возможно ли обобщение модели на случай аккомодации

импульса и энергии на поверхности? Есть ли принципиальные трудности при постановке более реалистичных граничных условий?

**Отзыв ведущей организации – ФГБУН Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН.** В отзыве указаны следующие замечания:

1. Разработанный численный метод представляется как альтернатива методу прямого статистического моделирования (ПСМ), который является в настоящее время наиболее популярным инструментом для моделирования течений разреженного газа. В работе в нескольких местах представлены сравнения с результатами ПСМ расчетов, получено хорошее согласие. Однако в работе отсутствуют данные о трудоемкости разработанного численного алгоритма. В связи с этим не понятно, какой же численный подход, ПСМ или решение модельного уравнения, является более эффективным и менее ресурсозатратным для решения конкретных прикладных задач.

2. Не понятно, как связана трудоемкость численного алгоритма и число Кнудсена моделируемого течения. При каких минимальных числах Кнудсена можно рассчитывать трехмерное обтекание тел сложной геометрической формы? Возможно ли рассчитывать течения для режимов, близких к сплошной среде?

3. В диссертации представлены результаты по решению только стационарных задач. В связи с этим не понятно, насколько разработанный численный метод пригоден для решения нестационарных задач.

4. Существенным недостатком рассматриваемого метода является невозможность учитывать внутренние степени свободы молекул, рассчитывать смеси газов и учитывать химические реакции. Это значительно ограничивает возможности метода для решения прикладных задач.

5. В формуле (4.1.2) расход газа через отверстие в безразмерном виде при свободномолекулярном течении представлен как  $M_0^{отв} = A/(\sqrt{\pi})$ , тогда как должно быть  $M_0^{отв} = A/(2\sqrt{\pi})$  (см. ссылку [141] диссертации).

6. В одном из основных выводов работы указано, что "применение метода к задаче гиперзвукового обтекания тел обеспечивает ускорение счета до 1000 раз по сравнению с общепринятыми схемами решения кинетических уравнений". Однако в тексте диссертации ничего не говорится о таком большом ускорении счета.

7. В одном из основных выводов работы написано: "Впервые проведена количественная оценка точности моделирования гиперзвуковых течений разреженного газа на основе численного решения модельного кинетического уравнения. Показано, что при больших числах Маха около тела возникают параметры течения, которые соответствуют условию применимости S-модели." Однако именно *количественная* оценка точности в диссертации не приведена, есть просто демонстрация хорошего согласия с результатами ПСМ расчетов. При этом точность самого ПСМ решения не ясна. С другой стороны отметим, что условия применимости S-модели в диссертации в явном виде нигде не сформулированы. В целом в формулировке этого вывода не ясно, как связана информация о возникновении параметров течения, соответствующих условиям применимости S-модели, с количественной оценкой точности расчетов.

8. В диссертации встречается нечеткость в изложении результатов. Например, на стр. 132 в таблице 4.18 длина канала  $L$  является размерной величиной, а в формуле (4.5.16) на той же странице  $L$  является уже безразмерной величиной. При постулировании факта линейной зависимости изменения расхода от радиуса выходного сечения канала в формуле (4.6.27) желательно для наглядности в дополнение к представленной таблице (4.21) привести график получившейся зависимости.

**На автореферат диссертации поступило восемь положительных отзывов.**

В отзыве **Ивана Владимировича Егорова**, доктора физико-математических наук, член-корреспондент РАН, главного научного сотрудника, и **Александра Ивановича Ерофеева**, доктора технических наук, ФГУП ЦАГИ имени профессора Н.Е. Жуковского, имеется следующее замечание: «Основным замечанием является то, что в диссертации рассматривается только одноатомный газ, без учета внутренних степеней свободы молекул. Это сужает область приложений методологии и программ».

В отзыве **Юрия Петровича Улыбышева**, доктора технических наук, руководителя НТЦ, и **Андрея Николаевича Крылова**, кандидата физико-математических наук, начальника сектора, ПАО РКК “Энергия” им. С.П. Королева, содержатся следующие замечания:

1. Все вычисления проводятся на основе кинетических моделей одноатомного газа. Ничего не сказано о применимости разработанных методов для численного моделирования течений двухатомных газов.

2. В автореферате приведены сравнительные данные расчетов автора с расчетами по методу ПСМ, включающие распределения коэффициентов давления, трения и теплоотдачи для различных тел, но отсутствует сравнение интегральных аэродинамических характеристик.

3. Из текста автореферата неясно проводилось ли сравнение результатов численных расчетов с экспериментальными данными по суммарным и аэродинамическим характеристикам.

4. В автореферате отсутствуют пояснения к некоторым рисункам, например на рисунке 5 введен параметр  $Q$ , который не объяснен.

В отзыве **Романа Вячеславовича Ковалева**, кандидата физико-математических наук, начальника Центра 2, **Георгия Николаевича Залогина**, доктора технических наук, главного научного сотрудника отдела 2101 и **Андрея Леонидовича Кусова**, кандидата физико-математических

наук, старшего научного сотрудника отдела 2101, ФГУП “ЦНИИмаш”, содержатся следующее замечание: «В работе проведены расчёты обтекания модели перспективного транспортного корабля потоком гиперзвукового одноатомного газа, но при этом не учтены эффекты реального газа, поэтому данные расчёты можно рассматривать лишь как модельные, демонстрирующие возможность решения упрощённого уравнения Больцмана для гиперзвуковых течений около КА».

В отзыве **Андрея Владимировича Горобца**, доктора физико-математических наук, ведущего научного сотрудника Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, содержатся следующие замечания: «В области параллельных вычислений к работе имеются некоторые замечания. Например, приведены графики параллельного ускорения, которые показывают, как ускоряется расчет при увеличении числа задействованных ускорителей. А задействуются 60-ядерные ускорители с 4-поточными ядрами. На графиках (вероятно, для пущей эффектности) указано суммарное число параллельных потоков, пугающее читателя значениями, превышающими 60 тысяч. При этом данных по параллельной эффективности и по фактической достигаемой производительности на данном ускорителе не приводится. Было бы интересно узнать, например, какое внутреннее ускорение получается при использовании 60 ядер относительно последовательного режима на ускорителе? А какое соотношение в производительности по сравнению с многоядерными центральными процессорами? Используется ли в явном виде векторизация, и какой она дает эффект? Конечно, данные замечания едва ли можно отнести к недостаткам такой большой и комплексной работы. Понятно, что нельзя объять необъятное, чтобы было исследовано совсем уж всё, что только можно, по всем релевантным областям».

В отзыве **Феликса Маратовича Шарипова**, кандидата физико-математических наук, профессора кафедры физики Федерального Университета штата Парана, Бразилия, содержится следующее замечание:

«Следует отметить, что сравнение с экспериментальными данными на рисунке 5 следует проводить с указанием интервала экспериментальной ошибки. В этом случае будет видно, что теоретические результаты совпадают с экспериментом в пределах этой ошибки».

В отзыве **Алексея Николаевича Кудрявцева**, доктора физико-математических наук, старшего научного сотрудника Лаб. 7 Вычислительной аэродинамики Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, содержится следующее замечание по последней главе: «Непонятно, каким образом с помощью модельного кинетического уравнения Шахова автору удалось провести расчеты для двухатомных газов. Если просто положить число Прандтля равным значению для этого газа, то это, как мне кажется, не означает, что показатель адиабаты примет правильное значение. Далее, при тех значениях числа Маха и температуры торможения, что используются в расчетах, несомненно, происходит возбуждение колебательных степеней свободы и идут химические реакции. Имеет ли смысл сравнивать результаты расчетов модельного кинетического уравнения, где все эти эффекты не учитываются, с данными метода прямого статистического моделирования, в которых они, очевидно, присутствуют?».

В отзыве **Александра Михайловича Бишаева**, доктора физико-математических наук, профессора кафедры Высшей математики МФТИ, имеются следующие замечания: «В качестве замечания следует отметить, что в некоторых случаях особенно для сравнения результатов с аналогичными, но полученными методами статистического моделирования, лучше было бы использовать кинетические модели, учитывающие вращательные и поступательные степени свободы. Тем более, что такие модели имеются. Можно также отметить, что в диссертации отсутствуют результаты моделирования принципиально нестационарных явлений, что можно было бы сделать для оценки эффективности разработанных методов».

В отзыве **Сергея Александровича Исаева**, профессора кафедры механики Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации, доктора физико-математических наук, профессора, имеются следующие замечания:

1. Каковы пределы применимости разработанного вычислительного и программного инструмента по набору определяющих параметров ( $M, Re$ )?
2. Каковы перспективы доработки комплекса для расчета обтекания на низких высотах, включая турбулентные режимы?

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их широко известной компетенцией в вопросах механики жидкости, газа и плазмы, разработки численных методов и алгоритмов их решения. Это подтверждается многочисленными научными публикациями оппонентов и сотрудников ведущей организации, такими как:

1) Дерюгин Ю.Н., Саразов А.В., Жучков Р.Н. особенности построения методики расчёта на сетках типа «химера» для неструктурированных сеток // Математическое моделирование. Том. 29, N. 2, 2017, С. 106-118

2) Волков К.Н., Дерюгин Ю.Н., Емельянов В.Н., Карпенко А.Г., Козелков А.С., Тетерина И.В. Методы ускорения газодинамических расчетов на неструктурированных сетках // Москва, Физматлит, 536 стр., 2013 год.

3) Волков К.Н., Дерюгин Ю.Н., Емельянов В.Н., Козелков А.С., Тетерина И.В. Разностные схемы в задачах газовой динамики на неструктурированных сетках // Москва, Физматлит, 416 стр., 2014 год.

4) Волков К.Н., Дерюгин Ю.Н., Емельянов В.Н., Козелков А.С., Тетерина И.В. Алгебраический многосеточный метод в задачах вычислительной физики //Вычислительные методы и программирование: новые вычислительные технологии. Т. 15, N 2, 2014, С. 183-200.

5) Зайцев Д.К., Смирнов Е.М., Смирновский А.А. и др. Численное моделирование течения парогазовой смеси в защитной оболочке при



пассивном отводе тепла // Атомная энергия, 2013, Том 115, Вып. 4, С. 205-210.

6) Khrabry, A., Smirnov, E., Zaytsev, D., Goryachev, V. Numerical study of 2D and 3D separation phenomena in the Dam-Break flow interacting with a triangular obstacle // Periodica Polytechnica, Mechanical Engineering, 2016, Vol. 60, No. 3, pp. 159-166. URL: <https://pp.bme.hu/me/article/view/8948/7044>

7) Istomin V.A., Kustova E.V. Transport coefficients and heat fluxes in non-equilibrium high-temperature flows with electronic excitation // Physics of Plasmas. 2017. Т. 24. № 2. С. 022109.

8) E. V. Kustova and G. P. Oblapenko, Mutual effect of vibrational relaxation and chemical reactions in viscous multitemperature flows // Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics, 2016. Vol. 93, 033127.

9) Г.В. Шоев, Е.А. Бондарь, Г. П. Облапенко и Е.В. Кустова, Разработка и апробация методики численного моделирования термически неравновесных диссоциирующих течений в ANSYS Fluent // Теплофизика и аэромеханика, 2016. Vol. 23, № 2. 159-171

10) K. Rebrov, A. A. Emelyanov, I. B. Yudin. Carbon film deposition from high velocity rarefied flow // Thin Solid Films. – 2015. – V. 575. – P. 113-116.

11) M. Yu. Plotnikov, E. V. Shkarupa. Heterogeneous activation of rarefied hydrogen in thin tubes // Vacuum. – 2016. – Vol. 129. – P. 31–37.

12) А. К. Ребров, И. Б. Юдин. Гетерогенные физико-химические процессы при течении разреженного газа в каналах // ДАН. – 2016. – Т. 468. – № 1. – С. 33.

13) V. Fedoseev, G. I. Sukhinin, A. R. Abdirakhmanov, M. K. Dosbolayev, T. S. Ramazanov. Voids in dusty plasma of a stratified DC glow discharge in noble gases // Contributions to Plasma Physics. – 2016. – V. 56. – P. 234-239.

14) A. Morozov, M. L. Mironova. Numerical analysis of time-of-flight distributions of neutral particles for pulsed laser ablation of binary substances into vacuum // Appl. Phys. A. – V. 123, № 12. – 2017. – P. 783, 1-9.

15) A. Morozov. Analysis of time-of-flight distributions under pulsed laser ablation in vacuum based on the DSMC calculations // Appl. Phys. A. – V. 111, № 4. – 2013. – P. 1107-1112.

**Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:**

**разработан** новый неявный консервативный метод высокого порядка аппроксимации для численного решения кинетического уравнения на произвольных неструктурированных и многоблочных структурированных сетках в шестимерном фазовом пространстве, который позволил качественно расширить круг решаемых задач;

**предложена** оригинальная методика численного моделирования сложных пространственных течений разреженного газа на основе решения кинетического уравнения с модельным интегралом столкновений;

**созданы** программные реализации разработанных численных методов в комплексах параллельных программ Несветай-2Д, Несветай-3Д (свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ N 2017613173 от 10.04.2017 и 2017613138 от 10.04.2017). Комплексы программ протестированы на ведущих российских суперЭВМ; продемонстрирована хорошая масштабируемость при использовании десятков тысяч гиперпотокков;

**проведена верификация и валидация** результатов численного решения кинетических уравнений с приближенными (модельными) интегралами столкновений на сложных пространственных задачах, включая задачи гиперзвукового обтекания тела потоком разреженного газа. Показано хорошее совпадение с экспериментальными данными и результатами метода прямого численного моделирования;

**построено** численное решение задачи о стационарном истечении разреженного газа через канал произвольной длины и формы сечения, вызванного перепадом давления. Показано хорошее согласие расчетов с

имеющимися в литературе результатами для коротких круглых каналов. Уточнены границы применимости существующих приближенных методик;

**построено** корректное численное решение кинетического уравнения для задачи обтекания нескольких трехмерных моделей спускаемого аппарата для чисел Маха набегающего потока до  $M=25$  под углом атаки.

**Теоретическая значимость** исследования обоснована тем, что разработанные методы решения и подходы к их реализации на параллельных ЭВМ вносят существенный вклад в теорию детерминистических численных методов решения кинетического уравнения на произвольных расчетных сетках.

**Значение полученных соискателем** результатов исследования для практики определяется перспективой применения разработанной методологии решения задач, численных методов и комплексов параллельных программ в работе предприятий аэрокосмического комплекса (РКК Энергия им. С.П. Королева подтверждает это в своем отзыве на автореферат) и проведения фундаментальных исследований в механике разреженного газа в научно-исследовательских институтах РАН и других организациях. Многие из предложенных методов и подходов к организации параллельных вычислений могут применяться для решения уравнения Больцмана с точным интегралом столкновений (неявная схема, двухуровневая модель OpenMP+MPI).

**Оценка достоверности результатов** исследования выявила их хорошее согласие с имеющимися в литературе экспериментальными данными по расходу массы для истечения разреженного газа через микроканал, а также с расчетами других российских и иностранных исследователей на основе метода прямого статистического моделирования Монте-Карло и решения точного уравнения Больцмана. Эффективность параллельной реализации численного метода иллюстрирована серий тестовых расчетов как на классических суперЭВМ (системы “Ломоносов” НИВЦ МГУ, “Торнадо” СПбПУ Петра Великого и кластер лаборатории МФТИ), так и гибридных

системах “РСК-Петастрим”, установленных в МСЦ РАН и СПбПУ Петра Великого.

**Личный вклад соискателя** состоит в непосредственном участии в постановке задач, разработке численного метода, написании комплексов прикладных программ, разработке и практической реализации модели параллельных вычислений, проведении прикладных расчетов, анализе и визуализации полученных результатов, написании научных публикаций.

На заседании 12 апреля 2018 года диссертационный совет принял решение присудить Титареву В.А. ученую степень доктора физико-математических наук. При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 21 человек, из них 7 докторов, участвовавших в заседании, из 25 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за 21, против - нет, недействительных бюллетеней - нет.

Председатель диссертационного совета Д 002.024.03  
академик РАН, д.ф.-м.н.

Б.Н. Четверушкин

Ученый секретарь диссертационного совета Д 002.024.03,  
к.ф.-м.н.

М.А. Корнилина

12 апреля 2018 г.