

Отзыв официального оппонента
на диссертацию **Бутковского Александра Викторовича**
**«Кинетические эффекты и аналогия Рейнольдса в классических задачах
гидрогазодинамики»,**

представленную к защите на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.9 — Механика жидкости, газа и плазмы

Диссертация посвящена исследованию нескольких классических задач газовой динамики методом прямого статистического моделирования в широком диапазоне скоростей и чисел Кнудсена, характеризующих степень разреженности течения. Исследования динамики разреженных газов уже многие годы не теряют актуальности. Первоначально интерес к данной тематике был связан, в основном, с аэрокосмическими приложениями. Однако в последние годы число задач, требующих применения методов динамики разреженных газов, заметно увеличилось в связи с бурным развитием вакуумной техники, микро- и нано-электромеханических устройств, устройств газоразделения, которые находят широкое применение во многих современных технологиях — электронике, машиностроении, химических технологиях, метрологии, медицине. Использование традиционных методов механики сплошной среды для описания процессов в микрофлюидике некорректно, поскольку важную роль в них играют высокоскоростные процессы, проявляются эффекты разреженности и неравновесности (например, в насосах Кнудсена). Необходимо применять более сложные способы описания, основанные на решении уравнения Больцмана, или методы прямого статистического моделирования (ПСМ). Кроме того, в переходных режимах течения могут возникать новые, неизученные ранее эффекты разреженности, которые проявляются в аномальных явлениях переноса, появлении локальных экстремумов в потоках импульса и энергии. Таким образом, исследование неклассических

процессов переноса в разреженных газах является **актуальной** задачей, имеющей фундаментальную теоретическую и практическую значимость.

Структура диссертации.

Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения и списка использованных источников. В каждой из глав 1-5 рассмотрена одна из классических задач газовой динамики, приводится постановка задачи, решение для свободномолекулярного режима, описан метод исследования (вариации метода прямого статистического моделирования) и обсуждается его верификация. Далее приводятся результаты численного исследования напряжения трения и теплообмена в широком диапазоне чисел Кнудсена, анализируются результаты, формулируются выводы. Порядок изложения выбран удачно, от простого к сложному. Исследование начинается с наиболее простой плоской задачи Куэтта (одномерная стационарная задача), далее идет задача Рэлея (одномерная нестационарная), затем рассмотрены двумерные плоские и осесимметричные задачи. В главе 6 изучены условные максимумы потоков энергии для различных задач, а в главе 7 – аналогия Рейнольдса, связывающая напряжение трения и поток энергии. Проведен анализ безразмерных параметров, влияющих на формирование локальных максимумов потоков энергии, напряжения трения и потока нормального импульса в разных задачах.

Основные результаты.

Основным результатом работы следует считать подробное исследование влияния параметров течения разреженного газа на поток энергии, передаваемой поверхности, напряжение трения, поток нормального импульса и обнаружение аномального характера поведения данных величин в зависимости от степени разреженности. В результате проведенных исследований в широком диапазоне значений чисел Кнудсена, температур и скоростей поверхностей:

Найдено большое количество различных эффектов в классических течениях разреженного газа, в том числе эффекты перемены знака. Впервые найдены кинетические эффекты воздействия на поверхность в задаче Релея. Предложена общая для течения Куэтта, течения Рэлея и задачи об обтекании пластины под нулевым углом атаки физическая модель кинетических процессов, позволившая объяснить все найденные эффекты и предсказывающая существование аналогичных эффектов в других течениях разреженного газа. Впервые найдены кинетические эффекты воздействия на поверхности в цилиндрических течениях Куэтта, вызванные их вращением.

В задачах о теплопередаче в газе с цилиндрической и сферической симметрией, а также в плоской и продольной цилиндрической задачах Куэтта найдены локальные максимумы потока энергии, передаваемой одной из поверхностей при изменении ее температуры при фиксированной температуре другой поверхности.

Показано, что температуры и скорости граничных поверхностей в плоском и продольном цилиндрическом течении Куэтта, течении Рэлея и течении, возникающего при обтекании пластины под нулевым углом атаки сверхзвуковым потоком газа влияют на коэффициент аналогии Рейнольдса в основном через число Эккерта.

В диссертации также найден ряд интересных результатов, относящихся к течениям сплошной среды:

Показано существование максимума в зависимости давления на поверхности внутреннего цилиндра от скорости вращения внешнего цилиндра в задаче Куэтта для вязкого сжимаемого газа с неподвижным внутренним цилиндром. В предположении постоянства числа Прандтля получено точное соотношение между потоком энергии, передаваемой поверхности, и напряжением трения на поверхности в продольном цилиндрическом течении Куэтта вязкого сжимаемого газа. Показано, что коэффициент аналогии Рейнольдса для пластины в течении Рэлея для несжимаемой жидкости, как и для пластины, расположенной под нулевым

углом атаки, при наличии ламинарного несжимаемого пограничного слоя имеет максимум как функция числа Прандтля.

Перечисленные выше результаты являются **новыми**. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, не вызывает сомнений. **Достоверность** полученных результатов обеспечивается использованием проверенных методов прямого статистического моделирования, сравнением с аналитическими решениями в свободномолекулярном режиме и с решениями уравнений Навье-Стокса в рамках континуального подхода; проводилось сравнение части результатов с экспериментальными данными, а также с расчетами других авторов, получено хорошее соответствие.

По содержанию диссертации можно сделать следующие **замечания**:

1. **Положения, выносимые на защиту**, отдельно сформулированы только в автореферате, хотя и перечисляются в заключении диссертации. Кроме того отсутствует подробный обзор современного состояния вопроса, который позволил бы выявить нерешенные проблемы и определить место результатов автора в современной динамике разреженного газа. Это несколько затрудняет оценку достижений автора.

2. Недостаточно внимания уделено конкретным практическим приложениям результатов, полученных в диссертации.

3. Обнаружен ряд интересных эффектов, связанных с немонотонным поведением напряжения трения и потоков энергии при увеличении степени разреженности в различных задачах. Однако экспериментального подтверждения ни одного из данных эффектов не приводится. Есть несколько сравнений с экспериментом (например, рисунок 4.1, таблица 7.1), но они касаются классических случаев, в которых поведение параметров монотонно. При этом эксперименты были выполнены в 1954 и 1971 гг. Появились ли за это время методики эксперимента, позволяющие уловить эффекты, предсказанные теоретически? Было бы полезно сформулировать основные принципы

эксперимента, который мог бы подтвердить результаты работы. Также было бы полезно сравнить результаты с экспериментальными исследованиями задачи Куэтта, выполненными группой В.А.Лебига. См., например, [Лебига В.А., Зиновьев В.Н., Пак А.Ю., Жаров И.Р., Моделирование течения Куэтта в кольцевом зазоре // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Физика. 2016. Т. 11. № 4. С. 52-60] и другие работы коллектива.

4. В диссертации используется граничное условие диффузного отражения на поверхности. Никак не комментируется возможное влияние других, более реалистичных, граничных условий на немонотонность поведения напряжения трения и потоков энергии.

5. Есть ряд замечаний редакционного плана:

В Главе 4 рассматривается неподвижный внутренний цилиндр, однако в постановке задачи в п.4.1 его скорость ненулевая. Можно было бы записать общую постановку задачи для глав 4 и 5, а потом уже рассмотреть неподвижный внутренний/внешний цилиндр.

В таблице 4.1. должна быть ссылка на работу [138], а не [137] (в комментариях к таблице на с. 84 ссылка правильная); в подписях к таблице 4.2 и рис. 4.1, посвященных верификации расчетов, в главе 4 указано, что неподвижен внешний цилиндр, тогда как в этой главе рассматривается случай, когда неподвижен внутренний. Правильнее было бы провести верификацию расчетов вслед за общей постановкой перед главами 4 и 5; в легенде рисунка 4.1. указана работа [2] вместо [133]; на стр. 147 ссылка на формулы (5.1) и (5.2) вместо (6.1) и (6.2); на стр. 150 в левых частях двух последних формул пропущен множитель β . Во второй из этих формул еще одна опечатка: должно быть $\beta \rightarrow \infty$, а не $\beta \rightarrow 1$; на рис. 7.5 не совсем ясно, чему соответствует T ; на рис. 7.6 на оси абсцисс должна быть зависимость от K_n ; на стр. 180 непонятно, к чему относятся ссылки на 7.10-7.12, 1.15; в тексте имеется ряд опечаток и погрешностей в пунктуации.

Указанные замечания не носят принципиального характера и не снижают научной ценности работы в целом. Диссертация является

На основании сказанного считаю, что диссертация «Кинетические эффекты и аналогия Рейнольдса в классических задачах гидрогазодинамики» соответствует требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842 в ред. от 25.01.2024. Автор диссертации, Бутковский Александр Викторович, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.9 — Механика жидкости, газа и плазмы.

Официальный оппонент,
Кустова Елена Владимировна
доктор физико-математических наук,
профессор, профессор кафедры гидроаэромеханики
математико-механического факультета
Санкт-Петербургского государственного университета
199034, Санкт-Петербург,
Университетская наб., д. 7–9
(812) 363-60-00
e.kustova@spbu.ru

Е.В. Кустова

ПОДПИСЬ РУКИ
УДОСТОВЕРЯЮ

ЗАМЕСТИТЕЛЬ НАЧАЛЬНИКА
УК ГУОРЛ О.С.



08.06.2026

Отзыв

на диссертационную работу Бутковского А.В. "Кинетические эффекты и аналогия Рейнольдса в классических задачах гидрогазодинамики", представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.9 — Механика жидкости, газа и плазмы.

Диссертационная работа является фундаментальным исследованием, посвященным обнаружению и изучению физических эффектов в классических течениях гидрогазодинамики: плоском и цилиндрических течениях Куэтта, течении Рэлея (первой задаче Стокса), а также течении, возникающем при обтекании пластины, расположенной под нулевым углом атаки. В диссертации всесторонне исследуется влияние параметров течений на потоки импульсов и энергии, передаваемых поверхностям, ограничивающим течения. Автором найдено 14 групп различных эффектов. Это эффекты перемены знака, эффекты немонотонности, эффекты резкого изменения потоков импульса и энергии, а также эффект прекращения влияния параметра течения. Большая часть эффектов — это эффекты переходного режима, но и в сплошносредном и в свободномолекулярном режимах автором получен ряд весьма интересных результатов.

Актуальность темы исследований обусловлена интенсивным развитием наукоемких отраслей промышленности, направленных на создание и совершенствование вакуумной и авиационно-космической техники, а также разработку новых нанотехнологий.

Диссертация состоит из 4 частей. В первой части, включающей три главы, исследуются эффекты вызванные изменением числа Кнудсена. Эффекты найдены с использованием метода прямого статистического моделирования. Автор объясняет найденные эффекты конкуренцией процессов поворота, торможения и термализации совокупности падающих молекул. Несмотря на простоту модели она позволяет объяснить все найденные эффекты в таких достаточно различных течениях как плоское течение Куэтта (глава 1), течение Рэлея (глава 2) и течение, возникающее при обтекании пластины под нулевым углом атаки (глава 3). Следует отметить, что какие-либо кинетические эффекты воздействия на пластину в течении Рэлея не были ранее известны. Наиболее интересными эффектами, описанными в первых трех главах и проявляющимися при изменении Kn представляются:

- 1) Эффекты перемены знака потока энергии, передаваемой пластине (во всех трех течениях).
- 2) Эффекты максимума потока энергии, отдаваемой «горячей» пластиной (во всех трех течениях).
- 3) Эффект двух экстремумов (минимума и максимума) потока нормального импульса, передаваемого пластине, расположенной под нулевым углом атаки при ее дозвуковом околозвуковом обтекании.

Во второй части, включающей четвертую и пятую главы, исследуются эффекты цилиндрических течений Куэтта вызванные, главным образом,

изменением скорости вращения внешнего (глава 4) и внутреннего (глава 5) цилиндров. Многие из найденных эффектов объясняются конкуренцией диссипативных и центробежных процессов. Отметим, что какие-либо эффекты воздействия на поверхности в цилиндрическом течении Куэтта ранее были неизвестны. Наиболее интересными эффектами, описанными в этой части диссертации представляются:

- 1) Эффекты максимума (по скорости вращения внешнего цилиндра) потоков тангенциального и нормального импульса и потока энергии, передаваемых цилиндрам
- 2) Эффект очень резкого перехода от слаборежеженного течения вблизи внутреннего цилиндра к свободномолекулярному при очень малых числах Кнудсена и больших скоростях.
- 3) Эффект минимума (по скорости вращения внутреннего цилиндра) потока нормального импульса, передаваемого внутреннему цилиндру в переходном режиме течения Куэтта с вращающимся внутренним цилиндром.

Кроме того, автором убедительно показано, что зависимости потоков импульса и энергии, передаваемых поверхностям, от скорости вращения в течении Куэтта разреженного газа с вращающимся внутренним цилиндром кардинально отличается от аналогичных зависимостей в течении Куэтта с вращающимся внешним цилиндром. И в этом смысле течение Куэтта разреженного газа с вращающимся внутренним цилиндром ближе к плоскому течению Куэтта, чем к течению Куэтта с вращающимся внешним цилиндром.

В третьей части, состоящей из 6 главы найдены:

- 1) Положение и величина локального максимума потока энергии в задаче о теплопередаче между коаксиальными цилиндрами и в задаче о теплопередаче между концентрическими сферами, вызванного изменением температуры поверхности.
- 2) Положение и величина локального максимума потока энергии, вызванного изменением температуры поверхности, в плоском и продольном цилиндрическом течениях Куэтта.

Эти результаты, полученные аналитически с помощью решений кубических уравнений (для свободномолекулярного режима), являются красивым продолжением исследований локальных максимумов потоков энергии начатых О.Г. Фридлендером, нашедшим локальный максимум в задаче о теплопередаче между неподвижными плоскими пластинами (МЖГ, №1, 1980).

В четвертой части, состоящей из 7 главы, исследуется аналогия Рейнольдса и эффекты, вызванные изменением числа Прандтля и получены следующие результаты:

- 1) В предположении постоянства Pr в результате интегрирования уравнений Навье-Стокса получено точное соотношение между потоком энергии, передаваемой поверхности, и напряжением трения на поверхности в продольном цилиндрическом течении Куэтта вязкого сжимаемого газа.
- 2) Температуры и скорости граничных поверхностей влияют на

коэффициент аналогии Рейнольдса в переходном режиме плоского и продольного цилиндрического течений Куэтта, течения Рэлея и течения, возникающего при сверхзвуковом обтекании пластины под нулевым углом атаки, в основном через число Эккерта.

- 3) Коэффициент аналогии Рейнольдса для пластины в течении Рэлея для несжимаемой жидкости имеет максимум как функция числа Прандтля.
- 4) Коэффициент аналогии Рейнольдса для пластины, расположенной под нулевым углом атаки, при наличии ламинарного несжимаемого пограничного слоя имеет максимум как функция числа Прандтля.

Следует отметить, что два последних результата особенно интересны, так как относятся к тем разделам гидродинамики, которые ранее тщательнейшим образом изучались многими исследователями на протяжении нескольких десятилетий.

Достоверность результатов исследования гарантируется высокой эффективностью метода прямого статистического моделирования, выполнением фундаментальных физических законов сохранения энергии и импульса и согласием с результатами расчетов, полученными другими авторами другими методами, а также с результатами экспериментов. Результаты работы прошли апробацию на международных конференциях по динамике разреженного газа (RGD-28, Сарагоса, Испания, 2012; RGD-31, Глазго, Великобритания, 2018; RGD-32, Сеул, Республика Корея, 2022). Они опубликованы в 20 ведущих рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК, из которых 10 входят в первый квартиль (Q1) в базах Scopus и Web of Science.

Полученные в диссертации результаты, проясняют природу неравновесных течений разреженного газа и стимулируют дальнейшие теоретические и экспериментальные исследования явлений переноса в разреженном газе. Их можно рекомендовать для использования в учебном процессе в вузах при подготовке студентов и аспирантов по специальностям «Молекулярная газовая динамика» и «Вакуумная техника», в частности при выборе тем дипломных и кандидатских работ.

Таким образом, актуальность темы исследований, научная новизна, а также достоверность, научная и практическая ценность полученных результатов сомнений не вызывают.

Автореферат достаточно полно и подробно отражает результаты диссертационной работы.

По работе имеются следующие замечания:

1. В диссертации используются молекулярные модели «твердые сферы» и «максвелловские молекулы». Было бы более естественным использование современных молекулярных моделей. Не вызывает сомнений то, что расчеты с более современной молекулярной моделью, привели бы к обнаружению тех же самых эффектов, но ее использование прибавило бы диссертации изящества.
2. В диссертации в задаче Куэтта исследована немонотонность по числу Кнудсена потоков энергии и нормального импульса. Однако не

исследован вопрос о зависимости расхода от числа Кнудсена. что не менее интересно. Иными словами, хотелось бы выяснить имеет ли место парадокс Кнудсена не только в течении Пуазейля, но и в течении Куэтта.

3. В подписях к рис. 1.3 на с.20 и к рис. 1.7 на с.25 молекулярная модель названа псевдомаксвелловской. В остальном тексте та же модель называется максвелловской. И хотя в молекулярной газовой динамике принято и то и другое название, хотелось бы, чтобы автор в тексте диссертации придерживался какого-либо одного наименования.
4. Цифры 1 и 3 у кривых на рис. 5.2b следует переставить местами.
5. В диссертации есть две главы, посвященные цилиндрическим течениям Куэтта. Их следовало бы объединить в одну главу, сократив, таким образом, общее число глав до шести.

Приведенные замечания не влияют на общую положительную оценку работы.

По актуальности темы исследований, достоверности, научной новизне и практической ценности полученных результатов диссертация Александра Викторовича Бутковского "Кинетические эффекты и аналогия Рейнольдса в классических задачах гидрогазодинамики" удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.9 — Механика жидкости, газа и плазмы, а ее автор заслуживает присуждения ему искомой степени.

Официальный оппонент,
профессор кафедры фундаментальной физики
и нанотехнологии Государственного университета просвещения
доктор физико-математических наук, доцент Кузнецов М.М.

Подпись
удостоверяю

ЗАМЕСТИТЕЛЬ НАЧАЛА
ОТДЕЛА КАДРОВ
СТРОИЛОВА Н

19.05.2026



Контактные данные:

Тел. +7 (906) 037-30-99, email: kuznets-omn@yandex.ru

Место работы:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Государственный университет просвещения»
105005, г. Москва, вн. тер. г. муниципальный округ Басманный, ул. Радио, д. 10А, стр. 2

Контактные телефоны: +7 (495) 780-09-40

Факс: +7 (495) 780-09-43

Отзыв официального оппонента

на диссертационную работу Бутковского Александра Викторовича «Кинетические эффекты и аналогия Рейнольдса в классических течениях гидрогазодинамики» по специальности 1.1.9 — Механика жидкости, газа и плазмы на соискание ученой степени доктора физико-математических наук

Актуальность темы диссертационной работы. Работа несомненно актуальна: современное развитие вакуумной и авиационно-космической техники, создание новых нанотехнологий требует совершенствования подходов. Исследование экстремальных свойств тепломассопереноса при воздействии на поверхности поможет в поиске оптимальных параметров при создании различных приборов и устройств. Нахождение перемены знака, например, потоков энергии, действующих на тело, позволит качественно изменить протекающие процессы в системах. В работе обсуждаются хорошо известные задачи, но тем интереснее, что обнаруженные эффекты мало или вообще не изучались до работ диссертанта. Принципиальным является исследование неравновесных течений на масштабе длины свободного пробега, т.е. при числе Кнудсена порядка единицы. Также эффекты могут проявляться при фиксированной разреженности при изменении других параметров задачи.

Анализ содержания диссертации с указанием новизны. Диссертационная работа состоит из введения, семи глав, заключения и списка литературы.

Во **Введении** дается краткий обзор эффектов, специфичных для течений разреженного газа. Внимание уделено выявлению экстремальных значений некоторых величин, в частности, парадоксу Кнудсена. Обсуждаются обнаруженные отечественными авторами экстремумы аэродинамических величин на границах при различных режимах течений.

В основном объеме диссертационной работе ведется планомерное исследование как стационарных, так и нестационарных течений. Обнаруженные эффекты являются следствием процессов поворота, торможения и термализации совокупности падающих на твердые поверхности молекул. Что анализируется качественно и количественно.

В **Главе 1** изучаются экстремальные свойства силовых и других характеристик на границе пластины в плоской задаче Куэтта. Данная простая одномерная задача является своего рода тестом, на примере которого обсуждаются основные эффекты. Ранее некоторыми авторами уже обнаруживались эффекты экстремальности, но в диссертации подводится обобщенный и планомерный итог исследования. С полнотой показано достижение при больших скоростях течения максимума потока нормального импульса, передаваемого пластине, при изменении степени разрежения. Также достигает максимума поток энергии, передаваемый пластиной. Поток энергии, передаваемой пластине, меняет

знак при изменении числа Кнудсена. Несомненным достоинством диссертации является то, что количественные оценки сопровождаются качественными пояснениями эффектов. Это один из факторов достоверности полученных результатов.

В **Главе 2** изучаются нестационарные процессы на малых временах, что раньше мало исследовалось, здесь они представлены задачей Рэлея. В стационарной задаче Куэтта рассматриваются величины как функции числа Кнудсена. В задаче Рэлея число Кнудсена обратно пропорционально времени. Так что поиск экстремумов находится при зависимости величин от времени. Потоки энергии и нормального импульса, передаваемых пластине, а также напряжение трения на пластине достигают в определенные моменты времени максимума. При этом поток энергии, отдаваемой пластиной, достигает для некоторого момента времени максимума. Знак потока энергии, передаваемой пластине, через некоторое время после начала движения пластины меняется.

В **Главе 3** выявляются эффекты на границе пластины при нулевом угле атаки. Проведено исследование зависимости от числа Кнудсена энергии, передаваемой пластине, причем здесь учитывалось влияние и других параметров: числа Маха и температуры. Для этой задачи обнаружена перемена знака среднего потока энергии, передаваемой пластине при изменении числа Кнудсена, при этом средний поток энергии, отдаваемой пластиной как функция числа Кнудсена имеет максимум. При температуре стенки большей, чем температура набегающего потока, выявлен минимум по потоку энергии при промежуточном разрежении. Здесь качественно объясняются полученные в расчетах эффекты, в частности изменение напряжения. При уменьшении числа Кнудсена от режима свободномолекулярного обтекания возрастает число межмолекулярных столкновений, это приводит к тому, что частицы, отразившиеся от поверхности, испытывают соударения, которые их направляют обратно к поверхности, что ведет к увеличению напряжения. От малых величин числа Кнудсена при его увеличении уменьшается число Рейнольдса, что означает рост погранслоя. Возрастание толщины вытеснения погранслоя приводит к увеличению давления за ударной волной, возникающей при взаимодействии с потоком. Такое возрастание напряжений и потоков энергии, передаваемых пластине, при отходе как от свободномолекулярного, так и сплошносредного режимов означает, что где-то в промежуточном режиме при некотором числе Кнудсена есть максимум этих величин. При сверхзвуковом обтекании пластины всегда существует по крайней мере один максимум потока нормального импульса. Показано численно и качественно объяснено, что при малых числах Маха достигается небольшой минимум. Хотя здесь, возможно, требуются более тщательные вычисления, поскольку величина минимума порядка процента должна оказаться больше вычислительной ошибки. При дозвуковом обтекании пластины такая

зависимость имеет минимум, а при околосвуковом дозвуковом может иметь и минимум и максимум. Также найдено существенное уменьшение влияния температуры и напряжения трения в переходном режиме при не очень больших числах Маха. Дается качественная трактовка. Показано, что в широком диапазоне температур при дозвуковых и умеренных сверхзвуковых числах Маха в переходном режиме температура пластины мало влияет на среднюю силу трения, действующую на пластину.

В **Главах 4 и 5** исследуется цилиндрическая задача Куэтта с фиксированным внутренним и внешним цилиндром соответственно. Изучается влияние скорости вращения, отношения температур и отношения радиусов цилиндров на напряжение трения и потоки энергии, передаваемой цилиндрическим поверхностям. Проводится верификация метода ПСМ (прямого статистического моделирования), в частности, сравнением с известными экспериментами по плотности в зависимости от расстояния, показавшая удовлетворительные результаты. Зависимости напряжения и потока энергии на внутреннюю поверхность от скорости внешнего цилиндра для свободномолекулярного режима для различных значений отношения радиусов показывают максимумы при промежуточных значениях скорости. Это получило в диссертации и качественно обоснованное объяснение. Напряжение трения на поверхности цилиндра и поток энергии, передаваемой цилиндрам, при малых K_n и больших скоростях вращения внешнего цилиндра резко уменьшаются при достижении определенной скорости вращения внешнего цилиндра. Поток энергии, передаваемой цилиндрической поверхности, в свободномолекулярном течении Куэтта при изменении отношения радиусов меняет знак. В промежуточных по числу Кнудсена режимах течения фиксировались также максимумы потоков отмеченных величин на внутренний цилиндр. Найдено, что решение уравнений Навье-Стокса с условиями скольжения гораздо лучше описывает течение, чем с условиями прилипания. Сравнение проводилось с решениями по ПСМ. Для течения с неподвижным внешним цилиндром были обнаружены следующие эффекты. Абсолютная величина потока нормального импульса, передаваемого внутреннему цилиндру, имеет в переходном режиме минимум как функция скорости внутреннего цилиндра. В свободномолекулярном режиме напряжение трения и потоки энергии, передаваемые цилиндрам, имеют максимум как функции отношения радиусов цилиндров.

В **Главе 6** рассматриваются различные задачи, где есть условные температурные максимумы потоков энергии. Изучается условный максимум потока энергии в теплопроводности между коаксиальными цилиндрами. В явном виде получены отношения

температур поверхностей, соответствующих максимумам потока энергии, передаваемой внутренней и внешней цилиндрическим поверхностям, при фиксированной температуре другой поверхности для произвольных значений отношения радиусов поверхностей. Для свободномолекулярного режима получены аналитические выражения для максимума потока энергии между двумя цилиндрическими, сферическими поверхностями и в продольной цилиндрической задаче Куэтта. С помощью метода ПСМ исследовано влияние числа Кнудсена на такие процессы и получены значения максимальных потоков энергии при вычисленных параметрах в указанных задачах. В задачах о теплопередаче в газе с цилиндрической и сферической симметрией, а также в плоской и продольной цилиндрической задачах Куэтта существуют максимумы потока энергии, передаваемой одной из поверхностей при изменении ее температуры при фиксированной температуре другой поверхности. Для свободномолекулярного режима максимумы найдены и исследованы аналитически, а для переходного режима -- численно методом ПСМ.

По сути ставится вопрос, как обобщить многочисленные эффекты, отмеченные в работе, в этом смысле значимо изучение аналогии Рейнольдса. В **Главе 7** определяется коэффициент аналогии Рейнольдса для плоского и продольного цилиндрического течения Куэтта, задачи Рэлея и задачи об обтекании пластины под нулевым углом атаки. В плоской задаче Куэтта в обоих предельных режимах температуры поверхностей и их относительные скорости влияют на аналогию Рейнольдса только через число Эккерта. Проведено исследование в промежуточных режимах на основе ПСМ. Показано, что в этой задаче, а также в цилиндрической продольной задаче Куэтта и в задаче о сверхзвуковом обтекании пластины под нулевым углом атаки коэффициент аналогии Рейнольдса зависит в основном только от двух параметров подобия: числа Кнудсена и числа Эккерта. Можно отметить также следующие результаты. Коэффициент аналогии Рейнольдса, как функция числа Прандтля в задаче Рэлея для несжимаемой жидкости имеет максимум, если число Эккерта положительно. Коэффициент аналогии Рейнольдса для пластины, расположенной под нулевым углом атаки, при наличии ламинарного несжимаемого пограничного слоя имеет максимум как функция числа Прандтля, если число Эккерта положительно. В предположении постоянства числа Прандтля в результате интегрирования уравнений Навье-Стокса получено точное соотношение между потоком энергии, передаваемой поверхности, и напряжением трения на поверхности в продольном цилиндрическом течении Куэтта вязкого сжимаемого газа и показано, что коэффициент аналогии Рейнольдса в продольном цилиндрическом течении Куэтта вязкого сжимаемого газа зависит только от числа Эккерта и не зависит от отношения радиусов.

Теоретическая и практическая значимость работы. В диссертации тщательно исследованы многочисленные явления тепломассопереноса, связанные с экстремальными свойствами. Изучено силовое и тепловое воздействие на твердые поверхности в различных типовых задачах. Что способно дать перспективу оптимального проектирования устройств.

Вместе с тем стоит высказать некоторые **замечания**.

1. Вопросов не возникает при обсуждении появления экстремальных значений для величин, которые меняются на десятки процентов при изменении параметров или при смене знаков величин также при больших изменениях, но появление некоторых экстремумов порядка процента требует более тщательного вычислительного анализа. В задаче Рэлея находилась статистическая ошибка, согласно указанию в диссертации, она не превышала величину в 1-2%. Подтверждение экстремумов величиной также порядка процента требует соответственно, как указывалось, подробного пояснения.

2. Вообще вопрос о точности вычислений с помощью статистического моделирования может быть задан. Сравнение с решениями по уравнениям Навье-Стокса безусловно важная часть проверки, но сходимость по собственным числовым параметрам к решению желательно было бы провести и продемонстрировать. В определении коэффициента Рейнольдса в задаче Рэлея при обсуждении аналогии Рейнольдса обнаруживается большой статистический шум при выявлении зависимости по времени, данный численный результат не обсуждается и статистическая ошибка не оценивается.

3. Метод решения в работе рассматривается, но не очень подробно, это понятно, поскольку инструмент в принципе хорошо известен, а именно ПСМ. Но некоторые детали надо было бы осветить. В частности, решение задач при малых числах Маха с помощью ПСМ сталкивается с трудностями, надо было бы отметить пути их преодоления в работе. Сравнение проводится с другими методами, например, с модельными уравнениями, но нет сравнения с прямым методом решения уравнения Больцмана -- наиболее точным приближением, например, в задаче об обтекании пластины или в задаче о теплопередаче (частный случай задачи Куэтта), где имеются тестовые вычисления.

4. Проблемам, направленным на приложение обнаруженных эффектов (это представляет интерес) и постановке соответствующих экспериментов не уделено внимания. Обсуждение опытного подтверждения эффектов могло бы соседствовать и с проблемами приложений, что определяет также перспективы данных исследований.

Отмеченные недостатки не снижают высокой оценки настоящей диссертации, представляющей законченный труд, где решены фундаментальные задачи.

Основные результаты диссертации опубликованы в 20-ти статьях. Из них 15 напечатаны в высокорейтинговых отечественных и международных изданиях: журналах ВАК, в

журналах, индексируемых в системах цитирования WoS и Scopus, 5 – опубликованы в трудах международных конференций (Scopus). Результаты прошли апробацию на российских и международных семинарах и конференциях. Личный вклад автора заключается в участии в постановке задач, проведении численных расчетов изучаемых задач, анализе полученных результатов и подготовке статей и докладов на конференциях.

Автореферат подробно и полно отражает результаты диссертационной работы.

Диссертационная работа Бутковского А.В. «Кинетические эффекты и аналогия Рейнольдса в классических течениях гидрогазодинамики» является завершенной научно-квалификационной работой, выполненной на высоком научном уровне по актуальной тематике. Работа полностью удовлетворяет требованиям Положения «О присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 (в действующей редакции), предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор Бутковский Александр Викторович заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук
(1.1.9 - Механика жидкости, газа и плазмы)
профессор, главный научный сотрудник
Федерального исследовательского центра
«Информатика и управление» РАН
Аристов Владимир Владимирович
Телефон: 8-916-210-05-30
E-mail: aristovvl@yandex.ru



В.В.Аристов

