

Вх. N<sup>o</sup> 18/22  
от 16.06.2022.

**ОТЗЫВ**  
**на автореферат диссертации**

**БЫКОВСКИХ ДМИТРИЯ АЛЕКСАНДРОВИЧА**

**«МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ГАЗА КНУДСЕНА  
В ТРЕХМЕРНОЙ ОБЛАСТИ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО»**

**представленной на соискание ученой степени кандидата физико-  
математических наук по специальности «1.2.2 -Математическое  
моделирование, численные методы и комплексы программ».**

Автореферат диссертации Быковских Д.А. посвящен работе, проделанной автором по разработке алгоритмов и созданию комплекса программ расчета движения газа Кнудсена в трехмерной области с подвижными и неподвижными границами методом Монте-Карло (ММК). Обзор математических моделей и методов решения задач динамики разреженного газа показывает, что существует потребность в развитии бессеточных ММК, применяемых для моделирования течения газа Кнудсена. Моделирование нестационарного течения газа Кнудсена осложняется в случае, когда течение происходит в трехмерной изменяющейся во времени области. При моделировании такого течения газа ММК требуется статистически значительно большее количество частиц, поэтому необходимо разрабатывать эффективные алгоритмы расчета траекторий движения частиц газа, учитывающие взаимодействие с подвижными границами и реализовывать их в виде комплексов программ для высокопроизводительных вычислительных систем. При этом существует потребность в разработке точных решений течения кнудсеновского газа для верификации таких комплексов программ.

Кроме актуальности представленной работы, в автореферате отражены направления исследований автора, приведены основные положения, выносимые на защиту, описаны научная новизна результатов исследований и личный вклад автора, а также обоснована практическая значимость, выполненной работы.

Судя по автореферату основной текст диссертации состоит из пяти глав.

В первой главе автором представлен обзор исследований задач течения газа с наличием границ и задач из смежных областей. Выделены некоторые точные

решения задач течения газа Кнудсена с подвижными и неподвижными границами; приведен обзор методов решения задач динамики разреженного газа. Представлено краткое описание ММК, применяемых для моделирования течения разреженного газа, включая их назначение, преимущества и недостатки.

Во второй главе содержится описание разработанного вычислительного ММК, предназначенного для моделирования течения газа Кнудсена в трехмерной изменяющейся во времени области. В главе рассмотрена модель газа Кнудсена с подвижными границами; описан разработанный бессеточный метод моделирования течения идеального бесстолкновительного газа, основанный на ММК. Также приводятся статистические оценки макроскопических величин, позволяющие оценить значения этих величин, и рассмотрены способы позволяющие оценить погрешность полученных результатов.

Третья глава посвящена разработанному проблемно-ориентированному комплексу программ. В ней приводится схема работы комплекса, включая подробное описание работы каждого этапа; описаны методы оптимизации программного кода, позволяющие эффективно задействовать вычислительные ресурсы центрального процессора, такие как многоуровневая декомпозиция данных, векторизация вычислений и другие. Также в главе рассмотрена тестовая задача, связанная с моделированием движения встречных пучков газа для которой известно аналитическое решение. Представлено описание математической модели, аналитическое решение и постановка вычислительной задачи, а также результаты тестирования разработанного комплекса программ. Следует отметить, что при моделировании для 10 ядер центрального процессора достигнута почти 50% производительность от пиковой.

В четвертой главе автором представлены результаты математического и численного исследования адиабатического сжатия газа Кнудсена в одномерной и трехмерной постановках. Сначала описана постановка задачи сжатия идеального бесстолкновительного газа в одномерной постановке, представлено построение аналитического решения, представлены результаты моделирования с использованием разработанного комплекса программ. Результаты серий вычислительных экспериментов с различным числом частиц и скоростей границ показали, что существует статистическая сходимость к аналитическому решению.

Аналогичным образом исследована и модель сжатия газа Кнудсена в трехмерном пространстве. Выполнено качественное и количественное сравнение точного решения с результатами численного исследования. Показано, что при моделировании достигается производительность, равная почти 40% от пиковой производительности центрального процессора.

Пятая глава посвящена численным исследованиям задачи фильтрации идеального бесстолкновительного газа в пористой среде с помощью разработанного комплекса программ. В главе рассмотрены коэффициенты фильтрации газа в пористой среде, входящие в закон Дарси для идеального газа в пористой среде. Представлены постановка вычислительной задачи, описаны 3 конфигурации пористой среды и используемые в вычислительных экспериментах расчетные формулы, связанные с коэффициентами фильтрации. Выполнено количественное и качественное сравнение полученных результатов, включая сравнение параметров, связанных с коэффициентами фильтрации, статистическую оценку погрешности макроскопических величин. Установлена линейная зависимость между скоростью течения и скоростью фильтрации для идеального бесстолкновительного газа.

В целом, автореферат Быковских Д.А. оставляет хорошее впечатление и является отражением большого объема работы, выполненной автором по теме диссертации. Изложение материала последовательное и ясное, выводы и заключения обоснованы.

Значимость работы определяется тем, что она носит законченный характер. Пройден путь от разработки алгоритмов расчета движения газа, до их практической реализации в виде комплекса проблемно-ориентированных программ для высокопроизводительных вычислительных систем, а также его численного исследования и верификации сточными решениями.

Созданный комплекс программ может быть использован для эффективного решения инженерно-технических задач, требующих моделирования процессов газовой динамики с использованием высокопроизводительных вычислительных систем. Результаты представленной диссертационной работы имеют практическое значение для исследования проблем динамики разреженного газа, статистической физики, нефтегазовой отрасли, атомной и промышленной энергетики.

Основные результаты работ автора по теме диссертации изложены в 20 печатных работах и докладывались на научных конференциях различного уровня.

Автореферат Быковских Д.А. удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к авторефератам.

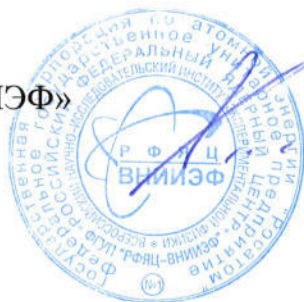
Оценивая по реферату объем, качество и практическую значимость выполненных работ, считаю, что Быковских Дмитрий Александрович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности «1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Начальник отдела ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»  
кандидат физико-математических наук,  
специальность «05.13.18. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

С.П. Огнев

Подпись Огнева С.П. заверяю:

Ученый секретарь ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»  
кандидат физико-математических наук



В.В. Хижняков

Огнев Сергей Петрович  
(83130) 28634, E-mail: spognev@vniief.ru  
Федеральное государственное унитарное предприятие  
«РОССИЙСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ЯДЕРНЫЙ ЦЕНТР-Всероссийский  
научно-исследовательский институт экспериментальной физики»  
(ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»)  
г. Саров, Нижегородская обл., 607188, пр. Мира, д.37,  
Факс: 83130 29494 E-mail: staff@vniief.ru