



## ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Титарева Владимира Александровича  
«Численное моделирование пространственных течений  
разреженного газа с использованием суперЭВМ»  
представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук  
по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и  
комплексы программ.

В диссертации В.А. Титарева проведено исследование различных течений разреженного газа на основе численного решения моделей уравнения Больцмана. Актуальность темы связана с необходимостью точного моделирования газодинамических процессов в вакуумных системах, в микросистемах, при вхождении космических аппаратов в верхние слои атмосферы и во многих других инженерных приложениях.

Автор создал целый ряд новых методологий и численных алгоритмов для математического моделирования трехмерных течений разреженного газа в сложных геометрических конфигурациях. Предложенные алгоритмы позволяют проводить параллельные вычисления используя десятки тысяч ядер одновременно. В качестве примеров, автор рассчитал течение разреженного газа через каналы различных поперечных сечений и каналы с переменным поперечным сечением. Кроме этого, автор рассчитал гиперзвуковое обтекание тел со сложной формой. Все рассмотренные задачи решены в широком диапазоне числа Кнудсена. Результаты Титарева хорошо согласуются с данными других авторов полученных разными методами.

Модель, используемая автором, была предложена Шаховым как обобщение модели Крука (БГК). В отличие от БГК модели, уравнение Шахова приводит к правильному числу Прандтля, что обеспечивает надежное описание переноса массы и тепла одновременно. Модель Шахова была опробована многими исследователями и широко применяется для фундаментальных и практических расчетов. Кинетическое уравнение для функции распределения решается методом дискретных скоростей. Следует подчеркнуть, что подобное решение является очень трудной математической задачей, т.к. функция распределения одноатомного газа зависит от семи переменных (три координаты в физическом пространстве, три координаты скоростей и время). В общем трехмерном случае, все эти переменные дискредитируются. Для успешного решения необходимо выбрать эффективные разностную схему и квадратурную формулу. Автор подробно описывает оба эти аспекта. Автор также умело использует два метода параллельных вычислений: OpenMP и MPI. Рисунок 2 автореферата в понятной форме показывает, как используются эти два метода распараллеливания. Рисунок 5 демонстрирует очень хорошее согласие результатов автора с данными из других источников полученных методом Монте

Карло и численным решением уравнения Больцмана с точным интегралом столкновений. Следует отметить, что оба эти метода (Монте Карло и точное ур. Больцмана) требуют очень больших численных усилий. Время решения одной и той же задачи этими двумя методами может быть на порядки больше, чем решение модельного уравнения Шахова. Результаты Титарева показывают, что практические задачи выгоднее решать с помощью модельного уравнения, которое обеспечивает надежные результаты при минимальных численных затратах. Результаты, представленные на рисунке 8 интересны тем, что в трубе большего радиуса возникает диск Маха при условии, что газ вытекает в вакуум. Ранее считалось, что при истечении в вакуум такие диски не возникают. Результаты по обтеканию воздушно-космического аппарата также являются большим достижением в численных методах разреженного газа, т.к. до сих пор такие задачи решались в основном методом Монте Карло, что требует больших численных усилий.

В качестве замечания следует отметить, что сравнение с экспериментальными данными на рисунке 5 следует приводить с указанием интервала экспериментальной ошибки. В этом случае будет видно, что теоретически результаты совпадают с экспериментом в пределах этой ошибки. Данное замечание никак не снижает значимости полученных результатов.

Соискатель ученой степени доктора наук регулярно участвует в международных конференциях, где мы неоднократно встречались и обсуждали многие проблемы динамики разреженного газа. Им опубликовано много научных работ в международных журналах с высоким индексом цитирования. Согласно информации Web of Science, автор диссертации опубликовал 68 работ, цитировался 1386 раза (исключая самоцитирование) и имеет индекс Хирша 21 на момент написания данного отзыва. Это достаточно высокие показатели в области динамики разреженного газа.

Таким образом, диссертация В.А. Титарева «Численное моделирование пространственных течений разреженного газа с использованием суперЭВМ» удовлетворяет всем требованиям предъявляемым ВАК к докторским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук.

Профессор кафедры физики  
Федерального Университета штата Парана, Бразилия

Феликс Маратович Шарипов  
12 марта 2018 г.

Email: sharipov@fisica.ufpr.br

Рабочий телефон: +55 41 3361-3337

Рабочий адрес: Felix Sharipov

Departamento de Física  
Universidade Federal do Paraná  
Caixa postal 19044  
81531-980, Curitiba – PR, Brazil

