

Вх. № 8/22

от 31.05.2022г.

## ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук  
Пяткова Сергея Григорьевича на диссертационную работу  
**Быковских Дмитрия Александровича**  
**«Моделирование течения газа Кнудсена в трехмерной области  
методом Монте-Карло»,**  
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-  
математических наук по специальности 1.2.2. Математическое  
моделирование, численные методы и комплексы программ

### **Актуальность темы диссертационного исследования**

Диссертация посвящена аналитическому и численному исследованию ряда математических моделей газовой динамики. Большое внимание уделено численному моделированию. В частности, разработаны метод и алгоритмы расчета движения кнудсеновского газа в трехмерной изменяющейся во времени области, разработан отлажен и протестирован комплекс проблемно-ориентированных программ для численного решения задач кинетики идеального бесстолкновительного газа в трехмерном пространстве, с учетом возможности распараллеливания и оптимизации программного кода, проведено численное исследование задачи фильтрации идеального бесстолкновительного газа в пористой среде и проведен анализ полученных результатов. В качестве основного метода численного решения использован метод Монте-Карло.

Исследование и анализ параметров течения невзаимодействующих друг с другом частиц газа в трехмерной области с подвижными и неподвижными границами имеет важное прикладное значение в задачах, связанных с управлением высокотехнологичными процессами и созданием передовых разработок в современных отраслях промышленности. Первоначально движение такого вида частиц, именуемых газом Кнудсена, было связано с исследованием околокосмического пространства и созданием специальных технических устройств с высоким вакуумом. С появлением и развитием атомной энергетики возник ряд новых задач, в которых требуется учитывать специальные локальные зоны, так называемые области фокусировки, в которых при сжатии нейтронного газа происходит неограниченный рост энергии в определенный момент или короткий промежуток времени. Например, при расчете надежности конструкций атомных реакторов необходимо учитывать кумулятивные эффекты, возникающие при движении тепловых нейтронов в тяжелой жидкости с изменяющимися с течением времени границами в трехмерной области. Другое актуальное направление исследований - исследования, связанные с фильтрацией газа в пористых средах. Подобные вопросы возникают, например, в вопросах интенсификации нефтедобычи и во многих других областях.



Результаты диссертационной работы имеют практическое значение для исследований проблем динамики разреженного газа, статистической физики, нефтегазовой отрасли, атомной и промышленной энергетики и оптики.

### **Анализ структуры и содержания диссертационной работы**

Диссертация изложена на 116 страницах, состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы, содержит 28 рисунков и 17 таблиц.

**Во введении** представлена актуальность работы; сформулированы цели и задачи; приведены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы; выносимые на защиту положения; отражен личный вклад автора.

**В первой главе** приведен обзор исследований задач газовой динамики, а также задач из смежных областей; рассмотрены точные решения задач газовой динамики с наличием границ; представлен обзор статистических методов, связанных с моделированием течения газа, включая преимущества и недостатки; выделены проблемы и способы адаптации алгоритмов и программ для современных высокопроизводительных вычислительных систем.

**Во второй главе** представлены математическая модель и разработанный вычислительный метод, основанный на методе Монте-Карло, предназначенные для моделирования течения газа Кнудсена в трехмерной области с подвижными границами. Описано обезразмеривание физических величин. Рассмотрены способы оценки погрешностей полученных результатов.

**В третьей главе** приведено описание разработанного проблемно-ориентированного комплекса программ расчета течения газа Кнудсена в трехмерной области с подвижными границами; осуществлена верификация комплекса программ задаче о столкновении встречных пучков газа, имеющей аналитическое решение, включая оценку производительности разработанного проблемно-ориентированного комплекса программ.

**В четвертой главе** рассматривается модель адиабатического сжатия газа Кнудсена в одномерной и трехмерной областях. Представлен класс точных решений для газа Кнудсена с подвижной границей. Дополнительно выполнено численное исследование задачи об адиабатическом сжатии газа Кнудсена, который верифицирован путем сравнения численных расчетов с найденными точными решениями математической модели адиабатического сжатия газа Кнудсена в трехмерной области с подвижной границей.

**В пятой главе** рассматривается численное исследование задачи фильтрации идеального бесстолкновительного газа в пористой среде. Представлены формулы расчета коэффициента фильтрации для идеального газа. Проведено исследование по установлению зависимости между скоростью течения и скоростью фильтрации для идеального бесстолкновительного газа для трех конфигураций пористой среды с помощью разработанного комплекса программ.



- В заключении** сформулированы выводы по диссертационной работе. В диссертации получены следующие основные результаты.
1. Найден класс точных решений для модели адиабатического сжатия кнудсеновского газа в трехмерной области с подвижной границей.
  2. Разработан бессеточный метод Монте-Карло, предназначенный для моделирования нестационарного течения газа Кнудсена в трехмерной области с подвижными границами. Выполнено сравнение численных решений, полученных с помощью разработанного метода, с найденными точными решениями.
  3. Разработан и реализован комплекс программ, позволяющий моделировать течение идеального бесстолкновительного газа в трехмерном пространстве с применением технологий параллельных вычислений. Выполнена верификация разработанного комплекса программ на задачах газовой динамики, имеющих аналитические решения. Эффективность комплекса программ подтверждена численными экспериментами.
  4. Получены результаты численного исследования задачи фильтрации кнудсеновского газа в пористой среде. Построена зависимость коэффициента фильтрации от размеров ячеек пористой среды. Установлена линейная зависимость между скоростью течения и скоростью фильтрации для идеального бесстолкновительного газа.

Полученные результаты могут быть использованы при аналитическом и численном решении ряда прикладных задач газовой динамики, в частности, для эффективного решения инженерно-технических задач, требующих моделирования процессов газовой динамики с использованием высокопроизводительных вычислительных систем.

Результаты диссертации могут найти применение в Институте математики им. С.Л. Соболева СО РАН, Институте гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, в Институте математики и механики УрО РАН, Институте вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Сургутском, Воронежском, Новгородском, Новосибирском, Иркутском, Югорском, Южно-Уральском, Челябинском государственных университетах.

Основные положения диссертации с достаточной полнотой отражены в автореферате, а также в 20 опубликованных работах, из которых 5 статей включены в перечень ВАК изданиях. Имеются 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Результаты работы докладывались и обсуждались на многочисленных международных и российских научно-технических конференциях.

В целом, оформление диссертации хорошее. К недостаткам оформления можно отнести лишь совсем небольшое количество грамматических ошибок и опечаток.

К недостаткам работы следует на наш взгляд отнести следующее.



1. Во введении, в разделах актуальность, степень разработанности и новизна результатов говорится довольно много, однако, полностью отсутствуют ссылки на другие работы по тематике диссертации, нет сравнения известных результатов и полученных автором. Литературный обзор по сути приведен в соответствующих главах. Однако, место, которое занимает работа, все же выделено не в той степени, в которой нужно.
2. Во введении желательно более четко выделить пункты паспорта специальности, отвечающие полученным результатам.
3. В некоторых разделах не хватает достаточных описаний результатов или алгоритмов. Например, пунктах 2.2.1-2.2.3 описываются формулы, используемые при расчете траекторий частиц, и идеи проведения расчетов, а также статистические оценки макроскопических параметров и погрешностей. Далее в гл. 3 приводится описание комплекса программ, основанных на этих формулах. Однако, на мой взгляд не хватает описания алгоритма, используемого при решении соответствующей задачи и реализованного в комплексе программ. Да и сам метод Монте-Карло, которому посвящена гл. 2 в достаточной степени не описан.
4. Желательно, привести описание не только статистических методов (см. п.1.3), но и сказать несколько слов о других методах, используемых при решении исследуемых задач газовой динамики.

Отмеченные недостатки носят в основном характер пожеланий и не снижают ценность полученных теоретических и практических результатов диссертации.

### **Заключение**

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу. Все результаты, выносимые на защиту, являются новыми и получены автором лично. Диссертация написана ясным языком, все результаты строго обоснованы. На мой взгляд, их можно квалифицировать как решение крупной проблемы. Основные результаты подробно опубликованы, автореферат адекватно отражает содержание диссертации. Изложенные в диссертации результаты свидетельствуют о высоком научно-профессиональном уровне выполнения работы и представляют собой полноценное законченное научное исследование в области математического моделирования.

На мой взгляд, диссертация Быковских Дмитрия Александровича «Моделирование течения газа Кнудсена в трехмерной области методом Монте-Карло» удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, соответствует пп. 9-14 положения о присуждении ученых степеней Постановления Правительства Российской Федерации от 24.09.2013, № 842.

Считаю, что Быковских Дмитрий Александрович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

**Официальный оппонент**

Профессор кафедры цифровых технологий  
ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет»  
профессор, доктор физико-математических наук  
по специальности  
01.01.02 – дифференциальные уравнения  
628012, г. Ханты-Мансийск, ул. Чехова, д. 16  
Тел. +7 (912) 901-04-71  
s\_pyatkov@ugrasu.ru



С.Г. Пятков

«24» мая 2022 г.

Я, Пятков Сергей Григорьевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Быковских Дмитрия Александровича «Моделирование течения газа Кнудсена в трехмерной области методом Монте-Карло», и их дальнейшую обработку.

Подпись С.Г. Пяткова заверяю  
ученый секретарь ученого совета ЮГУ



Л.Н. Соловьева