

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

Диссертационная работа Королькова Сергея Дмитриевича посвящена исследованию структуры области взаимодействия сверхзвукового звёздного ветра с потоком межзвёздной среды. Исследование выполнено в двух различных постановках: в первой предполагается, что межзвёздная среда является частично ионизованной. В этом случае учитывается резонансная перезарядка между плазмой, состоящей из протонов и электронов, и нейтральным газом (водородом). Во второй постановке исследуется влияние собственного магнитного поля звезды на структуру астросферы.

Актуальность темы исследования обусловлена астрофизическими приложениями. Результаты, полученные в диссертационной работе, могут найти своё применение как для описания характеристик гелиосферы – области, заполненной солнечным ветром, так и характеристик других астросфер. Найденные распределения атомов водорода в астросферах могут использоваться для анализа спектров поглощения в линии Лайман-альфа в направлении различных звёзд, полученных на космическом телескопе Хаббла. Распределения плазмы в астросферах можно использовать, например, для интерпретации изображений астросфер в линии Бальмер-альфа, которые были получены на космическом телескопе Спитцера. Кроме того, актуальность исследуемой тематики подтверждается планами будущих космических миссий (Interstellar Probe, NASA, США; Interstellar Express, CNSA, Китай и Нуклон Роскосмос, Россия).

Степень достоверности полученных результатов представляется достаточно высокой и определяется следующими факторами: применением различных численных методов, использованием расчётных сеток с различной пространственной конфигурацией и степенью разрешения, проведением верификации результатов (частично описанной в приложении Д диссертации), согласованием результатов с известными гелиосферными расчётами и предельными МГД-решениями для астросфер в случае неподвижной межзвёздной среды. Важным свидетельством достоверности полученных в диссертации результатов является их апробация на большом количестве национальных и международных конференций и семинаров. Кроме того, результаты диссертации изложены в 5 печатных работах в высокорейтинговых научных изданиях. Также автор имеет ещё 5 научных работ в высокорейтинговых изданиях по теме диссертации.

Научная новизна результатов обусловлена проведением исследования взаимодействия звёздного ветра с межзвёздной средой в экстремально широком диапазоне чисел Кнудсена ($0.0001 \leq Kn \leq 100$) с использованием кинетико-газодинамического подхода. Обнаружены и количественно описаны новые физические явления: эффект аномального нагрева внешнего ударного слоя протяжённых астросфер атомами межзвёздной среды, изменение структуры течения и формы астропазы при критических параметрах потока в астросферах звёзд с сильным собственным магнитным полем, формирование зоны возвратного течения в астросферах с трубчатой формой тангенциального разрыва.

Степень обоснованности всех положений и выводов соответствует высшим стандартам научных исследований. Обнаруженные эффекты имеют четкое физическое объяснение. Все выводы подтверждены сериями вычислительных экспериментов. Реализация алгоритмов прошла верификационное тестирование.

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, списка литературы и пяти приложений. Полный объём диссертации составляет 143 страницы, включая 32 рисунка и 1 таблицу. Список литературы содержит 101 наименование.

Введение содержит обоснование актуальности исследования, формулировку целей работы, описание научной новизны и практической значимости полученных результатов, а также перечень основных положений, выносимых на защиту.

В **первой главе** представлен подробный обзор литературы по исследуемой тематике, приведены некоторые классические решения.

Вторая глава посвящена параметрическому исследованию структуры астросферы в зависимости от числа Кнудсена, охватывающему экстремально широкий диапазон значений ($0.0001 - 100$), что соответствует астросферам различных звёзд с размерами, отличающимися на 12 порядков. Результаты главы получены с помощью разработанной кинетико-газодинамической модели, включающей уравнения Эйлера для плазмы (протонов и электронов) и кинетическое уравнение (с интегралом столкновений в форме Больцмана) на функцию распределения атомов водорода по скоростям. Дополнительно изучены предельные режимы течения (плазмо-газодинамический предел и равновесный). Численно обнаружены и количественно описаны (1) формирование области горячей разреженной плазмы во внешнем ударном слое при числах Кнудсена $\lesssim 0.15$ за счёт переноса энергии вторичными атомами водорода из внутреннего ударного слоя астросферы во внешний и (2) ослабление внешней ударной волны в определённом диапазоне чисел Кнудсена. Получена также зависимость положений основных поверхностей разрыва (ударных волн и тангенциального разрыва - астропauзы) от числа Кнудсена.

В **третьей главе** исследуется влияние азимутального магнитного поля звезды на характер взаимодействия звёздного и межзвёздного течения. В работе численно проведено двухпараметрическое исследование (по

газодинамическому числу Маха набегающего потока M_∞ и альфвеновскому числу Маха звёздного ветра M_A) с использованием системы уравнений идеальной магнитогидродинамики. Установлены критические параметры, при которых происходит смена режима течения: течение с трубчатой формой тангенциального разрыва при малых значениях числа Маха набегающего потока сменяется течением с классической параболоидальной формой тангенциального разрыва при превышении критического значения числа Маха набегающего потока. Для гелиосферных параметров ($M_A \approx 12$) критическое значение составляет $M_\infty \approx 0.32$, что обосновывает классическую форму гелиопаузы, так как реальное значение ($M_\infty \approx 2$) существенно выше критического. Численно обнаружены и детально описаны (1) образование зоны возвратного течения в хвостовой области астросфер с трубчатой формой тангенциального разрыва и (2) формирование дополнительной точки торможения. Разработан оригинальный вычислительный алгоритм на основе метода Годунова на локально-адаптивных сетках с реализацией на GPU для решения 3D нестационарных уравнений МГД, позволивший получить трёхмерные решения в широком диапазоне параметров. Результаты имеют большое значение для понимания структуры гелиосферы и разрешения современной научной дискуссии о форме гелиопаузы.

В заключении сформулированы основные выводы работы.

Приложение А является дополнением к первой главе диссертации. Оно одержит доказательство теоретического положения о равенстве единице числа Маха в ядре сферического источника.

Приложения Б и В являются дополнением ко второй главе диссертации. Они включают распределения параметров атомов водорода при малых числах Кнудсена и двумерные распределения параметров плазмы во всей области течения, соответственно.

В **приложении Г** представлена численная реализация метода Монте-Карло для вычисления динамики атомов водорода, адаптированная для

астросфер, которая включает методы геометрического расщепления атомов водорода, для достижения наилучшей статистики метода на близких к звезде расстояниях.

Приложении Д содержит результаты верификации программного комплекса.

По диссертации можно сделать следующие **замечания**.

1. Суть диссертационной работы – это (А) проведение численного решения и (Б) анализ полученных результатов. Замечание касается первого. В работе достаточно подробно описываются физическая и математическая модель, приводится система определяющих уравнений, безразмерный вид, но отсутствует, фактически, математическая постановка задачи, данные о расчетной области, начальные и граничные условия. Не лишне было бы привести схему расчетной области с указанием границ и соответствующих условий. В работе описаны условия на внешних границах, хотя в тексте речь идет о «формулировке внутреннего граничного условия на скорость ветра» (стр. 43), которое явно не приводится.

2. Аналогичное замечание касательно численных методов. Описание их очень скудно и вызывает много вопросов. На стр. 32 - «Методом Ньютона решив систему уравнений 1.5, получим два решения». Как методом Ньютона решается система ОДУ 1.5? Численный метод главы 2 использует блочно-структурированные сетки с «выделением основных поверхностей разрыва» (стр. 46). Речь идет о подвижных сетках, меняющихся от итерации к итерации? Как происходит перестройка сетки? Расчет кинетико-газодинамической модели ведется глобальными итерациями, в которых попеременно решаются г/д уравнения солнечного ветра и кинетические уравнения межзвездного водорода. В работе нет данных о деталях итерационного процесса. Идет ли он на каждом временном шаге со сходимостью к стационарному решению, или итерации идут по стационарным решениям? Не лишне было бы привести данные о сходимости предложенной методики. Метод в главе 3 основан на декартовых AMR

сетях, но ничего не говорится о критерии адаптации сетки, является ли адаптация стационарная или динамическая, об особенностях GPU-реализации.

3. Постановка т.н. «мягких» граничных условий на выходных границах математически некорректна и может приводить к численным артефактам. Обычно расчетная область берётся достаточно большой, десятки характерных размеров источника возмущений, чтобы устранить эффект границы за счет численной диссипации. В рассматриваемой работе эта область гораздо меньше и может влиять на численное решение.

4. Взаимодействие солнечного ветра и межзвездной среды приводит к образованию контактной поверхности, которая вниз по потоку должна претерпевать неустойчивость Кельвина-Гельмгольца. В расчетах этот эффект не наблюдается, возможно из-за того, что автор использует диссипативную схему 1-ого порядка.

5. Имеется ряд опечаток и грамматических ошибок (незначительное число), обозначений без пояснений. Графики результатов к главе 3 очень мелкие.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. **Материал автореферата соответствует тексту диссертации. Содержание диссертации соответствует специальности 1.1.9. «Механика жидкости, газа и плазмы» по физико-математическим наукам, а именно следующим её 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 Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, а также

оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

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

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник
место работы: Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук, отдел прикладных задач механики сплошных сред, главный научный сотрудник

Меньшов Игорь Станиславович

Дата подписания: 22 мая 2025 г.

Контактные данные: Меньшов Игорь Станиславович

тел.: 7 (499) 220-79-00, e-mail: menshov@kiam.ru

Специальность, по которой защищена диссертация: 05.13.18 -

Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Адрес места работы:

125047, Москва, Миусская пл., д.4, ИПМ им. М.В. Келдыша РАН

тел.: +7 499 978-13-14

факс: +7 499 972-07-37

e-mail: office@keldysh.ru

Подпись сотрудника ИПМ им. М.В. Келдыша РАН
И.С. Меньшова удостоверяю:
ученый секретарь ИПМ им. М.В. Келдыша РАН
к.ф.-м.н.

22.05.2025



А.А. Давыдов