

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА
на диссертацию **Проскурина Александра Викторовича**
«Устойчивость магнитогидродинамических течений в каналах» по специальности 1.1.9 –
«Механика жидкости, газа и плазмы»

Актуальность темы исследования

Задачи магнитной гидродинамики встречаются в широком спектре приложений от описания свойств течения жидких металлов в промышленности до исследования поведения космических объектов в астрофизике. Такие характеристики потоков жидкости и газа как интенсивность процессов смешения и теплоотвода существенно зависят от режима течения. Таким образом, принципиальным становится возможность предсказания перехода из слоистого ламинарного режима в пульсационный турбулентный. Данная работа посвящена изучению гидродинамической устойчивости нескольких модельных конфигураций потоков электропроводящей жидкости и развитию соответствующих инструментов исследования.

Анализ содержания диссертационной работы

Диссертация посвящена исследованию гидродинамической устойчивости течений электропроводящей среды в рамках уравнений магнитной гидродинамики для нескольких модельных конфигураций. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения.

Во введении автором определен объект исследования, обоснована актуальность и описана степень разработанности проблемы, поставлены цели и научные задачи, сформулирована научная новизна защищаемых результатов, указана их теоретическая и практическая значимость, сформулированы положения, выносимые на защиту, обоснована степень достоверности и апробация результатов, а также подчеркнут личный вклад автора.

В первой главе проводится детальный обзор литературы на основе около 200 источников, который покрывает такие направления исследования как анализ линейной устойчивости плоскопараллельных течений в присутствии магнитного поля и без на базе уравнений типа Орра–Зоммерфельда, применение метода Ляпунова–Шмидта и подхода на основе функций Рвачева, устойчивость потоков в сложной геометрии за рамками плоскопараллельного подхода, прямое моделирование ламинарно-турбулентного перехода и вопросы нелинейной устойчивости.

Во второй главе приводится математическая постановка задачи, вывод уравнений Орра–Зоммерфельда, описание метода коллокаций и его вариаций, метода дифференциальной прогонки. Рассмотрен вопрос об устойчивости плоского течения Пуазейля в продольном магнитном поле. Подробный анализ зависимостей критических чисел Рейнольдса от магнитного числа Прандтля позволил обнаружить новую ветвь неустойчивости при больших числах Рейнольдса. Далее рассмотрена задача об устойчивости течения в кольцевом зазоре в продольном магнитном поле. Обнаружены диапазоны магнитных чисел Прандтля, при которых течение особенно чувствительно к стабилизирующему влиянию магнитного поля. В этих диапазонах при увеличении магнитного поля наблюдается скачкообразное увеличение критических чисел Рейнольдса и существование замкнутых нейтральных кривых. Далее рассмотрена задача об устойчивости течения слабоэлектропроводящей жидкости в кольцевом зазоре в спиральном магнитном поле. Показано, что увеличение числа Гартмана в данной постановке не всегда приводит к стабилизации течения. Уменьшение радиуса внутреннего цилиндра приводит к увеличению критических чисел Рейнольдса за счет стабилизации азимутальных мод с большими номерами.

В третьей главе рассматривается метод Рвачева для работы конфигурациями, которые можно представить в виде конъюнкции и дизъюнкции простых геометрических фигур. На основе

этого метода и разложения в полиномы Чебышева, решены задачи о течении в деформируемой трубе, в прямоугольной трубе с центральным элементом, магнитогидродинамическое течение в трубе сложной геометрии, а также ряд задач устойчивости, включая течение в плоском канале с локализованными возмущениями, магнитогидродинамическое течение вокруг круглого цилиндра. Показана эффективность предложенного численного подхода. Тем не менее, автор отмечает, что большинство существующих работ по методу функций Рвачева носят эмпирический характер, а соответствующая теория слабо разработана.

В четвертой главе рассматриваются примеры использования спектрально-элементного метода в открытом программном комплексе Nektar++ для расчета модельных задач магнитной гидродинамики в приближении малых магнитных чисел Рейнольдса. Описана стандартная численная схема с коррекцией поля скорости и давления для выполнения уравнения неразрывности. Проведена валидация кода на примере течения Гартмана в плоском канале и прямоугольной трубе, а также исследована его устойчивость в линейной и нелинейной двумерной и трехмерной постановке. Исследована устойчивость течения Ханта в прямоугольной трубе.

В пятой главе исследуется магнитогидродинамическое течение в изогнутом канале. Сперва рассмотрена гидродинамика течения в отсутствии магнитного поля в диапазоне различных чисел Рейнольдса. Далее продемонстрирована чувствительность основного потока к амплитуде набегающих возмущений при помощи параметрических прямых расчетов. Решена задача линейной устойчивости в трехмерной постановке в диапазоне чисел Рейнольдса, которая позволила идентифицировать параметры наиболее опасных возмущений. Аналогичное исследование и результаты получены в присутствии магнитного поля различной ориентации.

В заключении автором перечислены разработанные алгоритмы и сформулированы основные научные результаты.

Надо отметить внутреннее единство, грамотность, точность формулировок и продуманность структуры диссертации. Автореферат в полной мере отражает основное содержание и результаты диссертационной работы.

Научная новизна

Получены новые результаты о линейной и нелинейной устойчивости для ряда модельных конфигураций, включая течение в прямом канале, трубе прямоугольного сечения, канале кольцевого сечения, а также канале с изгибом для различных ориентаций магнитного поля. В частности, для плоского течения Пуазейля в продольном магнитном поле подробный анализ зависимостей критических чисел Рейнольдса от магнитного числа Прандтля позволил обнаружить новую ветвь неустойчивости при больших числах Рейнольдса. Для течения в канале кольцевого сечения впервые показано, что добавление азимутального поля при наличии продольного может дестабилизировать течение. Впервые обнаружен и изучен новый эффект возникновения противотечения в изогнутом канале с магнитным полем. Показана устойчивость этого противотечения. Впервые определены критические числа Рейнольдса течения в изогнутом канале для двумерных и трехмерных возмущений.

Достоверность и обоснованность результатов и выводов

Высокая степень достоверности результатов исследования, представленных в диссертации, обоснована использованием известных вычислительных методов, а также подтверждается сопоставлением с литературными данными.

Практическая значимость работы

Опираясь на полученные в работе результаты о зависимости критических чисел Рейнольдса от магнитного числа Прандтля и числа Альфвена, возможно производить оценку параметров перспективных МГД-устройств в случае, если магнитное число Рейнольдса нельзя считать малым. Получен ряд результатов о режимах течения в изогнутом канале, важных для приложений, показана устойчивость этих режимов. Методы, изложенные в работе, решают практическую проблему изучения переходных процессов и оценки параметров устойчивости течений в каналах сложной формы, характерных для технических устройств: элементов термоядерных и ядерных реакторов, частей жидкометаллических батарей и так далее.

Замечания по диссертационной работе

При анализе диссертации возникли следующие вопросы и замечания:

1. В магнитной гидродинамике в дополнение к классическому безразмерному критерию – числу Рейнольдса – используется еще несколько, которые характеризуют магнитное поле. В диссертации не приведено необходимой подробной информации о диапазоне безразмерных параметров, который является интересным с точки зрения конкретных сред и прикладных постановок задач.
2. В работе очень подробно анализируются данные численных экспериментов, аналогичные данные из литературы, однако экспериментальные данные почти не отмечены.
3. В обзоре литературы автором было отмечено, что до последнего времени по теории устойчивости доминировали исследования так называемых оптимальных возмущений. Тем не менее, в диссертации такого исследования не приведено.
4. Аналогичное замечание можно сделать по поводу сопряженных мод и областей в потоке, которые являются наиболее чувствительными к внесению внешних возмущений.
5. Во втором параграфе на странице 172 приводятся размышления о скорости сходимости метода конечных и спектральных элементов. Невязка представлена как степенная функция от размера элемента. Не совсем понятно, касается ли это упомянутого метода спектральных элементов, который, судя по названию, должен иметь экспоненциальную скорость сходимости.
6. В диссертации регулярно используются местоимения «я», «мне», что не очень типично для научной русскоязычной литературы.
7. На странице 179 во втором параграфе описывается метод определения инкремента возрастания/затухания для возмущения из данных прямых расчетов линеаризованных эволюционных уравнений. Кажется, что этот подход технически очень важен, однако описан крайне скупо.
8. Не могу сказать, что понял мысль в первом параграфе на странице 183 о двух точках зрения на развитие турбулентности, хотя и знаком с цитируемой литературой.
9. Рисунки 4.10, 4.21 и т.д не являются достаточно информативными, чтобы выделять их в отдельный рисунок.
10. Граничные условия (4.17) на твердой поверхности для возмущения поля скорости и давления утверждают, что поле скорости должно быть равно нулю, так же как и градиент давления по нормали к поверхности. Справедливо ли это утверждение о градиенте давления?
11. На рисунке 4.14 и в тексте представлена эволюция амплитуды инжекции на твердой стенке. Интуитивно кажется, что лучше не задавать интенсивность инжекции максимальной амплитудой в момент времени $t=0$, в то время как в исходном решении этой инжекции не было.

12. Автор активно использует дискретизацию эволюционных уравнений во времени, однако не приводит анализа чувствительности результатов к шагу по времени и т.д., хотя такой анализ в данной работе обычно присутствует для пространственного разрешения в задачах.
13. Не описан используемый метод выборочного подавления частот, хотя должен являться технически нетривиальным.
14. Ряд описок, неточностей и жаргонизмов. Например, на странице 13 используется термин «вихри Гротлера», на странице 211 говорится, что «такой подход позволяет исследовать более **тонкие** постановки задач» и т.д.

Приведенные вопросы и замечания нисколько не отражаются на высокой оценке диссертационной работы.

По теме диссертации соискателем опубликовано 66 научных публикаций, 6 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 15 – в периодических научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus, получено 5 свидетельств о регистрации программного обеспечения. Результаты докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях.

Диссертационная работа «Устойчивость магнитогидродинамических течений в каналах» удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», включая п.п. 9, 10, в части, касающейся ученой степени доктора наук, а ее автор Проскурин Александр Викторович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Согласен на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, их дальнейшую обработку и передачу в соответствии с требованиями Минобрнауки России.

Официальный оппонент
доктор физико-математических наук
по специальности 01.02.05 – «Механика
жидкости, газа и плазмы»,
заведующий лабораторией
Института теплофизики СО РАН



Мулладжанов Р.И.
20 сентября 2023 г.

Мулладжанов Рустам Илхамович
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук
Почтовый адрес: 630090, г. Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1
Телефон: +7-913-204-
Электронная почта: r

Подпись
Рустам Илхамович
к.ф.н.

Р.И. Мулладжанов
М.С.

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

ЛИЧНОЕ СОГЛАСИЕ ОППОНЕНТА

Я, Мулляджанов Рустам Илхамович, 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	01.02.05- механика жидкости, газа и плазмы
Ученое звание	
Академическое звание	
Тел:	+7 913 204-!
E-mail:	rustammul@gmail.com
Должность	Ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией
Подразделение организации	7.2. Лаборатория суперкомпьютерных вычислений и искусственного интеллекта в энергетических технологиях
Полное наименование организации, являющейся основным местом работы	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук
Ведомственная принадлежность орг.	Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Адрес служебный: Почтовый индекс, город, улица, дом	Россия, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д. 1
Web-сайт организации.	http://www.itp.nsc.ru/
Телефон организации.	+7(383) 330-90-40
E-mail организации.	director@itp.nsc.ru

По теме рассматриваемой диссертации имею 68 научных работ, в том числе в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет (не более 15 работ):

№	Авторы	Название статьи, журнал, год, том, №, страницы
1	Zaripov D, Li R, Lukyanov A, Skrypnik A, Ivashchenko E, Mullyadzhanov R, Markovich D.	Backflow phenomenon in converging and diverging channels. <i>Experiments in Fluids</i> . 2023 Jan;64(1):9.
2	Agafontsev DS, Gelash AA, Mullyadzhanov RI, Zakharov VE.	Bound-state soliton gas as a limit of adiabatically growing integrable turbulence. <i>Chaos, Solitons & Fractals</i> . 2023 Jan 1;166:112951.

№	Авторы	Название статьи, журнал, год, том, №, страницы
3	Palkin EV, Hrebtov MY, Slastnaya DA, Mullyadzhanov RI, Vervisich L, Sharaborin DK, Lobasov AS, Dulin VM.	Influence of a central jet on isothermal and reacting swirling flow in a model combustion chamber. <i>Energies</i> . 2022 Feb 22;15(5):1615.
4	Ivashchenko E, Hrebtov M, Timoshevskiy M, Pervunin K, Mullyadzhanov R.	Systematic validation study of an unsteady cavitating flow over a hydrofoil using conditional averaging: LES and PIV. <i>Journal of Marine Science and Engineering</i> . 2021 Nov;9(11):1193.
5	Zaripov D, Ivashchenko V, Mullyadzhanov R, Li R, Mikheev N, Kähler CJ.	On a mechanism of near-wall reverse flow formation in a turbulent duct flow. <i>Journal of Fluid Mechanics</i> . 2021 Sep;923:A20.
6	Zaripov D, Ivashchenko V, Mullyadzhanov R, Li R, Markovich D, Kähler CJ.	Reverse flow phenomenon in duct corners at a low Reynolds number. <i>Physics of Fluids</i> . 2021 Aug 23;33(8):085130.
7	Mullyadzhanov R, Gelash A.	Solitons in a box-shaped wave field with noise: perturbation theory and statistics. <i>Physical Review Letters</i> . 2021 Jun 11;126(23):234101.
8	Bobrov M, Hrebtov M, Ivashchenko V, Mullyadzhanov R, Seredkin A, Tokarev M, Zaripov D, Dulin V, Markovich D.	Pressure evaluation from Lagrangian particle tracking data using a grid-free least-squares method. <i>Measurement Science and Technology</i> . 2021 May 19;32(8):084014.
9	Tokarev M, Palkin E, Mullyadzhanov R.	Deep reinforcement learning control of cylinder flow using rotary oscillations at low Reynolds number. <i>Energies</i> . 2020 Nov 13;13(22):5920.
10	Hadžiabdić M, Palkin E, Mullyadzhanov R, Hanjalić K.	Heat transfer in flow around a rotary oscillating cylinder at a high subcritical Reynolds number: A computational study. <i>International Journal of Heat and Fluid Flow</i> . 2019 Oct 1;79:108441.

Не являюсь членом экспертного совета ВАК

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

Дата 31.05.2023

Подпись