

Вх № 2/22  
от 13.05.2022

## ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук,  
Лаврентьева Михаила Михайловича 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

Работа посвящена разработке методов расчета движения газа Кнудсена в трехмерной области и созданию соответствующего программного обеспечения, оптимизированного для современных высокопроизводительных вычислительных систем.

### Актуальность работы

Большой объем запасов углеводородов, расположенных в Западной Сибири Российской Федерации, относится к трудноизвлекаемым. Развитие методов, связанных извлечением таких запасов, в частности, приводит к исследованию течения газа в пористой среде исходя из масштаба, сравнимого с размером зерен пористой среды. В этом случае при низких давлениях газа возникает эффект Клинкенберга, когда длина свободного пробега частиц становится соизмерима с размером порового пространства, что приводит к исследованию течения газа Кнудсена, частицы которого не сталкиваются друг с другом.

Для моделирования такого сорта задач возникает потребность в разработке программного обеспечения. При этом не менее важным вопросом является обоснование применимости использования численных алгоритмов, поэтому существует потребность в поиске точных решений для течений газа в свободномолекулярном режиме в многомерной области с подвижными и неподвижными границами.

Все вышеперечисленное является основной целью диссертационного исследования, а работа Быковских Д.А. посвящена численному исследованию течения газа Кнудсена в трехмерной области с подвижными и неподвижными границами методом Монте-Карло.

### Научная новизна полученных результатов

**В области математического моделирования.** В работе найден класс точных решений для модели адиабатического сжатия газа Кнудсена в трехмерной области с подвижной границей. Выполнено сравнение найденного точного решения с результатами вычислительного эксперимента.

Получены новые численные решения задачи фильтрации течения кнудсеновского газа в пористой среде. Установлена линейная зависимость

скорости течения и скорости фильтрации с выходом течения газа на квазистационарный режим.

**В области численных методов.** Разработан бессеточный метод, основанный на методе Монте-Карло, предназначенный для моделирования течения газа Кнудсена в трехмерной области с подвижными и неподвижными границами. Эффективность вычислительного метода подтверждена анализом результатов численных исследований и эффективности работы созданного на его основе программного обеспечения.

**В области комплексов программ.** На основе разработанных вычислительных алгоритмов и метода создан комплекс программ для проведения расчетов течения газа Кнудсена в трехмерной области с переменной во времени границей области. Обоснованность алгоритмов и комплекса программ подтверждена верификацией на задачах газовой динамики, имеющих точные решения.

Таким образом, автором диссертации получены новые результаты в области математического моделирования, численных методов и комплексов программ.

### **Обоснованность и достоверность результатов**

Положения, утверждения и выводы, представленные в диссертационной работе, являются обоснованными и достоверными ввиду корректности аналитических выкладок, основанных на фундаментальных законах сохранения, и всесторонней верификации результатов расчетов комплекса проблемно-ориентированных программ.

### **Публикации и апробация результатов диссертационной работы**

Основные результаты диссертации своевременно и полно опубликованы в научных журналах и представлены на профильных международных и российских конференциях. Автореферат полно и правильно отражает содержание работы.

### **Структура диссертационной работы**

Работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы и двух приложений, содержит 116 страниц, 28 рисунков и 17 таблиц.

**Во введении** обоснована актуальность темы, представлены степень разработанности научной темы, цель и задачи, описаны научная новизна работы, теоретическая и практическая значимость, объект и предмет исследования, методология исследования, положения на защиту, достоверность полученных результатов, личный вклад автора.

**В первой главе** представлена история развития газовой динамики, включая обзор задач газовой динамики и смежных с ней областей. Рассмотрены некоторые аналитические решения задач течения газа с наличием границ. Описаны методы, основанные на методе Монте-Карло, в

том числе их особенности. Указаны рекомендации, которые необходимо учитывать при построении алгоритмов.

**Вторая глава** содержит подробное описание кинетической модели газа Кнудсена в трехмерной области с подвижными границами и бессеточного метода, основанного на методе Монте-Карло.

**В третьей главе** центральное место занимает описание структуры и особенностей разработанного комплекса проблемно-ориентированных программ, а также представлена верификация, оценка производительности и анализ полученных результатов работы комплекса программ на задаче, имеющей аналитическое решение.

**В четвертой главе** рассматривается адиабатическое сжатие газа Кнудсена в одномерном и трехмерном пространствах с подвижными и неподвижными границами. Описан найденный класс точных решений, включая сравнение его с результатами численного исследования.

**Пятая глава** посвящена фильтрации газа Кнудсена в трехмерной пористой среде. Представлено численное исследование зависимости скорости течения и скорости фильтрации газа Кнудсена для трех конфигураций пористой среды с помощью разработанного комплекса программ, описан анализ полученных результатов.

**В заключении** приводятся непротиворечивые выводы, соответствующие полученным результатам.

### **Замечания по диссертационной работе**

В качестве замечания следует отметить недостаточное внимание, уделенное автором описанию оптимизации разработанного программного кода. На стр. 47 диссертации верно отмечено, что реализация алгоритма, разработанного с учетом особенностей конкретной вычислительной архитектуры, в виде программы, входящей в состав комплекса проблемно-ориентированных программ, будет иметь высокую производительность. К сожалению, этот тезис не нашел развития в главе 3. Совершенно не проведен анализ потери производительности при использовании технологии OpenMP на 10 ядрах. Неясно, допускает ли разработанный комплекс программ использование графических процессоров для повышения производительности.

Сделанные замечания не влияют на оценку работы в целом.

### **Заключение**

Диссертационная работа Быковских Дмитрия Александровича «Моделирование течения газа Кнудсена в трехмерной области методом Монте-Карло» соответствует п.9-14 положения о порядке присуждения ученых степеней, удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор – Быковских Дмитрий Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических

наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Прошу членов диссертационного совета поддержать присуждение Д.А. Быковских ученой степени кандидата физико-математических наук.

**Официальный оппонент**

Заместитель директора по научной работе  
ФГБУН Институт автоматики и электрометрии  
СО РАН

профессор, доктор физико-математических наук  
по специальности

01.01.02 – дифференциальные уравнения

630090, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, д. 1

Тел. +7 (383) 333-10-67

[lavrentiev@iae.nsk.su](mailto:lavrentiev@iae.nsk.su)

05 мая 2022 г.

Подпись М.М. Лаврентьева заверяю  
ученый секретарь ИАиЭ СО РАН  
к.ф.-м.н.



  
М.М. Лаврентьев

  
Е.И. Донцова