

ОТЗЫВ

официального оппонента **Андреева Виктора Константиновича** 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 темы диссертации

Диссертационная работа посвящена **актуальной и практически важной** проблеме исследования устойчивости течений электропроводящей жидкости в магнитном поле. Актуальность этих задач связана с развитием новых энергетических технологий – термоядерных реакторов и реакторов на быстрых нейтронах, которые охлаждаются жидкими металлами. Важная роль в исследованиях течений жидких металлов отводится численному моделированию, так как эксперименты в этой области очень сложны. Сильное магнитное поле в термоядерном реакторе стабилизирует течение охлаждающего жидкого металла, поэтому вопросы устойчивости течений играют определяющую роль в проектировании.

Технические устройства с жидкими металлами содержат как прямые каналы, так и каналы, в которых направление течения жидкости меняется. Устойчивость плоскопараллельных течений в продольном магнитном поле при больших числах Рейнольдса и произвольных магнитных числах Прандтля до публикации работ А.В. Проскурина подробно не исследовалась. Линейная устойчивость течений в сложной геометрии слабо изучена даже в случае вязкой

жидкости, в случае же электропроводящей жидкости такие результаты практически отсутствуют. В диссертации по этим актуальным направлениям исследований получены важные результаты, в частности, и по нелинейной устойчивости МГД-течений в изогнутых каналах.

Актуальным и практически значимым направлением работы является разработка и верификация программных комплексов и численных методов для расчетов течений и их устойчивости, пригодных для промышленного применения.

Научные результаты данной диссертационной работы являются важными для получения новых знаний в области механики жидких сред, связанных с гидродинамической устойчивостью магнитных жидкостей.

Научная новизна

В диссертации изложены новые научные результаты, вносящие вклад в теорию гидродинамической устойчивости:

- впервые были проведены систематические исследования устойчивости течений в продольном поле при произвольных магнитных числах Прандтля. Это привело к обнаружению новых явлений: сильной стабилизации параллельного течения в продольном поле в некотором диапазоне изменения магнитного числа Прандтля, скачкообразных изменений критического числа Рейнольдса. Найдена новая мода возмущений, приводящая к неустойчивости течения;
- впервые показано, что внесение спирального магнитного поля при наличии продольного может приводить к дестабилизации течения в канале кольцевого сечения;
- предложен новый численный метод на основе функций Рвачева для исследования устойчивости в сложной геометрии;

- на основе спектрально-элементного подхода разработана и верифицирована программа для ЭВМ для моделирования МГД-течений и их устойчивости, не имеющая аналогов;
 - получены новые результаты о режимах течения в изогнутом канале без магнитного поля и их устойчивости, впервые обнаружено, что магнитное поле сильно меняет это течение и могут возникать устойчивые противотечения.
-

Высокая степень обоснованности и достоверности результатов достигается использованием надежных и хорошо себя зарекомендовавших численных методов, тестированием компьютерных программ с использованием аналитических результатов и результатов других исследователей. Некоторые вычисления дублировались при помощи разных численных методов и программ. Изложенные в диссертации А.В. Проскурина результаты были опробованы на большом количестве конференций и семинаров. Получены шесть свидетельств о регистрации программ для ЭВМ на разработанные вычислительные алгоритмы.

Общая характеристика диссертации

Диссертационная работа (всего 313 страниц, 163 рисунка, 17 таблиц) состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы (300 ссылок). Диссертация написана ясно и достаточно подробно. Диссертация соответствует паспорту научной специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы» по следующим областям исследований:

- Гидродинамическая устойчивость;
- Точные, асимптотические, приближенные аналитические, численные и комбинированные методы исследования уравнений континуальных и кинетических моделей однородных и многофазных сред;
- Гидромеханика сред, взаимодействующих с гравитационными и электромагнитными полями. Динамика плазмы.

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы, формулируются цели и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов работы, положения, выносимые на защиту, обсуждаются достоверность и апробация результатов, описан личный вклад автора.

Первая глава является обзорной. В ней обсуждаются основные положения современной теории устойчивости и ламинарно-турбулентного перехода в течениях вязкой жидкости и вязкой электропроводящей жидкости, наиболее близкие к теме диссертации: линейная устойчивость параллельных течений вязкой жидкости; применение методов этой теории к смежным задачам, в том числе решавшимся в ИТПМ СО РАН; линейная устойчивость плоскопараллельных МГД-течений и применение слабо-нелинейной теории В.И. Юдовича на основе метода Ляпунова-Шмидта; линейная устойчивость течений вязкой жидкости в сложной геометрии (глобальная или би-глобальная устойчивость); оптимальные возмущения; вопросы прямого численного моделирования ламинарно-турбулентного перехода МГД-течений в каналах. Изложено состояние теории функций Рвачева в части ее приложения к задачам гидродинамики. Упомянуты основные программные комплексы для расчетов течений электропроводящей жидкости и их особенности. Всего произведен обзор содержания 191 работы, включая несколько монографий.

Во второй главе описаны численные методы исследования устойчивости параллельных течений: метод дифференциальной прогонки и два варианта метода коллокаций. Изложены особенности программной реализации этих численных методов. В главе приводятся постановки задач линейной устойчивости МГД-течений в плоском канале в продольном магнитном поле и канале кольцевого сечения в продольном и спиральном магнитном поле и результаты исследования устойчивости в виде графиков критических чисел Рейнольдса в зависимости от параметров: числа Гартмана, числа Альфвена, магнитного числа Прандтля, геометрического параметра, описывающего размеры коаксиальных цилиндров. Проведенный автором подробный анализ

устойчивости позволил найти новую моду в продольном магнитном поле, сильную стабилизацию магнитным полем при магнитном числе Прандтля 0.1 и 1, обнаружить дестабилизацию течения спиральным магнитным полем.

Третья глава посвящена приложению метода функций Рвачева к задачам гидродинамики и гидродинамической устойчивости. Рассмотрены стационарные течения вязкой и вязкой электропроводящей жидкости в трубах сложного сечения. Предложен новый метод исследования устойчивости двумерных течений на основе функций Рвачева, с его помощью изучена устойчивость локализованных возмущений вязкой жидкости в плоском канале, устойчивость течения вязкой электропроводящей жидкости возле круглого цилиндра. В главе отмечено, что использование функций Рвачева позволяет отделить геометрическую информацию от численного алгоритма, за счет чего вычисления и компьютерные программы становятся проще. При этом может быть достигнута быстрая сходимость, характерная для спектральных методов.

В четвертой главе рассмотрено применение спектрально-элементного метода к задачам устойчивости МГД-течений в сложной геометрии. Использована свободно распространяемая программная инфраструктура: генератор сеток gmsh, спектрально-элементный фреймворк Nektar++, программа визуализации ParaView. Была написана программа для ЭВМ для моделирования течений электропроводящей жидкости на основе уравнений магнитной гидродинамики с использованием электрического потенциала. Компьютерная программа позволяет производить прямое численное моделирование МГД-течений, исследовать устойчивость стационарных течений в линейном приближении, исследовать динамику возмущений конечной амплитуды, наложенных на стационарное течение. Программа была верифицирована путем сравнения результатов с решениями, полученными аналитически или приведенными в литературе.

В пятой главе приведены результаты исследования течения в изогнутом канале. Классифицированы режимы течения без магнитного поля и в случаях вертикального и горизонтального магнитного поля, исследована их

устойчивость. Показано, что внесение магнитного поля существенно меняет движение, найдены значения параметров, при которых могут возникать нелокальные противотечения, сравнимые по абсолютной величине с основным потоком и устойчивые как в смысле линейной теории, так и по отношению к нелинейным возмущениям.

В заключении кратко изложены основные результаты, достаточно убедительно обоснованные в диссертационной работе.

По оформлению и содержанию диссертации следует сделать следующие **замечания.**

1. На стр. 51 во второй строке сверху грамматическая ошибка, отсутствуют номера на страницах 4, 82; в разных разделах диссертации для обозначения числа Гартмана используются разные обозначения: Na и M , тоже самое касается и комплексного декремента. Это затрудняет понимание, особенно с учетом того, что M используют для обозначения числа Маха; некоторые обозначения на рисунках сделаны на английском языке; на стр. 67, 82, 93, 147, 161 написано, что «возмущения неустойчивы». Это «жаргон», так как неустойчивым (устойчивым) может быть основное состояние (покой, течение).
2. В работе нигде не упоминаются вопросы конвекции жидких металлов в магнитном поле. Возможно ли применение разработанных методов и компьютерных программ для анализа устойчивости МГД-течений с учетом тепловой конвекции?
3. В п.2.6 отсутствует описание физического механизма возникновения новой моды возмущений.
4. Имеются различия в постановке граничных условий на входе и выходе из каналов, формулы (4.17), (5.2), (5.5). В тексте диссертации эти различия не обсуждаются, а они являются существенными при интерпретации результатов. В п.5.1 изучено влияние безразмерных длин входного и выходного патрубков канала на собственные значения и основное течение.

Необходимо было бы провести аналогичное исследование и для других граничных условий.

Данные замечания не влияют на общую положительную оценку научной и практической значимости полученных диссертантом результатов. Они изложены с достаточной полнотой, хорошо иллюстрированы качественно оформленными рисунками и таблицами.

Заключение

В результате изучения диссертационной работы А.В. Проскурина можно сделать следующие выводы. В ней рассмотрены и обоснованы новые методы исследования устойчивости магнитно-гидродинамических течений в каналах. С практической точки зрения результаты позволяют: производить оценку параметров перспективных МГД-устройств и для больших магнитных чисел Рейнольдса, определять режимы течений в изогнутых каналах, решать проблемы переходных процессов и оценки параметров устойчивости. Результаты проведённых исследований также целесообразно рекомендовать для студентов старших курсов в ВУЗах и аспирантов в учебном процессе, специализирующихся в области механики жидкости.

Диссертация Проскурина А.В. является завершённой научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных им исследований сформулированы и обоснованы результаты, которые являются крупным и существенным вкладом в область механики жидкости – теорию гидродинамической устойчивости магнитно-гидродинамических течений. Основные результаты диссертации широко и достаточно полно опубликованы в ведущих рецензируемых журналах по механике жидкости. Автореферат в полной мере отражает основное содержание диссертации.

Диссертация Проскурина Александра Викторовича полностью соответствует всем требованиям ВАК РФ (пункт 9 «Положения о присуждении учёных степеней»).

Считаю, что её автор, вне всякого сомнения, заслуживает присуждения ему учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Официальный оппонент доктор физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы», профессор, главный научный сотрудник отдела дифференциальных уравнений механики ИВМ СО РАН

Виктор Константинович
Андреев

andr@icm.krasn.ru
+7983205

Иститут вычислите
Российской академ
Федерального исс
научный центр Сиби

660036, Красноярск, Академгородок, д. 50, стр. 44

ИВМ СО РАН
его отделения
«разделение
«красноярский
«академии наук»

+7 (391) 243-27-56
sek@icm.krasn.ru

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

ЛИЧНОЕ СОГЛАСИЕ ОППОНЕНТА

Я, Андреев Виктор Константинович, 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 сообщаяю:

Ученая степень, отрасли науки	доктор физико-математических наук
Научные специальности, по которым защищена диссертация	01.02.05- механика жидкости, газа и плазмы
Ученое звание	профессор
Академическое звание	
Тел:	+7983205:
E-mail:	andr@icm.krasn.ru
Должность	главный научный сотрудник
Подразделение организации	Отдел дифференциальных уравнений механики
Полное наименование организации, являющейся основным местом работы	Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук - обособленное подразделение Федерального исследовательского центра «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»
Ведомственная принадлежность орг.	Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Адрес служебный: Почтовый индекс, город, улица, дом	660036, Красноярск, Академгородок, д. 50, стр. 44
Web-сайт организации	icm.krasn.ru
Телефон организации.	8(391) 243-27-56
E-mail организации.	нет

По теме рассматриваемой диссертации имею 148 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	V.K. Andreev, A.I. Pyanykh	Andreev V. K., Pyanykh A. I. Comparative analysis of the analytical and numerical solution of the problem of thermocapillary convection in a rectangular channel // Журнал Сибирского федерального университета. Серия «Математика и физика». – 2023. – Т. 16. – №. 1. – С. 48-55.
2	В.К. Андреев, Ю.А. Гапоненко, О.Н. Гончарова, В.В. Пухначев	Современные математические модели конвекции. – Литрес, 2022.

№	Авторы	Название статьи, журнал, год, том, №, страницы
3	V.K. Andreev, A.I. Uporova	On a spectral problem for convection equations // Journal of Siberian Federal University. Mathematics and Physics. – 2022. – Vol. 15, No. 1. – P. 88-100. – DOI 10.17516/1997-1397-2022-15-1-88-100.
4	В.К. Андреев, И.В. Вахрамеев, Е.П. Магденко	Тепловая конвекция во вращающейся трубе // Сибирский журнал индустриальной математики. – 2022. – Т. 25, № 2(90). – С. 5-20. – DOI 10.33048/SIBJIM.2022.25.201.
5	V.K. Andreev	Asymptotic behavior of small perturbations for unsteady motion an ideal fluid jet // Journal of Siberian Federal University, Mathematics and Physics. – 2021. – Vol. 14, No. 2. – P. 204-212. – DOI 10.17516/1997-1397-2021-14-2-204-212.
6	V.K. Andreev, E.N. Lemeshkova	On the asymptotic behavior of inverse problems for parabolic equation // Journal of Elliptic and Parabolic Equations. – 2021. – Т. 7. – №. 2. – С. 905-921.
7	V.K. Andreev, I.V. Stepanova	Inverse problem for source function in parabolic equation at Neumann boundary conditions // Журнал Сибирского федерального университета. Серия «Математика и физика». – 2021. – Т. 14. – №. 4. – С. 445-451.
8	V.K. Andreev, E.N. Lemeshkova	Influence of the interface internal energy on monotone disturbances of a creeping stationary flow with a velocity field of the Hiemenz type // Journal of Physics: Conference Series. Vol. 1679. – 2020. – P. 22047. – DOI 10.1088/1742-6596/1679/2/022047.
9	V.K. Andreev	Об устойчивости нелинейных колебаний сферического слоя идеальной жидкости // Прикладная механика и техническая физика. – 2019. – Т. 60, № 2(354). – С. 137-147. – DOI 10.15372/PMTF20190211.
10	V.B. Bekezhanova, V.K. Andreev, I.A. Shefer	Influence of heat defect on the characteristics of a two-layer flow with the Hiemenz-type velocity // Interfacial Phenomena and Heat Transfer. – 2019. – Т. 7. – №. 4.
11	В.К. Андреев, Е.Н. Лемешкова	Тепловая конвекция двух несмешивающихся жидкостей в трехмерном канале с полем скоростей специального вида // ПММ. - 2023. - Т. 87, № 2. - С. 200-210. – DOI: 10.31857/S0032823523020029

Не являюсь членом экспертного совета ВАК

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

Дата 16 мая 2023 года

Подпись

(В.К. Андреев)

Иванова