

ОТЗЫВ

официального оппонента **Старченко Сергея Владимировича**
на диссертационную работу

Проскурина Александра Викторовича

«УСТОЙЧИВОСТЬ МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ В КАНАЛАХ»,

представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Актуальность работы обусловлена возможным применением полученных результатов в области энергетики, металлургии, астрофизики, гидродинамики ядер планет и лун – там, где важны вопросы устойчивости жидких металлов или плазмы. Магнитное поле сильно влияет на устойчивость движений жидкости. Для течений в каналах характерна деформация профиля скорости за счет влияния магнитного поля и образование больших градиентов скорости, которые трудны для расчетов, и которые вызывают появление специфических мод неустойчивости. С другой стороны, магнитное поле взаимодействует непосредственно с возмущениями, усиливая или подавляя их. Эти явления мало исследованы в случае сильного влияния электромагнитных сил, характерного для бланкетов термоядерных реакторов или астрофизических приложений, и в случае течений сложной формы.

Задачи линейной устойчивости также трудно решать численно из-за присутствия малого параметра – обратного числа Рейнольдса. Этот параметр особенно важен для течений в каналах, так как числа Рейнольдса, при которых теряется устойчивость, достаточно велики. Если в модельных задачах, приводящих к обыкновенным дифференциальным уравнениям, методология решения достаточно хорошо разработана и включает метод ортогонализации Годунова, метод дифференциальной прогонки и так далее, то для задач сложной пространственной геометрии, приводящих к линейным уравнениям магнитной гидродинамики в частных производных, такого опыта мало. Использование метода конечных элементов и метода конечных разностей для таких задач часто неэффективно, а классические спектральные методы ограничены простыми формами вроде прямоугольника или круга. Поэтому актуально применение к задачам МГД устойчивости многодоменных спектральных методов и разработка новых не насыщаемых численных методов для задач произвольной геометрии.

Научная новизна. В работе впервые было произведено исследование устойчивости ряда параллельных течений в продольном магнитном поле при всевозможных значениях магнитного числа Прандтля. Это позволило обнаружить явления, касающиеся взаимодействия магнитного поля и возмущений, ранее неизвестные: сильную стабилизацию в некотором диапазоне магнитных чисел Прандтля, появление новой магнитогидродинамической моды. Новым интересным результатом работы являются построенные А.В. Проскуриным зависимости критических чисел Рейнольдса для диапазонов изменения магнитного числа Прандтля и числа Альфвена, которые имеют неожиданно сложный вид. Для приближения малых магнитных чисел

Рейнольдса в случае коаксиальных цилиндров оказалось, что внесение азимутального поля при наличии продольного может дестабилизировать течение.

Интересны новые результаты, касающиеся применения функций Рвачева к задачам устойчивости. Разработан простой алгоритм, который позволяет применить однодомный спектральный метод для исследования устойчивости двумерных течений нетривиальной формы, этот алгоритм и компьютерная программа проверены на примере задачи устойчивости течения возле цилиндра в присутствии магнитного поля.

Важным результатом работы является компьютерная программа для расчета течений электропроводящей жидкости в магнитном поле и их устойчивости и ее верификация. В части исследования устойчивости эта программа не имеет аналогов.

Получены новые данные об устойчивости течения в изогнутом канале: найдены критические числа Рейнольдса, классифицированы основные типы возмущений. Найдены новые неожиданные режимы течения в магнитном поле и показана их линейная и нелинейная устойчивость.

Обоснованность и достоверность результатов и выводов. Для расчетов устойчивости параллельных течений использовались численные методы дифференциальной прогонки и коллокаций. Оба эти метода считаются надежными и хорошо проверенными для задач устойчивости. Несколько версий компьютерной программы были сделаны А.В.Проскуриным независимо, с использованием разных языков программирования и разных библиотек. Одни и те же результаты были проверены разными методами. Данные о стабилизации течения при конечных магнитных числах Прандтля и существовании новой моды были подтверждены независимо китайскими исследователями.

Для расчетов устойчивости течений в сложной геометрии используется спектрально-элементный метод. Этот метод является более надежным по сравнению с методами конечных разностей и конечных элементов. Программа верифицирована с использованием аналитических результатов и данных других исследователей. Для каждой решенной задачи исследовалась сходимость с использованием разных сеток и другими вариациями параметров численного метода, влияющими на его работу.

Таким образом, результаты диссертации достоверны, а выводы – обоснованны.

Общая характеристика и оценка диссертации. Квалификационная работа имеет объем 313 страниц и состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы. Диссертация написана понятно и подробно. Автореферат диссертации отражает ее содержание. Основные результаты диссертации опубликованы в журналах из списков ВАК, Web of Science, Scopus. Диссертация соответствует паспорту научной специальности 1.1.9 – «Механика жидкости газа и плазмы».

Введение содержит описание актуальности и степени разработанности проблемы, цели и задачи исследования, краткое описание новизны,

теоретической и практической значимости полученных соискателем результатов. Перечислены положения, выносимые на защиту, автор рассказывает о соображениях, подтверждающих достоверность результатов, раскрыта апробация результатов в виде выступлений на конференциях и семинарах, сформулирован личный вклад А.В. Проскурина в проделанную работу.

В первой главе на основе обзора литературы показано современное состояние проблемы устойчивости магнитогидродинамических течений в каналах, некоторых смежных вопросов и соответствующих численных методов. Показана актуальность решаемой в диссертации научной проблемы.

Во второй главе рассмотрена устойчивость параллельных течений в плоском канале и в канале кольцевого сечения. Изложены модификации методов дифференциальной прогонки и коллокаций для задач МГД устойчивости и детали соответствующих программ. Большое внимание уделено проверке расчетов. Приведены результаты большого объема расчетов устойчивости плоскопараллельного течения в продольном магнитном поле, течения в зазоре кольцевого сечения в продольном и спиральном магнитном поле. Интересны описанная в диссертации новая магнитогидродинамическая мода, сильная стабилизация при конечных магнитных числах Прандтля, скачки критических чисел Рейнольдса при изменении параметров.

В третьей главе рассмотрен метод функций Рвачева. Интересны результаты моделирования течений в трубах, которые иллюстрируют возможности метода в случае деформации расчетной области, и, в том числе, быструю сходимость. При этом возможно удовлетворить граничным условиям Дирихле и Неймана, что показано на примерах расчета течения электропроводящей жидкости. При помощи разработанного метода рассмотрена устойчивость локализованного возмущения в плоском канале и устойчивость течения возле круглого цилиндра в однородном магнитном поле.

В четвертой главе обсуждается спектрально-элементный метод. Описываются особенности разработанной программы для исследования устойчивости течений. Верификация программы и расчетной схемы проводилась при помощи ряда аналитических решений для течения в плоском канале и прямоугольной трубе. Тестирование работы программы в случае задач устойчивости производилось путем сравнения с данными, приведенными в литературе и полученными независимыми методами. Проверка программы в случае зависящих от времени течений производилась на примере расчетов эволюции нелинейных возмущений в течении Гартмана. В каждом случае тщательно исследовалась сходимость, в том числе с использованием разных сеток.

Пятая глава содержит результаты исследования течения в изогнутом канале. Были изучены режимы течения без магнитного поля. Исследована устойчивость к двумерным и трехмерным возмущениям. Интересно, что удалось вычислить критическое число Рейнольдса для двумерных возмущений путем экстраполяции при помощи очень затратных расчетов с использованием методов стабилизации для неустойчивого течения. Установлено, что в некотором диапазоне чисел Рейнольдса существует как стационарное, так и периодическое течение в виде

дорожки вихрей, которое может реализовываться в зависимости от действия возмущений. Произведена классификация основных типов возмущений, которые возникают в изогнутом канале. При включении магнитного поля, направленного параллельно входному или выходному рукаву канала, наблюдались ранее неизвестные режимы со значительным по амплитуде противотечением. Это противотечение оказалось устойчивым как к бесконечно-малым возмущениям, так и к возмущениям конечной амплитуды.

Заключение содержит основные выводы, сделанные на основе полученных в диссертации результатов.

Замечания по оформлению и содержанию диссертации.

1. Наиболее существенным, на мой взгляд, но не критическим, недостатком работы является практически отсутствие использования асимптотических методов для исследования устойчивости и предварительных оценок.
2. Весьма широк охват разнообразных МГД тематик от классических плоских течений, реалистичных течений между коаксиальными цилиндрами и практическими течениями в изогнутых каналах. Это приводит с одной стороны к недостаточной доработке отдельных положений, но вместе с тем широкими мазками отражает всевозможные дальнейшие исследования в актуальных для тематики диссертации областях.
3. Недостаточно полно исследованы причины возникновения двумерного пульсирующего течения в изогнутом канале. Представляется, что этот недостаток будет восполнен дальнейшими исследованиями диссертанта по этой актуальной тематике.
4. В свете двух предыдущих замечаний хотелось бы услышать ответ от диссертанта, в какой области ему преимущественно хотелось бы сосредоточить свои дальнейшие исследования. Разумеется, возможен вариант воспитания учеников практически во всех затронутых областях и создание научной школы, на что есть некоторые основания. Однако мне представляется перспективным исследование практических течений в изогнутых каналах, где у диссертанта потенциально прослеживаются практически пионерские результаты.
5. В диссертации есть ряд ошибок и опечаток, например, на странице 28 в конце формулы (1.2) пропущены индексы в последнем выражении. На странице 32 третья строка снизу в слове «неконформной» пропущена последняя «м». На странице 113 в первом предложении не согласованы падежи, наверное, нужно было написать «технические приемы вычислений».

Отмеченные замечания не снижают достоинств работы А.В. Проскурина, которая соответствует всем необходимым требованиям для присуждения искомой докторской степени.

Заключение.

Диссертантом, Проскуриным Александром Викторовичем, решена крупная научная проблема об устойчивости МГД течений в каналах.

Им впервые исследована устойчивость параллельных течений в продольном магнитном поле и обнаружена сильная стабилизация, новая магнитогидродинамическая мода и неожиданно сложные зависимости критических чисел Рейнольдса от чисел Прандтля и Альфвена.

Для коаксиальных цилиндров оказалось, что внесение азимутального поля при наличии продольного может дестабилизировать течение.

Разработан универсальный алгоритм для исследования устойчивости двумерных течений нетривиальной формы, который проверен на примере задачи устойчивости течения возле цилиндра. Создана не имеющая аналогов компьютерная программа расчета и верификации устойчивости МГД течений.

Получены новые данные об устойчивости течения в изогнутом канале: найдены критические числа Рейнольдса, классифицированы основные типы возмущений. Найдены потенциально пионерские режимы течения в магнитном поле и показана их линейная и нелинейная устойчивость.

Считаю, что диссертация представляет собой завершённую научно-исследовательскую работу на актуальную тему. Она выполнена на высоком научно-техническом уровне, соответствует паспорту специальности 1.1.9 (01.02.05) – «Механика жидкости, газа и плазмы», а также п. 9 Положения ВАК о присуждении ученых степеней. Считаю, что автор диссертации Проскурин Александр Викторович заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.9 (01.02.05) – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Официальный оппонент доктор физико-математических наук по специальности 04.00.22 – «Физика твердой Земли», профессор, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией главного магнитного поля Земли ИЗМИРАН

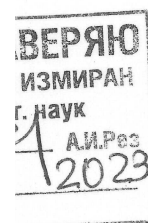
Сергей Владимирович
Старченко

14.09.2023

sstarchenko@mail.ru
+7 (910) 978-8

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт земного магнетизма,
ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова Российской академии наук
108840, Россия, г. Москва, г. Троицк,
Калужское шоссе, д. 4, ИЗМИРАН



Председателю
диссертационного совета
24.1.125.01 (Д 003035.02)
академику В.М. Фомину

ЛИЧНОЕ СОГЛАСИЕ ОППОНЕНТА

Я, Старченко Сергей Владимирович, даю свое согласие выступить в качестве оппонента по диссертации Проскурина Александра Викторовича на тему: «Устойчивость магнитогидродинамических течений в каналах» на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.9 – механика жидкости, газа и плазмы.

О себе сообщаю:

Ученая степень, отрасли науки	доктор физико-математических наук
Научные специальности, по которым защищена диссертация	04.00.22 - физика твердой Земли
Ученое звание	профессор
Академическое звание	
Тел:	
E-mail:	sstarchenko@mail.ru
Должность	главный научный сотрудник, заведующий лабораторией
Подразделение организации	Лаборатория главного магнитного поля Земли
Полное наименование организации, являющейся основным местом работы	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН)
Ведомственная принадлежность орг.	Министерство науки и высшего образования РФ
Адрес служебный: Почтовый индекс, город, улица, дом	108840, Россия, г. Москва, г. Троицк, Калужское шоссе, д. 4, ИЗМИРАН
Web-сайт организации.	https://www.izmiran.ru/
Телефон организации.	+7 (495) 851-01-20
E-mail организации.	izmiran@izmiran.ru

По теме рассматриваемой диссертации имею 96 научных работ, в том числе в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет (всего 19):

№	Авторы	Название статьи, журнал, год, том, №, страницы
1	С.В. Старченко	Простейшее динамо Солнца и новый механизм стабилизации // Геомagnetизм и аэрономия. – 2022. – Т. 62, № 2. – С. 139-143.
2	С. В. Яковлева, С. В. Старченко	Статистически-вероятностные характеристики чисел Вольфа и их временных производных // Геомagnetизм и аэрономия. – 2022. – Т. 62, № 2. – С. 144-154. – DOI 10.31857/S001679402202016X.
3	С.В. Старченко, А.Ю. Смирнов	Объемные токи современного магнитного диполя в ядре Земли // Физика Земли. – 2021. – №. 4. – С. 42-46.
4	S.V. Starchenko	Planetary magnetic fields averaged in their dynamo regions // Magnetohydrodynamics. – 2019. – Т. 55, N. 1/2. – P. 201-206
5	С.В. Старченко, С.В. Яковлева	Определение удельных временных вариаций энергии потенциального геомагнитного поля из IGRF модели // Геомagnetизм и аэрономия. – 2019. – Т. 59. – №. 5. – С. 649-654.

№	Авторы	Название статьи, журнал, год, том, №, страницы
6	S.V. Starchenko	Analytic scaling laws in planetary dynamo models // Geophysical & Astrophysical Fluid Dynamics. – 2019. – Т. 113. – №. 1-2. – С. 71-79.

Не являюсь членом экспертного совета ВАК

Согласен на включение моих персональных данных в аттестационное дело соискателя и их дальнейшую обработку.

30.05.2023

