

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.125.01,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ИНСТИТУТА ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ
И ПРИКЛАДНОЙ МЕХАНИКИ ИМ. С.А. ХРИСТИАНОВИЧА
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК, ПО
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЁНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело №
решение диссертационного совета от 8.12.2023 №21

О присуждении Проскурину Александру Викторовичу, гражданину РФ, учёной степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Устойчивость магнитогидродинамических течений в каналах» по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы принята к защите 2 июня 2023 г. (протокол № 13) диссертационным советом 24.1.125.01, созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук (ФГБУН ИТПМ СО РАН), 630090, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1, утвержденным приказом Рособнадзора от 16.11.2007 №2249-1603 и продлением срока полномочий приказом Минобрнауки России от 10.09.2009 (№1925-1734), 08.06.2016 (№ 661/нк), от 3.08.2018 (№59/нк), от 03.06.2021 (№561/нк) и от 12.09.2022 (№ 1215/нк).

Соискатель Проскурин Александр Викторович, 13 сентября 1980 года рождения, в 2006 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук «Математическое моделирование ламинарно-турбулентного перехода в параллельных течениях вязкой электропроводящей жидкости» в диссертационном совете, созданном на базе Алтайского государственного университета. Соискатель освоил программу подготовки научных и научно-педагогических кадров в докторантуре в Алтайского государственного университета, завершив обучение в 2016 году.

Диссертация выполнена на кафедре прикладной математики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образо-

вания «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова».

Научный консультант – Сагалаков Анатолий Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей и экспериментальной физики Института цифровых технологий, электроники и физики Алтайского государственного университета.

Официальные оппоненты:

Андреев Виктор Константинович, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Отдела дифференциальных уравнений механики Института вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук – обособленного подразделения Федерального исследовательского центра «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», г. Красноярск;

Старченко Сергей Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией главного магнитного поля Земли Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН;

Мулляджанов Рустам Илхамович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией суперкомпьютерных вычислений и искусственного интеллекта в энергетических технологиях Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет» (ФГАОУ ВО ПГНИУ), в своем положительном отзыве, подписанном Деминым Виталием Анатольевичем, профессором, заведующим кафедрой теоретической физики ФГАОУ ВО ПГНИУ, ука-

зала, что диссертация А.В. Проскурина, представленная на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, «является крупным научным достижением в области теории гидродинамической устойчивости и магнитной гидродинамике», 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 Проскуру Александру Викторовичу ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы.

Соискатель имеет 66 опубликованных работ, все они по теме диссертации, из них в рецензируемых изданиях опубликована 21 работа. Недостоверные сведения об опубликованных соискателем работах отсутствуют. Вклад автора в опубликованных работах состоит в постановке задач, обсуждении результатов, работе над текстом публикаций. Все расчеты, обработка результатов, подготовка иллюстраций и таблиц были выполнены автором единолично. Наиболее значимые работы по теме диссертации:

1. Proskurin A. V. Linear stability of flow in a 90° bend // *Physics of Fluids*. 2022. Vol. 34, No. 3. P. 034111.

Рассматривается линейная устойчивость течения вязкой жидкости в плавно изогнутом плоском канале. Найдены критические числа Рейнольдса, нейтральные кривые, изучены наиболее типичные моды.

2. Proskurin A.V, Sagalakov A.M. A simple scenario of the laminar breakdown in liquid metal flows // *Magnetohydrodynamics*. 2021. Vol. 57, No. 2. P. 191–209.

Представлены результаты моделирования потери устойчивости течения Гартмана под действием возмущений конечной амплитуды специального вида в виде вдува через нижнюю плоскость канала.

3. Проскурин А. В. Устойчивость напорного течения между коаксиальными цилиндрами в продольном магнитном поле // *Прикладная механика и техническая физика*. 2020. Т. 61, № 6. С. 16–23.

Изучена линейная устойчивость течения вязкой электропроводящей жидкости между коаксиальными цилиндрами в продольном магнитном поле. Получены зависимости критических чисел Рейнольдса от чисел Альфвена и магнитного числа Прандтля.

4. Proskurin A.V, Sagalakov A.M An origin of magnetohydrodynamic reverse flow in 90° bends // *Physics of Fluids*. 2018. Vol. 30, No. 8. P. 081701.

Исследовались стационарные паттерны течения в изогнутом канале при наличии магнитного поля.

5. Proskurin A.V, Sagalakov A.M Spectral/hp element MHD solver // *Magneto-hydrodynamics*. 2018. Vol. 54, No. 4. P. 361–371.

Изложены основные теоретические положения, на основе которых А.В. Проскуриным создана компьютерная программы для расчета МГД-течений, приведены примеры, доказывающие корректность ее работы.

6. Проскурин А.В., Сагалаков А.М. Устойчивость течения Пуазейля при наличии продольного магнитного поля // *Журнал технической физики*. 2012. Т. 82, № 5. С. 29–35.

Приведены результаты исследования линейной устойчивости течения Пуазейля в плоском канале при наличии продольного магнитного поля. Получены зависимости критических чисел Рейнольдса от чисел Альфвена и магнитного числа Прандтля.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

Ведущей организации ФГАОУ ВО ИГНИУ. Отмечается актуальность работы, обусловленная активным использованием электропроводящих жидкостей, включая расплавы металлов, и, вследствие этого, востребованностью глубоких и системных теоретических исследований. Обоснованность и достоверность результатов обусловлена строгим выполнением надлежащих процедур для достижения сходимости. Отмечается теоретическая и практическая значимость работы, «значительный прорыв в возможностях решения практически важных технологических задач в области магнитной гидродинамики», что диссертация

«является крупным научным достижением в области теории гидродинамической устойчивости и магнитной гидродинамике». Диссертация удовлетворяет всем требованиям ВАК «Положения о присуждении ученых степеней» и может служить достаточным основанием для присуждения Проскуруину Александру Викторовичу ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы. Сформулированы следующие замечания: (1) 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) Слабо представлена физическая интерпретация полученных результатов по устойчивости; (3) Игнорируется вопрос граничных условий на возмущения давления, электрического потенциала и магнитного поля на стенках реальных технических устройств вроде металлургических тиглей и так далее; (4) В диссертации не решаются задачи устойчивости, в которых бы присутствовало температурное поле; (5) Не процитированы две широко известные монографии по конвективной устойчивости; (6) Присутствуют небрежности изложения и опечатки; (7) В автореферате не приведен вид основного плоскопараллельного течения, устойчивость которого считается, что затрудняет оценку того, насколько трудоемкими являются задачи устойчивости для более сложных не плоскопараллельных течений.

Официального оппонента д.ф.-м.н. Андреева В.К. Отмечается, что работа посвящена актуальной и практически важной проблеме, в направлении исследований получен ряд новых результатов, которые обладают высокой степенью обоснованности и достоверности. Основные результаты диссертации широко и полно опубликованы в ведущих рецензируемых журналах. Указано, что диссертация А.В. Проскураина соответствует специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы, является завершенной научно-квалификационной работой, в которой сформулированы и обоснованы результаты, которые являются крупным вкладом в область механики жидкости – теорию гидродинамической устойчи-

вости магнитогидродинамических течений. Диссертация полностью соответствует всем требованиям ВАК, а А.В. Проскурин заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук. Замечания: (1) В диссертации на странице 51 во второй строке сверху грамматическая ошибка, отсутствуют номера на страницах 4, 82, для числа Гартмана и комплексного декремента в разных разделах использованы разные обозначения, несколько раз (стр. 67, 82, 93, 147, 161) использовано жаргонное выражение «возмущения неустойчивы»; (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 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 патрубков канала на собственные значения и основное течение. Необходимо было бы провести аналогичное исследование и для других граничных условий.

Официального оппонента д.ф.-м.н. Старченко С.В. Отмечается актуальность работы, ее новизна, обоснованность результатов и выводов, сделана общая характеристика работы. А.В. Проскуриным решена крупная научная проблема об устойчивости МГД-течений в каналах, диссертация представляет собой законченную научно-исследовательскую работу на актуальную тему. Она выполнена на высоком научно-техническом уровне, соответствует паспорту специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы, а также п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», а А.В. Проскурин заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук. Замечания: (1) Наиболее существенным, 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; (5) Присутствуют ошибки и опечатки: стр 28, 32, 113.

Официального оппонента д.ф.-м.н. Мулляджанова Р.И. Отмечается актуальность работы, ее новизна, обоснованность результатов и выводов, практическая значимость результатов, сделана общая характеристика работы. Диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», включая п.п. 9, 10, в части, касающейся ученой степени доктора наук, а ее автор Проскурин А.В. заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы. Замечания: (1) В диссертации не приведено необходимой подробной информации о диапазоне безразмерных параметров, который является интересным с точки зрения конкретных сред и прикладных постановок задач; (2) Очень подробно анализируются данные численных экспериментов, аналогичные данные из литературы, однако экспериментальные данные почти не отмечены; (3) В обзоре литературы 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 (стр. 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) Во втором параграфе (стр. 179) 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 (стр. 183) о двух точках зрения на развитие турбулентности, хотя и знаком с цитируемой литературой; (9) Рисунки 4.10, 4.21 и др. 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 рис. 4.14 и в тексте представлена эволюция амплитуды инъекции на твердой стенке. Интуитивно кажется, что лучше не задавать интенсивность инъекции максимальной амплитудой в момент времени $t=0$, в то время как в исходном решении этой инъекции 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) Имеется ряд описок, неточностей и жаргонизмов. Например, на стр. 13 используется термин «вихри Гротлера», на стр. 211 говорится, что «такой подход позволяет исследовать более тонкие постановки задач» и т. д.

Отзывы на автореферат:

Д.ф.-м.н. **Петровой Анны Георгиевны**, профессора кафедры дифференциальных уравнений Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования Алтайский государственный университет. Отзыв положительный. Отмечается новизна и актуальность, убедительная апробация полученных результатов. Замечаний нет.

Д.ф.-м.н. **Маламанова Степана Юрьевича**, профессора кафедры «Механика деформируемого твердого тела» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования Балтийский государственный технический университет ВОЕНМЕХ им. Д.Ф. Устинова. Отзыв положительный. Отмечается актуальность и новизна результатов, их теоретическая и практическая значимость. Замечания: (1) В исходной части реферата автор утверждает, что все полученные результаты приведены в 68 публикациях, большинство из которых имеют соавтора Сагалакова А.М., но личный вклад автора никак не выделен; (2) Отсутствуют ссылки на цикл статей, в которых опубликована теория неустойчивости с несколькими методами обнаружения границ неустойчивости и хаоса (Скворцов Г.Е., Перевозников Е.Н.).

Д.ф.-м.н. **Васильева Анатолия Александровича**, главного научного сотрудника Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института гидродинамики им. Лаврентьева СО РАН. Отзыв положительный. В отзыве отмечается актуальность и новизна результатов, их теоретическая и практическая значимость. Замечаний нет.

Д.ф.-м.н. **Вшивкова Виталия Андреевича**, главного научного сотрудника лаборатории Суперкомпьютерного моделирования Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН. Отзыв положительный. Отмечается актуальность и новизна результатов, их теоретическая и практическая значимость. Замечания: (1) в тексте автореферата обнаружены незначительные недочёты, связанные с грамматическими и стилистическими погрешностями; (2) Отсутствие

информации о возможности и необходимости использования при расчётах вычислительных систем современной архитектуры.

Д.т.н. Никулина Иллариона Леонидовича, доцента Пермского национального исследовательского политехнического университета. Отзыв положительный.

Замечания: (1) В автореферате не приведены результаты верификации разработанных моделей: нет информации о модельных задачах или экспериментах, которые использованы для проверки численных алгоритмов и программы, не показана сходимость решений на сгущающихся сетках, не приведены оценки точности и погрешности вычислительной реализации модели; (2) Не показаны преимущества метода функций Рвачева (стр. 23, 3-я строка сверху) перед другими методами.

Д.ф.-м.н. Козлова Виктора Геннадьевича, профессора, заведующего лабораторией вибрационной гидромеханики Пермского государственного гуманитарно-педагогического университета. Отзыв положительный. Замечаний нет.

К.ф.-м.н. Бабушкина Игоря Аркадьевича — заведующего кафедрой общей физики Пермского государственного национального исследовательского университета. Отзыв положительный. Отмечается наличие опечаток.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что официальные оппоненты являются признанными высокопрофессиональными специалистами в областях, непосредственно связанных с темой диссертации: д.ф.-м.н. В.К. Андреев – специалист в областях гидродинамической устойчивости, неизотермических и термокапиллярных течений, группового анализа уравнений гидродинамики; д.ф.-м.н. С.В. Старченко является специалистом в области магнитной гидродинамики и устойчивости МГД-течений; д.ф.-м.н. Р.И. Мулляджанов – специалист в гидродинамической устойчивости, магнитной гидродинамике, численных методах гидродинамики. Ведущая организация Пермский государственный национальный исследовательский университет широко известна своими исследованиями в области магнитной гидродинамики и гидродинамической устойчивости.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- Установлена связь между критическими числами Рейнольдса и величинами магнитного числа Прандтля (от 10^{-4} до 10), числа Альфвена (до 0.05), в том числе стабилизация магнитным полем при значениях магнитного числа Прандтля 10^{-1} и 1 для течений в плоском канале и в трубе кольцевого сечения;
- Обнаружено существование новой моды неустойчивости плоского течения и течения в канале кольцевого сечения при наличии продольного магнитного поля;
- Выявлено дестабилизирующее влияние азимутального магнитного поля на течение в канале кольцевого сечения при наличии продольного магнитного поля, эффект изучен при числах Гартмана до 10^3 ;
- Предложен новый численный метод исследования устойчивости МГД-течений на основе функций В.Л. Рвачева;
- Разработана методика исследования устойчивости МГД-течений в областях произвольной формы при помощи спектрально-элементного метода;
- выявлены режимы течения в изогнутом на 90 градусов канале без магнитного поля при числе Рейнольдса, меньшем 1900, найдены критические числа Рейнольдса и классифицированы линейные моды;
- Выявлены режимы течения в изогнутом на 90 градусов канале в вертикальном магнитном поле при числе Рейнольдса, меньшем 10^2 и числе Стюарта, меньшем 10^2 ; в горизонтальном магнитном поле вплоть до числа Рейнольдса 10^3 и числа Гартмана 10^2 ; обнаружено существование устойчивого противотечения.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

- Обнаружен новый тип неустойчивости и эффект сильной стабилизации параллельных течений, важные для теории взаимодействия магнитного поля с жидкостью и теории гидродинамической устойчивости;

- Раскрыт потенциал метода функций В.Л. Рвачева для задач гидродинамической устойчивости – возможность достижения высокой скорости сходимости и алгоритмическая простота;

- Применительно к тематике диссертации результативно использован спектрально-элементный метод;

- Показано существование особенностей взаимодействия жидкости и магнитного поля при изменении направления движения и потере устойчивости стационарного течения.

Значение полученных соискателем результатов для практики подтверждается тем, что:

- Новые результаты о критических числах Рейнольдса для параллельных течений можно использовать для проектирования устройств, в которых магнитное число Рейнольдса нельзя считать малым;

- Разработана методика и показана возможность решения задач устойчивости магнитогидродинамических течений для полостей и каналов со сложной геометрией, что позволяет решать практические задачи со сколь угодно сложной формой границ.

Оценка достоверности результатов выявила, что:

- Исследования потери устойчивости ламинарного течения проводились при помощи хорошо обоснованных методов;

- Используются надежные и хорошо себя зарекомендовавшие численные методы: метод дифференциальной прогонки, метод коллокаций, спектрально-элементный метод;

- Установлено количественное совпадение результатов с результатами, полученными независимыми методами, или, там, где это возможно, представленными независимыми источниками.

Личный вклад А.В. Проскурина состоит в непосредственном участии в постановке задач, некоторые задачи были поставлены им самостоятельно. Автор

лично провел все расчеты и получил все результаты, приведенные в диссертации, непосредственно участвовал в обсуждении и интерпретации результатов, подготовке публикаций, апробации результатов.

В ходе защиты диссертации критических замечаний высказано не было.

На заседании 8 декабря 2023 г. диссертационный совет принял решение за исследования по устойчивости магнитогидродинамических течений в каналах, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение в теории ламинарно-турбулентного перехода в механике сплошных сред, присудить Проскурину А.В. ученую степень доктора физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 10 докторов наук по профилю рассматриваемой диссертации, участвующих в заседании, из 22 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за 17, против 0, недействительных бюллетеней 0.

Врио председателя
диссертационного

Бойко Андрей Владиславович

Ученый секретарь
диссертационного
8 декабря 2023

Гапонов Сергей Александрович