ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
Физический институт имени П.Н.Лебедева
Российской академии наук
Ф И А Н
119991, Москва, ГСП-1
Ленинский проспект, 53, ФИАН
Телефоны: +7 (499) 135 14 29
+7 (499) 132 65 54
Телефакс: +7 (499) 135 78 80
E-mail: office@lebedev.ru
www.lebedev.ru

Дата №

На № от

«УТВЕРЖДАЮ»

И.о. директора ФГБУН ФИАН им. П.Н. Лебедева, д.ф.-м.н., академик РАН

Н.Н. Колачевский

«23» октября 2026 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Окатьева Романа Сергеевича «Генерация, перенос и диффузия неоднородностей в магнитогидродинамических течениях», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы»

Диссертационная работа Р.С. Окатьева посвящена магнитной гидродинамике (МГД) – теории взаимодействия проводящей жидкости с магнитным полем. Эта теория имеет огромное количество приложений, от теоретической астрофизики до технической физики (токамаки и т.д.). Большая часть астрофизических исследований в этом направлении опирается на приближение однородности и изотропии такой среды. Это позволяет глубоко продвинутся в теоретическом описании сложного, нелинейного процесса обмена энергией жидкости и поля. Однако, настоящая работа посвящена как раз исследованию влияния пространственных и временных (например, стохастической модуляции) неоднородностей проводящей среды на динамику МГД-течений. Это чрезвычайно важное, для всех областей

применения теории МГД, направление. Работа выполнена на высоком научном уровне, и содержит как глубокий аналитический анализ, так и современные численные методы. Кроме этого, уже сам выбор темы диссертации не дает возможности сомневаться в ее практической ценности. Таким образом, представленное исследование является законченной научной работой, содержащей новые результата, имеющие значение как для развития теории МГД как таковой, так и для технологических и астрофизических приложений.

Актуальность темы исследования как уже отмечалось, не вызывает сомнений. Подавляющее большинство реальных сред в природных и технологических системах являются неоднородными, однако классические модели МГД, как правило, рассматривают однородные среды в силу их математической простоты. Автор справедливо отмечает, что неоднородность свойств (электропроводности, вязкости, температуропроводности) может приводить к качественным изменениям в поведении течений, включая снижение порогов устойчивости, возникновение новых типов неустойчивостей, появление сложной спектральной динамики. Особую актуальность работе придает рассмотрение широкого круга задач: от технологических приложений (металлургия, системы охлаждения) до астрофизических (солнечное, галактическое динамо и т.д.).

Научная новизна работы также бесспорна. В диссертации впервые:

1. Получены профили скорости течения Гартмана в плоском канале с линейным поперечным распределением электропроводности и проведен их линейный анализ устойчивости. Обнаружен принципиально новый для данной задачи тип неустойчивости – неустойчивость точки перегиба, которая при значительных градиентах электропроводности снижает порог устойчивости на порядок по сравнению с классическим течением Гартмана.
2. Систематически исследовано влияние диффузии на точность определения скорости методом лагранжевых меток. Показано, что диффузионные эффекты приводят к систематическому завышению скорости, а в турбулентных потоках с учетом турбулентной диффузии погрешность может достигать нескольких процентов.
3. Предложен оригинальный и довольно остроумный критерий хаотичности динамической системы на основе коэффициента заполнения гистограммы времен возврата. Этот критерий автор успешно применил к т.н. маломодовой модели Паркера, это позволило исследовать области динамического хаоса и выявить т.н. окна периодичности.
4. Впервые продемонстрирована возможность воспроизведения наблюдаемого спектра солнечной активности (включая непрерывную компоненту) в рамках простой

модели Паркера с механизмом подавления спиральности, а также в маломодовой модели с динамическим хаосом.

Методология и методы исследования являются вполне современными и адекватными поставленным задачам. Диссертант использует как аналитические (асимптотические оценки), так и численные подходы: спектральный метод с разложением по полиномам Чебышева для линейного анализа устойчивости, прямое численное моделирование (DNS) с консервативной конечно-разностной схемой для нелинейной задачи, численное интегрирование систем обыкновенных дифференциальных уравнений для моделей динамо. Использование открытых программных кодов (Dedalus, SciPy) и верификация на классических задачах обеспечивают достоверность результатов.

Достоверность полученных результатов обеспечивается корректной постановкой задач, использованием известных численных методов, тщательной проверкой сходимости решений и согласованием полученных результатов с известными предельными случаями и данными других авторов. Результаты линейного анализа подтверждены прямым численным моделированием, что существенно повышает их надежность.

Научная и практическая значимость, работы, как отмечалось, велика. Результаты по устойчивости течения Гартмана в неоднородной среде закладывают основу для понимания ламинарно-турбулентных переходов в МГД-системах с температурными или концентрационными градиентами и могут быть использованы, например, при проектировании систем охлаждения ядерных реакторов с жидкометаллическим теплоносителем. Результаты по диффузионным погрешностям имеют прямое значение для разработки расходомеров и методик измерения скорости в жидких металлах. Астрофизические результаты, демонстрирующие способность простых моделей динамо воспроизводить, например, сложный спектр солнечной активности, вносят вклад в понимание механизмов, формирующих звездные и галактические магнитные поля.

Апробация работы является достаточной. Результаты доложены на 20 всероссийских и международных конференциях, включая авторитетные форумы по гидродинамике и астрофизике. Основное содержание опубликовано в 6 статьях в рецензируемых журналах из перечня ВАК и международных баз (Web of Science, Scopus), что вполне соответствует требованиям. Личный вклад автора в опубликованные работы является определяющим.

Структура и содержание работы вполне логичны и последовательны. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Объем – 138 страниц, включая 52 рисунка и 5 таблиц; список литературы содержит 180 наименований.

Во **введении** обоснована актуальность, сформулированы цель и задачи, представлены научная новизна, положения, выносимые на защиту, и личный вклад автора.

Первая глава представляет собой вполне содержательный обзор литературы, охватывающий как классические результаты по устойчивости МГД-течений, так и современные представления о неоднородностях в технологических и астрофизических системах.

Во **Второй главе** автор выводит систему уравнений для течения Гартмана с переменной электропроводностью, находит стационарные профили скорости, анализирует их устойчивость, что представляет безусловный интерес для магнитной гидродинамики. Обнаружение двух типов неустойчивости (НГП и НТП) и демонстрация их конкуренции представляют собой важный научный результат. Прямое численное моделирование иллюстрирует возможный сценарий развития НТП вплоть до перехода к турбулентности.

Третья глава посвящена прикладной задаче о точности вихрепролетного метода измерения скорости. На примере одномерного уравнения диффузии автор показывает, что диффузия может приводить к систематической ошибке, и дает количественные оценки для реальных условий (с учетом турбулентной диффузии). Результаты, несомненно, имеют практическую ценность.

Четвертая глава посвящена астрофизическим приложениям теории. Автор проводит тщательный анализ трех модификаций т.н. модели Паркера: классической, с алгебраическим механизмом подавления спиральности (РА); модели РВ, допускающей смену знака спиральности, и маломодовой модели PL4, которая представляет собой размерную редукцию модели РВ. Особого внимания заслуживает предложенный автором критерий хаотичности на основе гистограммы времен возврата. Показано, что модели РВ и PL4 могут генерировать спектры, качественно очень похожие на наблюдаемый спектр солнечной активности, причем, например, в PL4 спектр генерируется как за счет динамического хаоса, так и за счет стохастических возмущений параметра. Этот результат является важным вкладом в теорию солнечного динамо.

В заключении автор подводит итоги, суммируя основные результаты и формулируя перспективы дальнейших исследований.

В качестве **замечаний** можно отметить следующие:

1. В главе 2 рассматривается модель с «замороженным» профилем электропроводности, что является сильным упрощением. Хотя автор обосновывает это пределом малых чисел Прандтля, для полной ясности можно было бы провести оценку

времени диффузии по сравнению с временем роста возмущений для рассматриваемых параметров.

2. В главе 3 анализ проводится для одномерных возмущений. Хотя это дает качественное понимание эффекта, в реальных трехмерных турбулентных течениях форма меток может существенно искажаться не только диффузией, но и деформацией сдвигом течения. Следовало бы обсудить, насколько одномерная модель адекватна для реальных конфигураций.

3. В главе 4 при обсуждении стохастической модуляции динамо-числа в модели РА автор выбирает распределение времени релаксации $\tau \sim \mathcal{U}[0, 2T]$. Хотя этот выбор и представляется вполне разумным, не обсуждается, как выбор другого распределения или корреляционных свойств шума мог бы повлиять на результаты.

4. В тексте встречаются опечатки и стилистические погрешности (например, в формулах на страницах 56–57, в подписях к рисункам 4.17 и др.), однако они не влияют на содержание.

Указанные замечания носят характер пожеланий к дальнейшей работе и не снижают общей высокой оценки диссертации.

Заключение

Диссертационная работа Окатьева Романа Сергеевича является целостным, оригинальным и качественным научным исследованием, выполненным, к тому же, на актуальную тему. Она содержит совокупность новых теоретических и численных результатов, имеющих фундаментальное и прикладное значение для механики жидкости, газа и плазмы, а также для астрофизики. Работа соответствует всем требованиям п. 9–14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Отзыв составлен доктором физико-математических наук, старшим научным сотрудником Лаборатории проблем физики космоса Отделения теоретической физики им И.Е. Тамма ФИАН РАН Ильиным Антоном Сергеевичем.

Настоящий отзыв рассмотрен и одобрен на заседании ученого совета Отдела теоретической физики ФИАН, протокол от 20 октября 2026 г.

Руководитель Отдела теоретической физики им. И.Е. Тамма ФИАН РАН, д.ф.-м.н., академик РАН

Зыбин Кирилл Петрович

Старший научный сотрудник Лаборатории проблем физики космоса Отделения теоретической физики им. И.Е. Тамма ФИАН РАН, д.ф.-м.н

Ильин Антон Сергеевич

Подписи заверяю:

Ученый секретарь ФГБУН ФИАН
кандидат физ.-мат.

Колобов А.В.