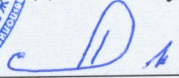


УТВЕРЖДАЮ



Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Института
теплофизики им. С.С. Кутателадзе
Сибирского отделения Российской
Академии Наук член-корреспондент РАН


С. В. Алексеев
«08 » октября 2015 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию Никитченко Юрия Алексеевича «Системы моментных уравнений и следующие из них модели неравновесных течений», представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Диссертация Никитченко Ю.А. посвящена разработке моделей неравновесных течений газов. Актуальность таких исследований не нуждается в специальном обосновании. Спектр неравновесных процессов гораздо шире охваченных в рецензируемой работе. Поэтому, упреждая анализ исследований автора, следует определить место его творческой деятельности.

Ограничимся только рассмотрением гомогенных однородных потоков. В этом случае уровень неравновесности характеризуется различием поступательной температуры и температур внутренних степени свободы, и далее - отличием заселенности колебательных и вращательных температур от больцмановского, и, наконец, отличием распределения скоростей молекул от максвелловского в широком смысле: как по направлениям так и по скоростям молекул в отдельных направлениях. Автор рассматривает неравновесные состояния и процессы в газах из одноатомных и двухатомных молекул при таких преобразованиях, когда достаточно вводить температуры поступательных и внутренних степеней свободы. Но именно такое суженное использование представлений неравновесных состояний и позволило построить сложнейшие газодинамические модели.

Диссертация состоит из введения и семи разделов, которые в совокупности представляют завершённый цикл исследований от концептуального построения идеологии работы до тестирования методов и решения конкретных задач.

Введение представляет собой не более как очерк о богатейшей истории исследования неравновесных процессов. Но во введении имеются и важные послышки к некоторым основным результатам автора. Например, отмечена особенность метода замыкания системы моментных уравнений: моменты четвертого порядка выражаются через моменты предыдущих порядков без использования самих моментных уравнений. Моменты четвертого порядка не удовлетворяют своим моментным уравнениям. Автор называет это рассогласованностью локального и балансного выражений замыкающих моментов, приводящей к так называемой коротковолновой неустойчивости и появлению в расчетах субскачков во фронте ударных волн. Важен также акцент на том, что в неравновесных течениях правильный учет объемной вязкости становится принципиально важным.

Как недостаток этой части работы следует отметить трудность, возникающую от использования автором только традиционного «введения» числа Кнудсена. Использование геометрического размера в качестве «характерного» приводит к затруднениям в общем анализе неравновесных течений. Возможна ли характеристика неравновесности без использования геометрического размера? Да, возможно, и хорошо известна. Этот размер есть расстояние значимого изменения макроскопического параметра при заданном его градиенте. Например, для плоской ударной волны одноатомного газа такое «число Кнудсена» приобретает максимальное значение в центре волны при нулях на ее границах.

В 1 разделе, в заглавии которого многозначительно используются слова «многоатомные газы», изложена методика построения системы моментных уравнений. В первом параграфе описаны допущения и термины. Введение понятий «механическое» и «термодинамическое» давление вынуждают автора постоянно оговариваться, но, по-видимому, упрощает вывод моментных уравнений и выход в последующем на влияние объемной вязкости.

Вызывает вопрос представление максимального неравновесного состояния, а именно, неуниверсальность формулы 1.25. Так, если показатель адиабаты стремится к единице, отношение, характеризующее

неравновесность, стремится к бесконечности, а для двухатомного газа 4,47. Объясните физический смысл этого.

Концептуальной основой метода построения системы моментных уравнений является отказ от конкретизации функции распределения и потенциала межмолекулярных столкновений. Правые части моментных уравнений могут быть представлены в виде релаксационных членов при условии, что главные оси тензоров не меняют своего положения, а энергия теплового движения молекул не переходит в энергию группового движения. Допущения, что средние частоты прямых и обратных столкновений не зависят от степени неравновесности, приводит к инвариантности результатов расчёта при использовании любых законов взаимодействия молекул.

При замыкании системы моментных уравнений использована линейная комбинация моментов низших порядков для представления локального выражения моментов четвертого порядка. Построенная 24-моментная система (24М) допускает упомянутую выше коротковолновую неустойчивость (появление субскачка на профилях ударной волны, рисунок 1.1).

В основу метода построения системы моментных уравнений 4-го порядка и выше положено феноменологическое представление об изотропности релаксации. Основные допущения были указаны выше: это представление замыкающих моментов линейной комбинацией низших моментов и слабая зависимость времени релаксации от степени неравновесности.

В этом разделе четко изложен алгоритм построения системы моментных уравнений n -го порядка и особенности численной реализации систем моментных уравнений.

Второй раздел посвящен, в частности, разработке методов снижения коротковолновой неустойчивости систем моментных уравнений. В локальных выражениях замыкающих моментов используются согласующие добавки, для которых записаны дифференциальные уравнения 2.46 и 2.47. С этими уравнениями система моментных уравнений М24 (1 раздел) может рассматриваться как самостоятельная модель неравновесного течения, представляемая 45 скалярными уравнениями. У этой системы область устойчивости (перед ударной волной) шире, чем у системы М24. Автор как тонкий аналитик нашел способ ослабления влияния выражений моментов пятого порядка на решение системы путем использования приближения

согласующих добавок. Следует отметить высокую цену вычислительных затрат при использовании многопроцессорных систем для этих расчётов.

В 3-ем разделе получено первое и второе приближение системы M24. Первое приближение – это 5-ти моментная модель. Она соответствует модели Навье-Стокса-Фурье с явно выраженным коэффициентом вязкости. Первое приближение уточняет уравнение Навье-Стокса. Однако, в 5-ти моментной модели невозможно адекватное определение поступательных и внутренних степеней свободы. Пренебрежение коэффициентом объемной вязкости приводит к существенной погрешности термодинамически неравновесного напряжения. При превышении времени релаксации внутренних степеней свободы над временем для поступательной релаксации, что всегда имеет место, найденная структура ударной волны противоречит естественному процессу.

Автор обращается к новому приближению системы M24 и приходит к системе уравнений, полученной В.М. Ждановым из кинетического уравнения с использованием двух-температурного распределения Максвелла-Больцмана. В этой двух-температурной модели энергообмен между поступательными и внутренними степенями свободы описывается релаксационными членами уравнений энергий. Такая модель обеспечивает качественно верное решение для структуры ударной волны.

Модель второго приближения основана на том, что в уравнениях неравновесных величин удерживаются члены порядка малости до квадрата времени релаксации при пренебрежении членами порядка куба этой величины. Используя это, автор приходит к описанию течения газовой среды системы уравнений в приближении Барнетта. Эта система, названная релаксационной моделью, содержит 17 скалярных уравнений. Из них 5-моментные, остальные релаксационные. Система обеспечивает для ударной волны гладкое решение в сильно неравновесной области и неустойчивость на переднем фронте. Исследования автора не меняют сформировавшегося отношения к использованию уравнений Барнетта. Уточнение результатов при использовании этих уравнений всегда под вопросом, а вычисления более трудоемки.

В 4 разделе автор разрабатывает феноменологическую модель граничных условий на твердой поверхности. Наиболее оригинальная часть – это построение модели описания взаимодействия газового потока с поверхностью с *представлением разделения потока падающих молекул на быстрые и медленные. В этом случае невозможно сколько-нибудь*

обоснованно сделать указанное разделение. А модель построить можно, и она будет не лишена формальной красоты. Автор вложил много труда в эту часть работы, но, по нашему мнению было бы более полезно «сшить» мировой опыт исследований взаимодействия газов с поверхностями с разработками моделей неравновесных течений.

5 раздел назван «Инженерные модели». Слово *инженерные* следует взять в кавычки. Речь идет, в частности, о модификации системы уравнений Навье-Стокса представлением коэффициента вязкости первым приближением моментного уравнения неравновесного напряжения. Полученная модель уже не есть строго первое приближение. Приближение становится внепорядковым. Автор использует неравновесные величины в неполном втором приближении (в первом приближении с внепорядковым членом). В частности, например, тензорный коэффициент вязкости содержит внепорядковый член неравновесного напряжения. Модельное кинетическое уравнение 5.25 было применено к расчету структуры ударной волны. Полученная структура практически полностью совпадает с определённой методом Монте-Карло (рис.5.1).

В этом разделе показано, что даже в условиях слабонеравновесного течения пренебрежение объемной вязкостью вносит существенную погрешность в значение нормальных неравновесных напряжений.

Интересным направлением является создание гибридных моделей, требующее особого искусства (что комбинировать и как). Автор останавливается на комбинации модели M24 с 5-ти моментной внепорядковой (!) моделью. Для комбинации используется весовой коэффициент, выполняющий функцию степени неравновесности. Полученная гибридная («Инженерная модель») сочетает свойства 24 моментной системы и модели первого приближения. Превосходные возможности гибридной модели продемонстрированы расчетами профиля скоростей в ударной волне.

Раздел 6 – “Тестовые расчеты вырожденных течений” – это практическое использование разработанных автором моделей на классических примерах переноса энергий и импульса:

- 1) теплопередача в плоском слое неподвижного газа;
- 2) плоское течение Куэтта;
- 3) структура ударной волны.

Частное значение имеют замечания об отдельных удачных возможностях различных моделей, но важно, что отмечены достоинства гибридной модели и указано на ее трудоемкость.

В 7 разделе рассмотрена классическая задача аэродинамики – гиперзвуковое обтекание абсолютно тонкой пластины при нулевом угле атаки. Автор справедливо указывает на сложность проблемы, не раскрывая предмет этой сложности. *Она – в необозримости возможных условий от свободно-молекулярного до турбулентного течения с особенностями формирования ударных волн. Представляется, что браться за эту задачу следует после изучения (определения) области возмущения против потока от поверхности пластины на длине, может быть, десятков гиперзвуковых длин свободного пробега молекул. Но автор решительнее. Он вооружается моделями первого приближения, внепорядковой и гибридной, представляет систему уравнений на 8-ми страницах и ... решает.*

Конечно-разностная реализация дает лучший результат при использовании гибридной модели. Удовлетворительным можно считать согласование с экспериментальными данными вниз по потоку от носика. Обращает на себя важное замечание, созвучное с нашим комментарием к этой части работы: тесты трех моделей свидетельствуют о наличии сильно возмущенной зоны перед носиком бесконечно тонкой пластины.

Анализ результатов работы в тексте отзыва относится к новым подходам и теоретическим приемам. Это и есть оценка новизны. Что касается достоверности исследования, она подтверждена не только сравнением с экспериментальными данными, но и с результатами других исследователей. Автору есть на кого равняться.

Критическое отношение к некоторым позициям автора выделено в тексте курсивом

Дополнительные замечания общего характера.

Диссертация представлена на 250-ти страницах со 106 литературными ссылками. Результаты диссертации достаточно информативно опубликованы. Автореферат представительно отражает содержание диссертации.

Напрашивается замечание: Заключение диссертации и Заключение автореферата существенно различаются. Заключение по диссертации размыто и содержит элементы дискуссии. Заключение по автореферату

существенно более лаконично, но полностью отражает содержание заключения по диссертации. Все это можно считать вполне допустимым, но автора можно упрекнуть в том, что в обоих заключениях нет выводов по двум последним разделам. При защите они должны быть обнародованы.

Общая оценка работы. Диссертация Никитченко Ю.А. «Системы моментных уравнений и следующие из них модели неравновесных течений» представляет собой самостоятельное завершённое исследование, в рамках которого решена научная проблема, имеющая важное значение для развития теории неравновесных течений как современной области физической механики. Её результаты рекомендуется использовать в университетах на кафедрах механического профиля для представления студентам современного взгляда на построение моделей неравновесных течений.

Диссертационная работа Никитченко Ю.А. соответствует требованиям ВАК РФ к докторским диссертациям, установленным п.9 «Положения о порядке присуждения учёных степеней». Никитченко Ю.А. смотрится как движитель и хранитель научной культуры по физической механике XX века и заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Отзыв обсуждён на семинаре по динамике разреженного газа в Институте Теплофизики СО РАН.

Ребров Алексей Кузьмич

академик РАН, доктор физико-математических наук,

профессор

Подпись Реброва А.К. удостоверяю

