

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Королькова Сергея Дмитриевича «Влияние межзвёздных атомов и магнитных полей на течение плазмы в астросферах», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности по специальности 1.1.9. «Механика жидкости, газа и плазмы»

В диссертации С.Д. Королькова на основе численного моделирования выполнено теоретическое исследование взаимодействия звёздного ветра (сверхзвукового течения от источника – звезды) с частично-ионизованным набегающим потоком межзвёздной среды. С точки зрения классической газовой динамики при взаимодействии формируются внешняя ударная волна (для сверхзвуковых условий в набегающем потоке) в межзвёздной среде, внутренняя ударная в течении от звезды, и тангенциальный разрыв между ними. В астрофизике тангенциальный разрыв называют астропаузой, а всю область взаимодействия – астросферой. Для сверхзвуковых условий в набегающем потоке определено влияние проникновения нейтральных атомов водорода из межзвёздной среды в астросферу и обратно на характеристики взаимодействия при изменении числа Кнудсена (отношения длины свободного пробега к характерному размеру области взаимодействия). Определено влияние собственного магнитного поля звезды на форму астропаузы и ее обтекание межзвёздной средой при изменении числа Маха межзвёздной среды (для дозвуковых и сверхзвуковых условий) и интенсивности магнитного поля.

Подход, основанный на использовании уравнений классической газовой динамики и уравнений идеальной МГД для описания взаимодействия звёздного ветра (в частном случае, солнечного ветра) с межзвёздной средой развивается на механико-математическом факультете МГУ, начиная с 1970 г. (работа В.Б. Баранова, К.В. Краснобаева, А.Г. Куликовского). Школа кафедры аэромеханики хорошо известна своими достижениями в области астрофизики. В работах В.Б. Баранова, К.В. Краснобаева, В.В. Измоденова получены фундаментальные результаты по структуре взаимодействия и, в том числе, по влиянию нейтральных атомов водорода в межзвёздной среде и магнитного поля звезды на течение в астросфере. Академик Г.Г. Черный в своей известной публичной лекции в Политехническом музее в 2007 году рассматривал эти работы, как яркое свидетельство тезиса о «вечно новой механике», когда совершенно неожиданно сложная задача астрофизики, сводится к решению системы уравнений классической механики.

Перед аспирантом была поставлена задача разработать алгоритмы для решения задач взаимодействия звёздного ветра с набегающим потоком межзвёздной среды при различных условиях и реализовать их в виде эффективных вычислительных модулей с использованием современных достижений

вычислительной техники и на их основе выполнить исследования в широком диапазоне изменения определяющих параметров.

С точки зрения оппонента, актуальность темы диссертации заключается в следующем:

Исследование структуры космоса ближнего и дальнего является одним из важнейших направлений исследования современной науки. К настоящему времени накопилось много экспериментальных данных, собранных с использованием наземных и космических телескопов и уникальных космических аппаратов, таких как Voyager 1 и 2, которые нуждаются в объяснении. Планируется запуск новых космических аппаратов, таких как IMAP (NASA, США), Interstellar Probe (NASA, США), Interstellar Express (CNSA, Китай) и Нуклон (РосКосмос, Россия). Обсуждаются совсем уж «фантастические» проекты, такие как космический буксир «Зевс» с ядерной энергетической установкой. Тема диссертации является актуальной, поскольку теоретические исследования позволяют не только объяснить наблюдаемые ранее явления, но и предсказать новые и соответствующим образом скорректировать программу предстоящих космических миссий для их обнаружения.

С точки зрения оппонента, новизна положений, выносимых на защиту, определяется следующими достижениями автора:

1. В рамках смешанной постановки на основе уравнений Эйлера классической газовой динамики (с дополнительными источниковыми членами) совместно с кинетическим подходом на основе уравнения Больцмана решена задача о взаимодействии звёздного ветра со сверхзвуковым потоком частично-ионизованной межзвёздной среды с учетом проникновения атомов водорода из межзвездной среды в астросферу в широком диапазоне изменения чисел Кнудсена, характеризующих длину свободного пробега атомов водорода (ранее были расчеты лишь некоторых избранных режимов). Определено положение основных поверхностей разрыва и рассчитаны двумерные и одномерные картины течения для предельных (плазмо-газодинамический предел для больших чисел Кнудсена и предел эффективного газа – для малых) и переходных режимов. Для переходных режимов обнаружен качественно новый эффект нагрева внешнего ударного слоя астросферы энергичными атомами, рождёнными во внутреннем ударном слое и области сверхзвукового звёздного ветра, который приводит к перестройке течения плазмы во внешнем ударном слое, так что вблизи тангенциального разрыва образуется область горячей разреженной плазмы, а вблизи внешней ударной волны формируется слой плотной плазмы.

2. На основе решения трехмерных уравнений идеальной МГД определено влияние собственного магнитного поля звезды на форму астропаузы и ее обтекание межзвездной средой при изменении числа Маха межзвёздной

среды (от дозвуковых условий к сверхзвуковым) и интенсивности магнитного поля звезды (ранее были расчеты лишь некоторых избранных режимов). Выполнен анализ эволюции режимов течения от трубчатой формы тангенциального разрыва (для малых чисел Маха) к классической параболической форме тангенциального разрыва (для больших чисел Маха) и определены критические числа Маха межзвездной среды для различных значений интенсивности магнитного поля звезды при которых изменяется форма тангенциального разрыва. Для промежуточных режимов, для которых реализуется характерная форма тангенциального разрыва, напоминающая круассан, обнаружен новый трехмерный эффект формирования области возвратного течения и дополнительной точки торможения с подветренной стороны трубки.

Отдельно следует выделить великолепный критический обзор (который не выносится на защиту), выполненный автором (глава 1, приложение А), в котором дается иллюстрированное введение в проблему с объяснением специфической терминологии (что важно для понимания диссертации широким кругом специалистов); с соблюдением хронологии анализируются полученные результаты; приводится авторский вариант формулировок и выводов основных классических решений (таких как решение Паркера для солнечного ветра с учётом гравитации); описаны ранние модели взаимодействия солнечного ветра с межзвёздной средой; обобщены имеющиеся результаты по влиянию нейтральных атомов водорода в межзвездной среде и магнитных полей звезды на структуру астросферы (что очень важно для оценки новизны, полученных в диссертации результатов). Также представлены авторские варианты решения одномерных газодинамических уравнений Эйлера, описывающих течение от сферического источника, в том числе для адиабатического течения в отсутствии сил, и получен гиперзвуковой предел, используемый в качестве граничного условия в последующих главах диссертации. Автор продемонстрировал редкое умение критически анализировать изложенные в научной литературе теоретические и экспериментальные результаты и излагать их своими словами. Учитывая сказанное, обзор по глубине охвата материала и понятности изложения, несомненно, можно считать достижением автора.

С точки зрения оппонента, обоснованность положений, выносимых на защиту, сомнений не вызывает:

Обоснованность использования моделей газовой динамики и идеальной МГД для описания взаимодействия плазмы звездного ветра с плазмой набегающего потока (в том числе с учетом магнитного поля звезды) и необходимость использования кинетических моделей для описания взаимодействия атомов водорода межзвездной среды с плазмой астросферы подтверждаются многочисленными исследованиями, выполненными ранее (сведения о которых приведены в обзоре) и, в том числе, наборами

экспериментальных данных, собранных с использованием наземных и космических телескопов и уникальных космических аппаратов, таких как Voyager 1 и 2.

Необходимо отметить, что автор много внимания уделяет интерпретации и обоснованию полученных результатов, что свидетельствует о его глубоком понимании проблемы. Каждая из глав (2,3) в которых описываются полученные результаты, содержит отдельное краткое введение, в котором объясняется, что именно было известно до работ автора, какие есть нерешенные проблемы и в чем заключается цель исследований. Очень четко описаны постановки задач, обоснована необходимость применения усложненных моделей (кинетического подхода для расчета взаимодействия атомов водорода с плазмой астросферы в главе 2, или трехмерных уравнений МГД в главе 3) и описана методика решения (приложение Г). Наряду с простым изложением результатов (от которого никуда не деться) проводится их осмысление. Как говорил Г.Г. Черный в упомянутой лекции, «Ни одно физическое явление не может считаться до конца понятым, пока оно не сформулировано в терминах механики». Автор диссертации умеет рассуждать, любит рассуждать, и его рассуждения представляются оппоненту вполне убедительными, поскольку они подкреплены проведенными расчетами.

Достоверность положений, выносимых на защиту, определяется тщательным подходом автора к тестированию применяемых методик:

Задачи, поставленные перед автором трудны с вычислительной точки зрения, что осложняется необходимостью проведения параметрических вычислений. В основе вычислительных алгоритмов в части расчетов газовой динамики и идеальной МГД (главы 2,3) лежат проверенные схемы типа С.К. Годунова (второго и первого порядка аппроксимации на гладких решениях). Расчет взаимодействия нейтральных атомов межзвездной среды с плазмой астросферы в рамках кинетического подхода проводится методом прямого численного моделирования Монте-Карло (глава 2, приложение Г). Автор проводит тестирование сравнением с имеющимися численными результатами для предельных случаев и некоторых переходных режимов. Основные расчеты главы 2 (задача о взаимодействии звездного ветра с плазмой межзвездной среды с учетом влияния нейтральных атомов водорода) проводятся с выделением основных разрывов на адаптированных к форме разрывов сетках, что позволяет использовать сравнительно редкие сетки (15 тысяч ячеек). Тестирование, проведенное на декартовых сетках в 4 миллиона ячеек, показало блестящее (с точки зрения оппонента) совпадение результатов (приложение Д). Такой подход позволил провести параметрические расчеты в широком диапазоне изменения чисел Кнудсена, что ранее никто не делал. В главе 3 задача идеальной МГД решается в трехмерной нестационарной постановке также в широком диапазоне изменения определяющих параметров на подробных сетках.

Отдельно следует отметить высокую квалификацию автора в части использования современных технических средств. Программы адаптированы для расчёта течений на графических процессорах (GPU) с использованием технологии параллельного программирования CUDA, а также на многопроцессорных системах (OpenMP, MPI).

Оформление диссертации, с точки зрения оппонента, является образцовым:

Оформление соответствует Положению о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова. Следует обратить внимание, что автор совершенно правильно выполнил набор и верстку диссертации и автореферата диссертации в системе LaTeX, что позволило в полной мере использовать механизм гиперссылок. Поэтому перемещение по документам очень комфортно, ссылки на разделы в оглавлении, а также ссылки на публикации и рисунки являются активными, а за их целостность можно не опасаться. Кроме того, вся диссертация автоматически получается оформленной в едином стиле. Оппоненту понравилась компоновка диссертации, когда громоздкие второстепенные с точки зрения автора разделы перенесены в приложение. Например, в приложение вынесено описание особенностей реализации численного метода Монте-Карло для моделирования астросфер. Автор не выносит этот раздел на защиту, а потому принял решение не загромождать основной текст. Отдельно следует чувство стиля, умение понятно излагать мысли и хороший русский язык автора диссертации, что существенно облегчает чтение и понимание работы.

Замечаний по существу диссертации рецензент не имеет:

Поскольку вся предшествующая часть отзыва была посвящена описанию достоинств диссертации, то, для соблюдения баланса, просто необходимо указать на недостаток. Недостатки очень часто являются продолжением достоинств. Оппоненту понравилась компоновка диссертации, что справедливо отмечено выше. Однако, по мнению оппонента, приложения А, Б, В, которые занимают 1–2 страницы, было бы уместно включить в основной текст. Например, рассуждения главы 2 про популяции атомов водорода с иллюстрацией на одномерных картинках тяжеловаты для восприятия, но одного взгляда на двумерные распределения параметров плазмы для различных режимов достаточно для мгновенного «просветления», так что все выводы автора стали сразу понятны.

Выводы и заключение по диссертации:

Содержание диссертации соответствует специальности 1.1.9. «Механика жидкости, газа и плазмы» по физико-математическим наукам, а именно следующим направлениям: космическая газовая динамика, динамика разреженных газов и молекулярная газодинамика, численные методы

исследования уравнений континуальных и кинетических моделей однородных и многофазных сред.

Диссертация отвечает требованиям, установленным Положением о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, удовлетворяет критериям, определенным Положением (пункты 2.1 – 2.5). А именно, в диссертации содержится решение задачи, имеющей значение для развития современной газовой динамики и астрофизики. Результаты диссертации опубликованы в рецензируемых научных изданиях и апробированы на научных конференциях. Диссертация оформлена в соответствии с Положением (пункт 3.1). Автореферат соответствует тексту диссертации.

Тема диссертации является актуальной. Положения, выводы и рекомендации, выносимые на защиту, вполне обоснованы, их достоверность не вызывает сомнений. Полученные результаты являются новыми.

Автор диссертации, Корольков Сергей Дмитриевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. «Механика жидкости, газа и плазмы».

Официальный оппонент:

Ведущий научный сотрудник
НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова,
кандидат физико-математических наук
e-mail: georgi@imec.msu.ru
тел.: +7 (495) 939-5977



26/5-225

Георгиевский
Павел Юрьевич

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация: 01.02.05 - механика жидкости, газа и плазмы

Сведения о месте работы официального оппонента:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный имени М.В. Ломоносова», Научно-исследовательский институт механики

119192, Москва, Мичуринский проспект, д. 1

<http://www.imec.msu.ru/>,

e-mail: common@imec.msu.ru

тел.: +7 (495) 939-3121

