



МИНИСТЕРСТВО ПРОМЫШЛЕННОСТИ И ТОРГОВЛИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Государственный научный центр Российской Федерации
Федеральное государственное унитарное предприятие
**«ЦЕНТРАЛЬНЫЙ
АЭРОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени профессора Н.Е.Жуковского»
ФГУП «ЦАГИ»**

140180 Московская обл., г. Жуковский, ул. Жуковского, д. 1
тел.: (495)556-4205, факс: (495)777-6332
E-mail: <http://www.tsagi.ru>
ОКПО 07542112, ОГРН 1025001624471
ИНН / КПП 5013009056/501301001

11.09.2015 № 01-9-667

На № _____

“УТВЕРЖДАЮ”

Генеральный директор

ГНЦ ФГУП «ЦАГИ»

член-корреспондент РАН



/ С.Л.Чернышев /

04 сентября 2015 г.

Отзыв ведущей организации

на диссертационную работу Гудича Игоря Григорьевича

**«Исследование одной стохастической модели газа при умеренных числах Кнудсена»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико – математических
наук (специальность 05.13.18 – математическое моделирование,
алгоритмы и комплексы программ)**

В диссертации Гудича И.Г. исследуется фундаментальная проблема построения адекватных математических моделей для расчета газодинамических процессов в разреженных средах. Уравнение Больцмана для функции распределения молекул по скоростям представляет собой уравнение в частных производных в семимерном (фазовом) пространстве с правой частью (интегралом столкновений), которая требует многократного интегрирования по всему пространству независимых переменных задачи. Численное решение такого уравнения сопряжено с большими трудностями и приводит к значительным компьютерным затратам. Поэтому **актуальной** является разработка упрощенных моделей динамики разреженного газа, которые были бы применимы при умеренных числах Кнудсена $0.01 < Kn < 10$.

В работе рассматривается одна такая модель, развитая научным руководителем диссертанта, д.ф.-м.н. С.В.Богомоловым, и представляющая собой, по сути, уравнение Больцмана с упрощенным интегралом столкновений в форме Колмогорова-Фоккера-

002095

Планка (далее – уравнение КФП). Построение подобных моделей связано с использованием целого ряда нетривиальных упрощающих предположений, поэтому для вывода о применимости этих моделей на практике требуется их тщательная верификация. Диссертация Гудича И.Г. является необходимым этапом исследований по верификации данной модели. Это и определяет **научно-практическую ценность** данной работы.

Глава 1 представляет собой подробное описание вычисления интегралов, которыми определяются коэффициенты сноса и диффузии в фазовом пространстве, входящие в уравнение КФП. Вывод аналитических выражений для этих коэффициентов – нетривиальная процедура как с математической, так и с физической точки зрения. Однако в тексте Главы 1 не хватает подробного объяснения физического смысла рассматриваемых уравнений и анализа применимости сделанных упрощающих предположений. Текст, неудачно размещенный в начале Главы 3, лишь отчасти восполняет данный недостаток. Вывод же интегралов смотрелся бы более естественно в приложении к диссертационной работе.

Новыми и наиболее интересными являются результаты, описанные в Главах 2-4 диссертации. Здесь с использованием различных подходов находится решение одной из классических задач динамики разреженного газа – задачи о пространственно-однородной релаксации (ПОР). Все полученные решения сопряжены с преодолением серьезных трудностей как теоретического, так и вычислительного характера, и их следует рассматривать как **существенное продвижение в развитии данного научного направления** и как важное личное достижение автора, убедительно демонстрирующее его **высокую научную квалификацию**. В особенности нужно указать на следующие результаты работы, **новые и значимые с теоретической точки зрения**:

1. Получены детерминированные уравнения для функции распределения в сферической системе координат. Численно найдено нестационарное решение задачи о ПОР для сферически-симметричного случая, а также стационарный предел этого решения.

2. Стационарное решение задачи о ПОР с упрощенными коэффициентами получено также численно в постановке для случайного процесса.

3. Разработан численный алгоритм решения стохастического дифференциального уравнения с учетом закона сохранения энергии в системе. Алгоритм реализован в параллельной версии для процессоров с графическими ускорителями архитектуры CUDA. На базе этого подхода получено стационарное решение задачи о ПОР с неупрощенными коэффициентами в виде трехкратных интегралов по пространству скоростей.

Сопоставление решений с упрощенными и неупрощенными коэффициентами показывает, что упрощенные аналитические выражения для коэффициентов, представленные в Главе 1, могут быть использованы для численного решения уравнений рассматриваемой модели разреженного газа. Наличие этих аналитических выражений существенно сокращает вычислительные затраты на решение уравнения КФП.

Достоверность полученных результатов подтверждается как сопоставлением результатов, полученных разными методами, так и сравнением с расчетными результатами, полученными другими авторами по другим методикам.

По диссертационной работе можно сделать следующие **замечания**:

1. Отсутствует детальное сопоставление с решением задачи о ПОР на основе уравнения Больцмана, необходимое для верификации исходной модели КФП. Насколько можно судить, на базе модели КФП не удалось получить максвелловского распределения, которое является стационарным решением уравнения Больцмана для данной задачи. Предложенные объяснения этого результата в Главе IV носят гипотетический характер.
2. Для демонстрации области применимости модели КФП и ее упрощенного варианта следовало бы рассмотреть пространственно неоднородные течения. В динамике разреженного газа существует ряд классических задач этого типа: течения Куэтта и Пуазейля, задача о внутренней структуре ударной волны. Невозможно предсказать, насколько хорошо будут работать в этих неоднородных задачах аналитические коэффициенты, выведенные на основе допущений о максвелловском характере функции распределения и о ее изотропности по тепловой скорости. Еще одним важным тестом для применимости модели КФП мог бы стать вывод выражений для коэффициентов переноса в уравнениях Навье-Стокса на основе модели КФП.

Тем не менее, решение задачи о ПОР – необходимый этап исследований, которые должны быть выполнены для понимания точности и диапазона применимости рассмотренной упрощенной модели динамики разреженного газа. Немаксвелловский характер стационарного решения задачи о ПОР, скорее всего, свидетельствует о необходимости работ по уточнению исходной модели КФП. Данный результат не умаляет ценность диссертации, поскольку объектом защиты является не исходная модель КФП, а способ ее упрощения (аналитические приближенные выражения для коэффициентов модели) и различные численные методы решения уравнений модели.

Диссертация соответствует паспорту специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ». Полученные автором результаты были представлены на ряде ведущих международных конференций в области динамики разреженного газа и численных методов и опубликованы в российских и международных журналах, входящих в список ВАК. Автореферат и публикации достаточно полно отражают содержание диссертации.

Результаты диссертации могут быть использованы в институтах Российской академии наук (Институте прикладной математики, Вычислительном центре, Институте автоматизации проектирования, Институте вычислительной математики, институтах Сибирского Отделения), в ракетно-космических проектных организациях для численного моделирования высокоскоростных течений разреженного газа (обтекание спускаемых космических аппаратов и их отдельных элементов).

Заключение

Диссертация И.Г. Гудича «Исследование одной стохастической модели газа при умеренных числах Кнудсена» соответствует всем требованиям ВАК и является законченной научно-квалификационной работой. В диссертации содержится исследование нового подхода для моделирования важного класса газодинамических течений, исследована математическая модель, для ее реализации развиты эффективные вычислительные методы и разработаны программно-алгоритмические средства.

Автор работы И.Г.Гудич заслуживает присуждения учёной степени кандидата **физико-математических наук по специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.**

Отзыв обсужден на заседании научного семинара отдела вычислительной аэродинамики НИО-1 ЦАГИ 3 сентября 2015 г.

Отзыв подготовил:

начальник сектора 6 отдела вычислительной
аэродинамики НИО-1 ЦАГИ, к.ф.-м.н., доцент


03.09.2015 г. В.В.Власенко

Подпись Власенко В.В. заверяю.

Ученый секретарь Диссертационного совета ЦАГИ
д.ф.-м.н., доцент





М.А.Брутян