

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор МГУ имени М.В. Ломоносова,
чл.-корр. РАН, профессор А.А. Федянин



А.А. Федянин

« 5 » июня 2026 г.

ОТЗЫВ

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» на диссертационную работу 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».

Диссертационная работа А.В. Бутковского посвящена исследованию кинетических эффектов в классических задачах гидрогазодинамики разреженного газа и анализу аналогии Рейнольдса в различных режимах течения. В центре внимания автора находятся эффекты, возникающие при изменении числа Кнудсена, температур и скоростей граничных поверхностей, а именно особенности поведения потоков импульса и энергии при взаимодействии с поверхностью.

Актуальность темы диссертации не вызывает сомнений. Динамика разреженных газов и молекулярная газодинамика остаются важнейшими направлениями современной механики жидкости, газа и плазмы. Исследование переходных режимов течения, в которых число Кнудсена имеет порядок единицы, имеет как фундаментальное, так и прикладное значение. Подобные режимы возникают в вакуумной технике, микро- и наногазодинамике, задачах авиационно-космической техники, а также при анализе процессов тепломассопереноса в сильно неравновесных газовых средах. При этом классические задачи — течение Куэтта, задача Рэлея, обтекание плоской пластины, цилиндрические течения Куэтта — играют особую роль, поскольку позволяют выявлять и интерпретировать фундаментальные механизмы переноса в относительно простой и физически прозрачной постановке.

Цель диссертационной работы состоит в построении общей картины влияния параметров течения на силовое и тепловое воздействие на граничные поверхности, включая поток энергии, напряжение трения, поток нормального импульса и их соотношения. Такая постановка задачи представляется обоснованной и важной, поскольку известные ранее

кинетические эффекты — например, термоэффузия, парадокс Кнудсена, изменение знака сил при термофорезе и фотофорезе, немонотонность аэродинамических характеристик тел в разреженном газе — показывают, что переходные режимы могут обладать качественно новыми свойствами, отсутствующими как в свободномолекулярном, так и в сплошнوسредном предельных режимах.

Основным методом исследования в диссертации является метод прямого статистического моделирования (PCM, DSMC), дополненный аналитическим рассмотрением свободномолекулярных пределов и предельных случаев. Такой выбор методов является естественным для рассматриваемого класса задач. Метод прямого статистического моделирования позволяет получать надежные численные решения в переходном режиме, а аналитические результаты для свободномолекулярных течений дают физическую интерпретацию обнаруженных эффектов и позволяют контролировать предельное поведение рассматриваемых величин.

Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения и списка использованных источников. Работа имеет значительный объем, содержит большое число расчетных результатов, графиков и физических интерпретаций. Основные результаты опубликованы в ведущих российских и международных рецензируемых журналах, в том числе в журналах *Physics of Fluids*, *Physical Review E*, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *European Journal of Mechanics* и других изданиях, что свидетельствует о достаточно высокой степени апробации работы.

Во введении обоснована актуальность темы, дан обзор известных кинетических эффектов, сформулированы цель и задачи диссертации, приведены положения, выносимые на защиту, указаны научная новизна, достоверность и практическая значимость полученных результатов. Введение показывает, что работа является не набором разрозненных расчетов, а попыткой построить целостную физическую картину влияния параметров течения на тепловое и силовое воздействие на поверхности в различных классических задачах динамики разреженного газа.

Первая глава посвящена плоскому течению Куэтта разреженного газа. Автор рассматривает стационарное течение между двумя параллельными пластинами при различных числах Кнудсена, числах Маха и отношениях температур поверхностей. В главе анализируются поток нормального импульса, напряжение трения и поток энергии, передаваемые пластине. Существенным результатом является обнаружение максимума зависимости потока нормального импульса от числа Кнудсена. Кроме того, в работе показано, что поток энергии, отдаваемой горячей пластиной, может иметь максимум при изменении числа Кнудсена, а поток энергии, передаваемый пластине, может менять знак за счет изменения степени разреженности газа. Эти результаты расширяют известные представления о плоском течении Куэтта, в котором ранее были известны эффекты немонотонности напряжения трения и потока энергии при больших числах Маха.

Важным достоинством первой главы является физическая интерпретация найденных эффектов. Автор связывает их с конкуренцией трех процессов: дополнительного поворота взаимодействующих с поверхностью молекулами, торможения совокупности падающих

молекул и их термализации. Такая интерпретация оказывается центральной для всей диссертационной работы, поскольку позволяет объяснить сходные эффекты в других, на первый взгляд, существенно отличающихся течениях.

Вторая глава посвящена задаче Рэлея для разреженного газа. Рассматривается течение, возникающее в полупространстве после внезапного начала движения пластины и скачкообразного изменения ее температуры. Особенность задачи Рэлея состоит в том, что по мере увеличения времени, прошедшего от начала движения, течение естественным образом проходит путь от свободномолекулярного режима через переходный к навье-стоксовому. Поэтому в этой задаче кинетические эффекты могут проявляться без искусственного изменения параметров, только вследствие временной эволюции течения.

В главе показано, что в задаче Рэлея существуют максимумы по времени потоков энергии и нормального импульса, передаваемых пластине, а также напряжения трения на пластине. Кроме того, обнаружены максимум по времени потока энергии, отдаваемой пластиной, и эффект перемены знака потока энергии, передаваемого пластине. Эти эффекты являются нестационарными аналогами эффектов, найденных в плоском течении Куэтта. Такой результат представляется существенным, поскольку задача Рэлея традиционно использовалась прежде всего как тестовая задача для методов решения кинетических уравнений, тогда как в диссертации она рассматривается как самостоятельный объект для выявления физических эффектов переходного режима.

Третья глава посвящена обтеканию пластины разреженным газом под нулевым углом атаки. Автор рассматривает дозвуковые, околосзвуковые и умеренно сверхзвуковые режимы, что особенно важно, поскольку большая часть классических работ по разреженному обтеканию пластины была связана с гиперзвуковыми течениями. Для решения стационарной задачи при дозвуковых и трансзвуковых числах Маха используется подход, основанный на рассмотрении устанавливающегося нестационарного течения, переходящего в пределе в стационарное. Такой подход позволяет обойти трудности, связанные с постановкой граничных условий в стационарной задаче дозвукового обтекания разреженным газом.

В этой главе получены важные результаты о поведении среднего по длине пластины потока нормального импульса, передаваемого пластине. Показано, что при равенстве температуры пластины и температуры невозмущенного газа зависимость этого потока от числа Кнудсена имеет один или несколько экстремумов при различных числах Маха. При сверхзвуковом обтекании существует максимум, при дозвуковом — минимум, а в околосзвуковом диапазоне возможны как минимум, так и максимум. Кроме того, установлено, что в широком диапазоне температур при дозвуковых, трансзвуковых и умеренно сверхзвуковых числах Маха температура пластины слабо влияет на среднюю силу трения в переходном режиме. Также показано существование максимума среднего потока энергии, отдаваемой пластиной, и возможность изменения знака среднего потока энергии при изменении числа Кнудсена.

Достоинством третьей главы является проведенная верификация расчетного подхода, включая сравнение с экспериментальными данными по силе трения при дозвуковом обтекании пластины. Это существенно повышает достоверность численных результатов,

особенно с учетом сложности постановки граничных условий для дозвуковых и околосзвуковых течений разреженного газа.

Четвертая глава посвящена цилиндрическому течению Куэтта разреженного газа с неподвижным внутренним цилиндром. В этой части работы исследуется влияние вращения внешнего цилиндра на напряжение трения, потоки энергии и потоки нормального импульса, передаваемые цилиндрическим поверхностям. Автор показывает, что зависимости напряжения трения и потоков энергии от скорости вращения внешнего цилиндра могут иметь максимумы. Кроме того, обнаружен эффект резкого уменьшения напряжения трения и потоков энергии, передаваемых цилиндрам, при малых средних числах Кнудсена и больших скоростях вращения внешнего цилиндра.

Этот результат представляет особый интерес, поскольку он связан с очень резким переходом от слаборазреженного течения вблизи внутреннего цилиндра к свободномолекулярному режиму при малых средних числах Кнудсена. Такой эффект показывает, что среднее число Кнудсена не всегда является достаточной характеристикой локального режима течения, особенно в задачах с сильным центробежным перераспределением плотности и температуры. Физическая интерпретация этого эффекта является одной из наиболее интересных частей диссертации.

Пятая глава посвящена цилиндрическому течению Куэтта с неподвижным внешним цилиндром. В ней исследуется ситуация, когда вращается внутренний цилиндр. Для этой постановки рассмотрены эффекты максимума потоков тангенциального импульса и энергии в свободномолекулярном режиме, а также эффект минимума потока нормального импульса, передаваемого вращающемуся внутреннему цилиндру, в переходном режиме. Полученные результаты дополняют картину, построенную в предыдущей главе, и показывают, что цилиндрические течения Куэтта обладают богатой совокупностью кинетических эффектов, связанных с вращением граничных поверхностей.

Шестая глава посвящена условным температурным максимумам потоков энергии в задачах динамики разреженного газа. Рассматриваются задачи теплопередачи с цилиндрической и сферической симметрией, а также плоское и продольное цилиндрическое течения Куэтта. Автор исследует локальные максимумы потока энергии при фиксированной температуре одной из граничных поверхностей и изменении температуры другой поверхности. Часть результатов получена аналитически для свободномолекулярного режима, часть — численно методом прямого статистического моделирования для переходного режима. Этот раздел важен тем, что показывает: немонотонность потоков энергии может возникать не только при изменении числа Кнудсена или скорости поверхности, но и при изменении температуры одной из границ.

Седьмая глава посвящена аналогии Рейнольдса. В ней рассматриваются параметры подобия для коэффициента аналогии Рейнольдса и отношения потоков энергии в задаче Куэтта, задача Рэлея для несжимаемой жидкости, течение Рэлея разреженного газа, ламинарное обтекание пластины вязкой несжимаемой жидкостью, сверхзвуковое обтекание пластины разреженным газом и продольное цилиндрическое течение Куэтта. Важным результатом является вывод о том, что температуры и скорости граничных поверхностей

вливают на коэффициент аналогии Рейнольдса главным образом через число Эккерта. Для ряда задач обнаружены максимумы коэффициента аналогии Рейнольдса как функции числа Прандтля. В продольном цилиндрическом течении Куэтта получены соотношения, связывающие поток энергии и напряжение трения, что представляет самостоятельный интерес для теории переноса.

Научная новизна диссертации состоит в обнаружении и систематическом исследовании ряда ранее не описанных кинетических эффектов в классических задачах гидрогазодинамики. К числу наиболее существенных результатов следует отнести:

1. Обнаружение максимума потока нормального импульса, передаваемого пластине, при изменении числа Кнудсена в плоской задаче Куэтта и задаче Рэлея;
2. Обнаружение минимума по числу Кнудсена среднего по длине пластины потока нормального импульса, передаваемого пластине, при дозвуковом обтекании пластины под нулевым углом атаки;
3. Обнаружение максимумов по времени напряжения трения и потоков энергии и нормального импульса, передаваемых пластине, в задаче Рэлея;
4. Обнаружение максимумов потока энергии, отдаваемой пластиной, в плоской задаче Куэтта, задаче Рэлея и задаче обтекания пластины;
5. Установление эффекта перемены знака потока энергии, передаваемой пластине, при изменении числа Кнудсена в нескольких классических течениях;
6. Обнаружение максимумов напряжения трения и потоков энергии и нормального импульса в цилиндрическом течении Куэтта с неподвижным внутренним цилиндром при увеличении скорости вращения внешнего цилиндра;
7. Обнаружение эффекта резкого уменьшения напряжения трения и потоков энергии при малых числах Кнудсена и больших скоростях вращения внешнего цилиндра;
8. Обнаружение минимума потока нормального импульса, передаваемого поверхности внутреннего цилиндра, в цилиндрическом течении Куэтта с неподвижным внешним цилиндром;
9. Исследование условных температурных максимумов потоков энергии* в задачах теплопередачи и течениях Куэтта;
10. Установление параметров подобия для аналогии Рейнольдса в ряде классических задач.

Достоверность полученных результатов обеспечивается применением хорошо апробированного метода прямого статистического моделирования, сравнением с предельными аналитическими результатами, решениями уравнений Навье–Стокса со скольжением, результатами других авторов и экспериментальными данными. Важным является то, что автор не ограничивается численным обнаружением эффектов, а дает их физическую интерпретацию через конкуренцию поворота, торможения и термализации молекул, падающих на поверхность. Такая интерпретация является существенным достоинством работы.

Практическая значимость диссертации состоит в расширении представлений о тепломассопереносе и силовом воздействии на поверхности в разреженных газах. Результаты

могут быть использованы при теоретических и численных исследованиях переходных режимов течения, в вакуумной технике, микро- и наногазодинамике, а также в учебном процессе при подготовке специалистов по молекулярной газовой динамике и смежным направлениям механики.

Следует отметить высокий уровень апробации результатов. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в рецензируемых журналах, включая ведущие международные издания, и докладывались на международных конференциях по динамике разреженного газа. Это подтверждает, что результаты работы прошли обсуждение в профессиональном научном сообществе.

В целом диссертация А.В. Бутковского производит впечатление логически завершённой, содержательной и цельной научной работы. Ее сильной стороной является не только обнаружение отдельных новых эффектов, но и построение общей физической картины, связывающей эти эффекты в различных классических задачах. Работа демонстрирует, что классические течения — течение Куэтта, задача Рэлея, обтекание пластины, цилиндрические течения — остаются источником новых результатов при рассмотрении их в переходных режимах разреженного газа.

Вместе с тем по диссертационной работе можно высказать несколько замечаний:

1. В работе, в основном, рассматриваются модельные постановки с диффузным отражением молекул от поверхностей. Было бы полезно подробнее обсудить, насколько обнаруженные эффекты устойчивы при неполной аккомодации и иных моделях газоповерхностного взаимодействия. Это особенно важно с точки зрения возможного применения результатов к реальным поверхностям в вакуумной и микроаэродинамической технике.

2. В диссертации приведен большой объем численных результатов, полученных методом прямого статистического моделирования. При этом для ряда тонких эффектов — например, небольших экстремумов или слабого влияния температуры пластины на трение — желательно было бы более систематически представить сведения о статистической погрешности, сходимости по числу частиц, размеру ячеек и шагу по времени. Такие данные позволили бы еще более наглядно подтвердить устойчивость обнаруженных эффектов.

3. Многие результаты формулируются как имеющие место «при соответствующих значениях параметров». С физической точки зрения это корректно, однако для удобства дальнейшего использования результатов было бы желательно свести области существования основных эффектов в более компактные таблицы или диаграммы по параметрам задачи: числу Кнудсена, числу Маха, отношению температур, отношению радиусов цилиндров и скоростям вращения.

4. Работа в значительной степени сосредоточена на классических геометриях: плоских пластинах, полупространстве, коаксиальных цилиндрах, сферической и цилиндрической симметрии. Это оправдано фундаментальным характером исследования, однако было бы интересно подробнее обсудить, какие из обнаруженных эффектов могут сохраняться в более сложных конфигурациях, например при обтекании тел конечной толщины, в каналах сложной формы или в трехмерных течениях.

5. В главах, посвященных аналогии Рейнольдса, получены важные результаты о параметрах подобия и роли числа Эккерта. Вместе с тем изложение этого материала местами требует значительных усилий от читателя. Представляется, что диссертация выиграла бы от дополнительного обобщающего раздела, в котором результаты по аналогии Рейнольдса были бы сопоставлены между всеми рассмотренными задачами в единой таблице или схеме.

6. В автореферате и тексте диссертации встречаются отдельные редакционные и терминологические шероховатости. Они не затрагивают существа полученных результатов.

Указанные замечания не являются определяющими и не снижают значимости и позитивной оценки работы.

Диссертационная работа Бутковского А.В. по своему содержанию, актуальности и решениям поставленных задач отвечает требованиям ВАК Минобрнауки РФ, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности: 1.1.9 - "Механика жидкости, газа и плазмы".

Отзыв обсужден и одобрен на заседании кафедры молекулярных процессов и экстремальных состояний вещества физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Протокол № 4 от «4» июня 2026 г.

Зав. кафедрой молекулярных процессов
и экстремальных состояний вещества
физического факультета
МГУ имени М.В. Ломоносова,
д.ф.-м.н., профессор



Сысоев Н.Н.

Профессор кафедры молекулярных процессов
и экстремальных состояний вещества
физического факультета
МГУ имени М.В. Ломоносова,
д.ф.-м.н., профессор



Уваров А.В.

Подписи Н.Н.Сысоева и А.В. Уварова заверяю:
Ученый секретарь Ученого Совета
физического факультета МГУ,
профессор



Стремоухов С.Ю.

Физический факультет Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Адрес: 119991, Российская Федерация, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

Телефон (495)939-31-60 . e-mail : info.ff@org.msu.ru официальный сайт: phys.msu.ru