

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе и инновациям

~~ФЕДЕРАЛЬНО~~ «Пермский государственный
следовательский университет»

Грха Владимир Александрович

«06» сентября 2023 г.

О Т З Ы В

Ведущей организации – Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «**Пермский государственный национальный исследовательский университет**» на диссертацию Проскурина Александра Викторовича на тему «Устойчивость магнитогидродинамических течений в каналах», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.9 Механика жидкости, газа и плазмы.

Фантастическое разнообразие и сложная сменяемость гидродинамических режимов в зависимости от внешних условий является неотъемлемой чертой всех физических явлений и технологических процессов, связанных с динамикой жидкостей, газов и плазмы. Особенно сложными в этом плане являются турбулентные течения, в отношении которых до сих пор не существует универсальных методов описания. Причиной многообразия гидродинамических режимов являются разные по своей природе неустойчивости, классификация которых тоже на сегодняшний день не является окончательно завершенной. Теория гидродинамической устойчивости, зародившаяся еще в начале XX века, продолжает сегодня активно развиваться и органично вошла в самые разные разделы механики жидкости, газа и плазмы. Одной из таких наук, в которой аппарат теории гидродинамической устойчивости оказался крайне востребован, является магнитная гидродинамика. Моделирование магнитогидродинамических течений и нахождение областей параметров, в которых тот или иной режим является устойчивым, представляют собой актуальную задачу по причине активного использования электропроводящих жидкостей, включая расплавы металлов, в науке и технических приложениях. В технологических установках и агрегатах жидкие металлы, как правило,

движутся в каналах сложной формы. Исследование таких течений на устойчивость является чрезвычайно трудоемкой задачей и требует применения специальных математических методов, которые, в свою очередь, подразумевают разработку новых численных алгоритмов и применение высокопроизводительной вычислительной техники.

Сегодня задачи магнитной гидродинамики ввиду крайней востребованности нуждаются в более глубоких и системных теоретических исследованиях. Особенно острая необходимость в решении этих задач сейчас существует по причине разработки систем охлаждения ядерных реакторов на быстрых нейтронах, отвод тепла от которых осуществляется жидкими металлами. Здесь же можно упомянуть программу исследований на термоядерном реакторе ИТЭР, который сейчас находится на стадии сборки. Используемые для защиты оборудования реактора модули blankets имеют жидкометаллические элементы. Эти модули в настоящее время интенсивно разрабатываются, что влечет за собой большой объем экспериментальных и теоретических исследований.

С проблемами плавки и управления течениями жидких металлов при помощи магнитных полей приходится сталкиваться также в металлургической промышленности.

Таким образом, диссертационная работа Проскурина Александра Викторовича на тему «Устойчивость магнитогидродинамических течений в каналах», посвященная развитию достаточно общей методики для решения целого класса задач магнитной гидродинамики, представляется чрезвычайно актуальной и своевременной.

В первой главе проведен анализ современного состояния исследований, посвященных проблемам устойчивости магнитогидродинамических течений. Выполнен обзор работ по устойчивости плоскопараллельных и более сложного вида течений. Проанализированы численные методы, используемые при решении этих задач.

Во второй главе выполнена постановка задачи устойчивости плоскопараллельных течений вязкой несжимаемой жидкости, в основе которой лежит базовое уравнение теории гидродинамической устойчивости – уравнение Орра-Зоммерфельда. В рамках сформулированной задачи описаны некоторые эффективные численные методы исследования устойчивости плоскопараллельных течений вязкой электропроводящей жидкости: методы дифференциальной прогонки и коллокаций. Введены ключевые безразмерные параметры, характерные для магнитной гидродинамики: число Альфвена, магнитный

аналог числа Прандтля, а также гидродинамическое и магнитное числа Рейнольдса.

Решена задача устойчивости напорного магнитогидродинамического течения в зазоре между коаксиальными цилиндрами при наложении продольного и спирального магнитных полей. Определены значения магнитного числа Прандтля, при которых течение особенно чувствительно к стабилизирующему действию магнитного поля.

В главе 3 обсуждается приложение метода функций акад. В.Л. Рвачева к краевым задачам гидромеханики. В качестве примера при помощи метода функций Рвачева вычислены поля скорости вязкой жидкости в круглой и прямоугольной трубе с внутренним элементом, ось симметрии которого смещена относительно геометрического центра внутри трубы.

Далее технология, разработанная для решения задач со сложной формой границ, применяется к расчету напорного магнитогидродинамического течения в трубе, сечение которой представляет собой пустотелый двутавр с подобластями в виде прямоугольных элементов.

Также, ставится и решается задача устойчивости двумерного магнитогидродинамического течения. В ходе численного моделирования были успешно применены современные вычислительные технологии, основанные на применении программного интерфейса OpenMP на многоядерных компьютерах.

В этой главе наиболее отчетливо начинает проявляться масштаб и новизна работы, универсальность предложенной методики, а также широкие перспективы дальнейшего применения разработанного подхода.

В четвертой главе излагается алгоритм численного моделирования течения электропроводящей вязкой жидкости и результаты исследования его устойчивости, включая переход к турбулентности. Приближенное представление полей искомых физических величин производилось при помощи спектрально-элементного метода.

Предложенный метод исследования нелинейной устойчивости, основан на идее разделения решения на стационарную часть и нестационарную добавку. Сначала вычисляется стационарное течение, после чего задаются начальные условия для возмущения и производится интегрирование по времени. Предполагается, что такой подход дает определенные возможности по сравнению с прямым численным моделированием при использовании общих исходных уравнений гидродинамики.

Для проверки работы программного кода с возмущениями была рассмотрена устойчивость течения Гартмана по отношению к возмущениям специального вида, моделирующим вдув жидкости в канал через нижнюю границу. Вдув генерирует завихренность в нижней части канала. Внесенное возмущение может нарастать или затухать, в зависимости от отношения чисел Рейнольдса и Гартмана. Приведены расчетные поля абсолютной величины скорости в продольном сечении, проходящем через ось вдува. Полученная картина устойчивости течения Гартмана соответствует как экспериментальным результатам, так и теоретическим.

Пятая глава посвящена исследованию магнитогидродинамических течений в изогнутых каналах. Сначала классифицируются стационарные течения, которые возникают без магнитного поля. Изучено возникновение областей рециркуляции в зависимости от числа Рейнольдса. Обсуждаются условия возникновения квазипериодического течения. Далее производится исследование устойчивости этого течения. Показано, что нейтральные кривые содержат две области неустойчивости. Верхняя соответствует монотонным возмущениям, а нижняя – колебательным. Представлена форма собственной функции монотонного возмущения, которая оказалась не вполне типичной даже для продувных течений. Найден новый тип течений, которые возникают в изогнутом канале при наложении магнитного поля, изучены условия его возникновения, показано, что этот тип течений устойчив.

В заключении представлен перечень основных результатов, по совокупности оцениваемый Ведущей организацией как **весомое научное достижение** в области исследования устойчивости магнитогидродинамических течений.

Работа прошла всестороннюю апробацию на профильных конференциях по проблемам устойчивости в гидродинамике, в том числе соискатель был заслушан на расширенном научном семинаре в Пермском государственном национальном исследовательском университете с участием специалистов в области вычислительной математики и гидромеханики. Также в работе семинара принимали участие коллеги из Института механики сплошных сред УрО РАН, занимающиеся проблемами магнитной гидродинамики. Диссертационное исследование А.В. Проскурина получило поддержку всех сторон, задействованных в обсуждении.

По результатам заслушивания и обсуждения диссертации А.В. Проскурина сделано заключение, что в работе выполнен большой объем комплексных исследований, включающий разработку методики решения и

результаты расчетов задач устойчивости магнитогидродинамических течений в трубах и каналах различной геометрии. Чрезвычайно значимым является обобщение полученных данных на основе расчетов, выполненных с помощью авторских численных кодов, что дает возможность прямого выхода на практическое приложение полученных результатов.

В качестве замечаний отметим следующее:

1) С одной стороны, результаты работы выглядят весьма внушительно, однако, когда дело доходит до решения конкретных задач, возникает ощущение, что диссертационное исследование слишком сконцентрировано только на анализе устойчивости течений. Между тем, наблюдаемые переходные режимы, а также устойчивые течения (как стационарные, так и колебательные) при определенных значениях управляющих параметров всегда описываются с учетом всех нелинейных членов в уравнениях. Смена гидродинамических режимов, рассматриваемая в рамках полной системы уравнений, позволяет описывать жесткие типы возбуждения, позволяет изучать гистерезисные явления и обладает, очевидно, большей информативностью, нежели линейная теория гидродинамической устойчивости. Таким образом, линейная теория устойчивости представляет собой скорее начальный и вспомогательный инструмент в исследовании гидродинамического поведения, нежели общую методику, дающую полную информацию о временном поведении и локальных характеристиках течений. Иными словами, в целом по новым решенным в диссертации задачам не хватает сравнения результатов линейной теории устойчивости с результатами прямого численного моделирования полных нелинейных задач, или сравнения с экспериментальными данными.

2) Несмотря на большой общий объем работы, повсеместно в тексте диссертации слабо представлена физическая интерпретация полученных результатов по устойчивости. Автор как бы предполагает, что из полученных нейтральных кривых и карт устойчивости все понятно без каких-либо комментариев. Вот типичный пример описания результатов расчетов в главе 3 на стр. 147:

“На рисунке 3.23 приведены зависимости собственных значений от L для разных чисел Рейнольдса от 10^3 до $5 \cdot 10^3$. Для каждой ветви, представленной на графике, величина X возрастает с увеличением L . В свою очередь, сами ветви расположены в определенном порядке: при увеличении числа Рейнольдса значения X возрастают. На рисунке 3.24 приведены зависимости действительной части собственных значений от Re при $L = 0.25(1)$, $L = 1(2)$, $L = 4(3)$. Число Рейнольдса меняется от 10^3 до 10^4 . С увеличением числа Рейнольдса для зависимостей с $L = 0.25$ и $L = 1$ величина X возрастает, при $L = 4$ величина X почти не меняется”.

Тот факт, что X возрастает с увеличением L является просто тривиальной констатацией того, что изображено на рисунке 3.23. То же самое можно сказать про следующее утверждение, согласно которому “значения X возрастают при увеличении числа Рейнольдса” и т.д. Иными словами, хотелось бы, чтобы вопросы физической интерпретации результатов были раскрыты более глубоко, а это как раз можно сделать, в том числе, при сравнении результатов линейной теории устойчивости с решением полной нелинейной задачи.

3) В диссертации во всех решаемых задачах пристальное внимание повсеместно уделяется выбору базиса и граничным условиям на скорость (функцию тока), но абсолютно игнорируется вопрос о граничных условиях на возмущения давления, электрического потенциала и магнитного поля. Полагаем, что этот вопрос нельзя оставлять без внимания. В диссертации этот пункт считается по-видимому “очевидным”. Однако, представляется, что эта проблема сразу актуализируется, например, при переходе от длинных каналов, изготовленных из проводящих ток материалов, с которыми приходится сталкиваться в системах охлаждения, к реальным тиглям и кавернам в металлургических производствах, произведенных из совсем других материалов.

4) По итогам общего осмысления работы несколько парадоксально выглядит стремление автора применять результаты исследования к описанию жидкометаллических систем охлаждения и полное отсутствие в диссертации задач устойчивости, в которых бы присутствовало температурное поле. Понятно, что задачи устойчивости станут при этом значительно сложнее. Помимо гидродинамических появятся дополнительные тепловые моды. Но, видимо, эти задачи ждут своего решения с помощью разработанных автором методов.

5) Удивительно, но занимаясь профессионально теорией гидродинамической устойчивости, автор не упоминает в диссертации о двух знаменитых книгах по теории гидродинамической устойчивости:

Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. М.: Наука, 1972. – 392 с.

Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М., Непомнящий А.А. Устойчивость конвективных течений. М: Наука, 1989. – 320 с.

Обе монографии не просто посвящены задачам конвективной устойчивости, но в этих книгах имеются разделы, напрямую касающиеся магнитогидродинамических задач устойчивости и применения к их решению тех численных методов, которые используются автором в своей диссертации.

6) К сожалению, в диссертации встречаются небрежности в изложении на грани допустимого. Так на стр. 14 диссертации автор пишет:

“Исследование линейной устойчивости течений несжимаемой вязкой жидкости подразумевает, что скорость и давление, входящие уравнения Навье-Стокса, представлены в виде

$$\{U, P\} + \{v, p\}$$

где U, P , – стационарное решение, а v, p , – бесконечно-малое возмущение. После такой подстановки уравнения движения жидкости становятся линейными”.

Следует заметить, что в результате разбиения полей скорости и давления на аддитивные части, уравнения гидродинамики не могут стать линейными! Чтобы уравнения стали линейными, их необходимо **принудительно линеаризовать**, отбросив нелинейные по возмущениям члены.

В автореферате на стр. 15 имеем

“Было обнаружено, что локализованные возмущения устойчивы при $L < 4$ и $Re < 104$ [19]”.

Но, устойчивым или неустойчивым является основное течение, относительно вносимых в поток возмущений, а не само возмущение! Даже если речь идет о вторичной неустойчивости любой сложности, все равно неустойчивым является рождающееся течение, а не возмущение.

Ведущая организация по своему замыслу оценивает содержательную сторону диссертации в целом. В отзыве мы не можем себе позволить перечислить все замечания такого рода, а оцениваем работу интегрально. Поэтому в качестве общего замечания отметим наличие в работе **отклонений от строгости** при изложении материала диссертации.

В тексте диссертации есть опечатки.

На стр. 115 в предложении:

“На рисунке 3.1 показаны диаграммы Венна R-конъюнкции (а) и R-дизъюнкции (с) ...”

в слове “дизъюнкции” пропущена буква.

Автореферат адекватно и с достаточной полнотой отражает содержание диссертации. Правда, по нему тоже имеются замечания.

1. В качестве общепринятого стиля во всех документах, связанных с диссертационными делами, и в первую очередь в автореферате, должна использоваться безличная форма изложения. В то же время в этом важном документе повсеместно встречаются фразы типа:

“Заполненные матрицы такого размера эффективно решаются только итерационными методами, я использовал библиотеки ARPACK и SLEPC”.

2. В автореферате не приведен вид основного плоскопараллельного решения, устойчивость которого считается. В результате в дальнейшем это за-

трудняет оценку того, насколько трудоемкими являются последующие задачи устойчивости для более сложных не плоскопараллельных течений.

3. Автореферат тоже не лишен опечаток:

На стр. 13 имеет место опечатка в предпоследнем слове предложения:

“В главе 3 обсуждается приложение метода функций Рвачева к задачам гидродинамики и гидродинамическою устойчивости”.

Несмотря на сделанные замечания полагаем, что представленное к защите диссертационное исследование удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям. Результаты исследований автора достаточно полно отражены в работах, которые опубликованы в журналах, входящих в общепризнанные международные базы данных и перечень ВАК. Также стоит отметить широкое освещение материалов диссертации на большом числе профильных конференций и научных семинарах в ведущих научных центрах РФ и за рубежом, что для докторской диссертации является необходимым признаком масштаба выполненной работы.

Теоретическая и практическая значимость результатов диссертационного исследования заключается в том, что автором показана возможность решения задач устойчивости магнитогидродинамических течений для полостей и каналов со сложной геометрией, что позволяет решать задачи фактически со сколь угодно сложными краевыми условиями. Ранее такого рода исследования на устойчивость проводились в простейших модельных постановках. Подход, разработанный когда-то академиком В.Л. Рвачевым, использовался автором диссертации применительно к магнитогидродинамическим задачам устойчивости. Результаты позволяют с некоторой степенью осторожности заявить о **значительном прорыве** в возможностях решения серьезных практически важных технологических задач в области магнитной гидродинамики.

Можно утверждать, что цели, поставленные автором в диссертации, достигнуты, а полученные им научные результаты обладают необходимой новизной и фундаментальностью. Диссертационная работа А.В. Проскурина на тему “Устойчивость магнитогидродинамических течений в каналах”, представленная на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, является **крупным научным достижением** в области **теории гидродинамической устойчивости** и магнитной гидродинамике, в частности. Обоснованность и достоверность полученных результатов обусловлена применением новых и хорошо зарекомендовавших себя численных методов к решению задач магнитной гидродинамики, выведенных на новый уровень вычислительных возможностей. Полученные автором диссертации результаты ха-

рактируются внутренней непротиворечивостью и получены в строгом соответствии с надлежащими процедурами по достижению сходимости.

Материалы диссертации рекомендуется использовать в научных организациях и учреждениях высшего образования РФ, занятых выполнением работ, связанных с использованием жидких металлов и других электропроводящих жидкостей. Среди организаций, принимающих участие в этой деятельности, можно упомянуть Томский государственный университет (Томск), Институт теплофизики им. М.А. Кутателадзе (Новосибирск), Институт механики сплошных сред УрО РАН (Пермь), Казанский (Приволжский) федеральный университет (Казань), Пермский национальный исследовательский политехнический университет (Пермь), Томский политехнический университет (Томск), Национальный исследовательский университет МЭИ (Москва), Институт механики МГУ (Москва), Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики (Российский федеральный ядерный центр, Саров).

Диссертация Проскурина Александра Викторовича, представленная на соискание ученой степени доктора физико-математических наук на тему «Устойчивость магнитогидродинамических течений в каналах» удовлетворяет всем требованиям ВАК «Положения о присуждении ученых степеней» (утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842) и может служить достаточным основанием для присуждения Проскурину Александру Викторовичу ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.9 Механика жидкости, газа и плазмы.

Заключение принято на расширенном заседании кафедры теоретической физики Пермского государственного национального исследовательского университета «06» сентября 2023 г.

Протокол заседания № 1.

Заведующий кафедрой теоретической физики
ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный
исследовательский университет», д.ф.-м.н., профессор

Демин В

614068, г. Пермь, ул. Букирева, 15. ФГАОУ ВО «Пермский
национальный исследовательский университет», кафедра
физики. Тел. 8 (342)2396227, 8 (342)2396208 e-mail: demin@

Подпись

В.А. Демин

Сведения о ведущей организации

по диссертации Проскурина Александра Викторовича «Устойчивость магнитогидродинамических течений в каналах» по специальности 1.1.9 — Механика жидкости, газа и плазмы на соискание ученой степени доктора физико-математических наук

Полное наименование организации в соответствии с уставом:	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет»
Сокращенное наименование организации в соответствии с уставом:	ПГНИУ
Ведомственная принадлежность организации	Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Полное наименование структурного подразделения, составляющего отзыв:	кафедра теоретической физики
Почтовый адрес организации:	614068, Пермский край, г. Пермь, ул. Букирева, 15
Веб-сайт	http://www.psu.ru/
Телефон	239-64-35
Адрес электронной почты	info@psu.ru

Список основных публикаций работников структурного подразделения, составляющего отзыв, в рецензируемых научных изданиях за последние пять лет по теме диссертации (не более 15 публикаций).

№	Авторы	Название статьи, журнал, год, том, №, страницы
1	Nikulin I.L., Demin V.A.	Simulation of the Metal Melt Convection and its Viscoelastic Interaction with Dielectric Film in an Alternating Magnetic Field // Metals and Materials International. – 2022. – Т. 28. – №. 9. – С. 2166-2179.
2	Никулин И.Л., Демин В.А.	Математическая модель деформирования оксидной плёнки на поверхности металлического расплава в переменном магнитном поле // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2022. – №. 1. – С. 72-88.
3	Nikulin I.L., Demin V.A., Perminov A.V.	Surface film deformation by melt moving in an alternating magnetic field and the integral criterion of such film stability // Fluid Dynamics Research. – 2022. – Т. 54. – №. 2. – С. 025501.
4	И.Л. Никулин, В.А. Демин, А.В. Перминов	Движение металлического расплава и упруго-напряженные состояния оксидной пленки при индукционной плавке // Инженерно-физический журнал, 2021, Т.94, No 6, С. 1477-1488.

№	Авторы	Название статьи, журнал, год, том, №, страницы
5	V.A. Demin, M.I. Petukhov, A.I. Shmyrova	Demin, V.A. 3D instability of a toroidal flow in the liquid partially covered by a solid film // Journal of Physics: Conference Series : 22, Perm, Virtual, 22–26 марта 2021 года. – Perm, Virtual, 2021. – P. 012071. – DOI 10.1088/1742-6596/1945/1/012071.
6	V.A. Demin, M.I. Petukhov, A.I. Mizev, A.V. Shmyrov	Localization of melt components in a crucible as a result of inserting anisothermic rod with non-wettable boundaries // Microgravity Science and Technology. – 2020. – Vol. 32, No. 1. – P. 89-97. – DOI 10.1007/s12217-019-09744-4.
7	T.P. Lyubimova, M.G. Kazimardanov, A.V. Perminov	Stability of quasi-equilibrium states and supercritical regimes of thermal vibrational convection of a Williamson fluid in zero gravity conditions // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2019. – Vol. 129. – P. 406-414. – DOI 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.09.112.
8	T. Lyubimova, Y. Parshakova	The influence of thermocapillary effect on the onset of convection in a two-layer system with deformable interface and perfectly conductive boundaries // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2019. – Vol. 129. – P. 610-617. – DOI 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.09.099.
9	T.P. Lyubimova, R.V. Skuridin	Lyubimova, T. P. The effect of acoustic wave on the stability of stationary convective flow of binary fluid in a horizontal layer subjected to horizontal temperature and concentration gradients // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2019. – Vol. 132. – P. 789-801. – DOI 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.12.013.
10	T. Lyubimova, S. Prokopev, A. Vorobev	Rayleigh-Taylor instability of a miscible interface in a confined domain // Physics of Fluids. – 2019. – Vol. 31, No. 1. – P. 014104. – DOI 10.1063/1.5064547.
11	Samoilova A.E., Непомныашчы А.	Feedback control of Marangoni convection in a thin film heated from below // Journal of Fluid Mechanics. – 2019. – Т. 876. – С. 573-590.
12	К.Б. Циберкин	Устойчивость плоскопараллельных и двумерных течений жидкости над пористой средой // Вестник Пермского университета. Физика. – 2019. – № 1. – С. 52-59. – DOI 10.17072/1994-3598-2019-1-52-59.

№	Авторы	Название статьи, журнал, год, том, №, страницы
13	A. Alabuzhev, I. Volodin	Alabuzhev, A. Linear instability of forced oscillations of a thin ferrofluid film in a vertical magnetic field // Microgravity Science and Technology. – 2022. – Vol. 34, No. 5. – P. 1-11. – DOI 10.1007/s12217-022-10014-z.
14	I.V. Volodin, A.A. Alabuzhev	Pulsating fields of a thin film in a static magnetic field under vertical vibrations // Journal of Physics: Conference Series, Saint Petersburg, 18–22 октября 2021 года. – Saint Petersburg, 2021. – P. 012233. – DOI 10.1088/1742-6596/2103/1/012233.
15	A.A. Alabuzhev	Alabuzhev, A.A. Oscillations and parametric instability of a cylindrical drop of a low-viscous liquid // – 2019. – Vol. 46, No. 5. – P. 441-457. – DOI 10.1615/InterJFluidMechRes.2019025743.

И.о. ректора

И.А. Германов