

УТВЕРЖДАЮ
Проректор – начальник
Управления научной политики
МГУ имени М.В. Ломоносова
доктор физико-математических
наук, профессор
А.А. Федянин
«04» октября 2023 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова" о диссертационной работе Некрасова Олега Олеговича «Электротермоконвекция слабопроводящей жидкости в горизонтальном слое при нагреве сверху», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Актуальность темы исследования. Работа О.О. Некрасова посвящена исследованию поведения электротермоконвективных структур в горизонтальном слое при наличии автономной инжекции и нагрева сверху. Интерес этого случая заключается в том, что в состоянии механического равновесия силы Кулона и плавучести противоположно направлены, что является источником колебательного поведения жидкости. Изучены характеристики монотонных и колебательных малых возмущений, а также и переходные и установившиеся конвективные течения. Проанализирована возможность использования модуляции заряда или потенциала на катоде для переключения между различными типами течения, отличающимися интенсивностью и теплотокотом. Работа сочетает применение методов линейной теории и численного эксперимента. Решение рассмотренных в диссертации задач актуально при решении практических задач, требующих эффективного управления течением и тепломассообменом, например, при проектировании высоковольтных устройств, немеханических переключателей или датчиков.

Оценка содержания диссертации. Текст диссертации содержит описание постановок задач, обсуждение используемых методов исследования и полученных результатов, изложен на требуемом научном уровне.

Диссертация состоит из введения, обзора литературы, трех глав с оригинальными результатами исследований автора, заключения, списка литературы.

Во введении, традиционно, обсуждаются актуальность темы работы, сформулированы цели и задачи исследования, сформулированы научная новизна и выносимые на защиту положения, дана общая характеристика работы, ее теоретическая и практическая значимость.

В первой главе отражена история и современное состояние теоретических и экспериментальных исследований, посвященных электроконвекции.

Во второй главе изучено влияние нагрева сверху и модуляции разности потенциалов на границах горизонтального слоя на устойчивость механического равновесия и нелинейные течения заполняющей его вязкой несжимаемой слабопроводящей жидкости. Рассматриваются жидкости, для которых основной механизм возникновения неоднородности заряда – электрокондуктивный. Он связан с зависимостью электропроводности от температуры. В рамках маломодовой модели конвекции исследована устойчивость равновесия жидкости, определена зависимость критического волнового числа и критического значения электрического числа Релея от периода внешнего поля. На основе анализа с помощью метода Флоке показано, что в широком интервале частот неустойчивость связана с квазипериодическими колебаниями. При анализе нелинейной эволюции электрокондуктивных колебаний обнаружены переходы к хаосу через квазипериодичность или путем последовательного удвоения периода. Обнаружены области изменения электрического числа Релея в которых существует гистерезис синхронных интенсивных колебаний и квазипериодических колебаний, периодических режимов, хаосом и отсутствием течения.

В третьей главе диссертации изучена электротермоконвекция в слое при наличии инжекции, интенсивность которой зависит от напряженности электрического поля, и модуляции заряда на катоде. Использовано безындукционное приближение: изменение электрического поля за счет переноса заряда не учитывается. Определены условия возникновения и проанализирована пространственно-временная эволюция амплитудно- и фазовомодулированной волны, в которой изменяются интенсивность конвекции и структура кондуктивных валов. Показано, что на частоте модуляции заряда удвоенной по отношению к собственной частоте колебаний жидкости в постоянном поле формируется режим синхронных колебаний модулированной конвекции.

В четвертой главе изучены режимы электроконвективных течений, формирующиеся в плоском горизонтальном слое при наличии автономной инжекции с катода. Задача решена в полной постановке, в которой электрическое поле в слое связано с перераспределением заряда за счет дрейфа и конвективного переноса. Сначала обсуждаются результаты линейной теории: нейтральные кривые монотонных и колебательных возмущений, а также зависимости частоты нейтральных колебаний, критического волнового и электрического числа Релея от подвижности зарядов, величины инжекции и степени нагрева жидкости. В ходе численного моделирования построена бифуркационная диаграмма решений в постоянном электрическом поле и показано, что в зависимости напряжения на границах слоя, в данной системе существуют низкоинтенсивные волновые режимы течения и высокоинтенсивный стационарный режим. В численном моделировании проанализированы пространственно-временные свойства устойчивых режимов смешанного состояния и бегущих волн и неустойчивых стоячих волн. Обнаружено, что переход от модулированной стоячей или бегущей волны к стационарной конвекции происходит в случае, когда функция тока достигает некоторого критического значения. Далее показано, что модуляция поля в случае, если ее амплитуда превышает критическое значение, приводит к смене типа течения: вместо модулированной бегущей волны устанавливается высокоинтенсивный режим модулированной конвекции.

В заключении сформулированы итоги выполненного исследования, а также представлены рекомендации по дальнейшей разработке темы.

В диссертационной работе получены новые результаты, значимые для развития теории электроконвекции.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Электроконвекция в горизонтальном слое слабопроводящей жидкости, электропроводность которой зависит от температуры, изучена в рамках маломодовой модели. В случае умеренного нагрева сверху и переменного электрического поля определены пороги конвекции и волновые числа критических возмущений, представляющих квазипериодические колебания. В области нелинейной эволюции течений обнаружен гистерезис малоинтенсивных квазипериодических (переходящих в хаотические) колебаний и высокоинтенсивных синхронных.
2. Для горизонтального слоя неоднородно нагретой слабопроводящей жидкости при автономной инжекции заряда с катода решена линейная задача устойчивости и найдены зависимости критического волнового числа, критического электрического числа Релея и частоты нейтральных колебательных возмущений

от величины подвижности зарядов, степени инжекции и интенсивности нагрева сверху.

3. Построены бифуркационные диаграммы решений, характеризующих поведение неоднородно нагретой слабопроводящей жидкости в постоянном электрическом поле. Определены области существования равновесия, различных типов стоячих и бегущих волн, стационарной конвекции. Особо следует выделить новое решение – режим смешанной конвекции, представляющий собой чередование фаз стоячей и бегущей волны.

4. Показано, что при инжекции с катода и воздействии электрического поля на слабопроводящую жидкость на резонансных частотах даже с малой амплитудой может в несколько раз увеличить интенсивность течения через слой, что в свою очередь влияет на теплоток.

Научная и практическая значимость. Анализ конечно-амплитудных электроконвективных колебательных и волновых течений слабопроводящей жидкости дополняет теорию нелинейной эволюции жидкости в модулированных силовых полях, демонстрируя возможность смены типа течения и интенсивности теплопереноса с изменением частоты или амплитуды внешнего воздействия. Знание закономерностей возникновения и эволюции течений неоднородно нагретой слабопроводящей жидкости в электрическом поле может оказаться полезным при проектировании устройств с пассивным охлаждением, а также при решении практических задач, требующих эффективного управления течением и теплопереносом.

Достоверность результатов обеспечивается применением физически обоснованных моделей, продуманными методиками, использованием корректных постановок и методов дискретизации, подтверждается согласием с известными результатами других работ в общих областях изменения параметров. Характеристики возмущений, полученные в ходе рассмотрения в рамках линейной теории, согласуются с данными нелинейных расчетов на основе метода конечных разностей.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались на всероссийских и международных конференциях. В ходе выполнения работы опубликовано шесть статей, в журналах, входящих в перечень ВАК и базы данных Web of Science и Scopus.

По тексту диссертации следует сделать следующие замечания:

1. Во введении дается лишь краткое описание униполярной инжекции заряда с катода. Хотелось бы видеть более подробное описание этого явления с примерами из практических задач.

2. В главе 2, в которой рассматривается задача об электроконвекции при действии электрокондуктивного механизма, на основании анализа Фурье-спектров делается вывод, что неустойчивость состояния равновесия связана с квазипериодическими колебаниями. Подтверждается ли квазипериодичность режима еще каким-либо способом?

3. В главе 2 для изучения нелинейных колебаний физической системы используется маломодовая модель (расширенная модель Лоренца). В настоящее время учёт большего числа членов используемых рядов Фурье не представляет серьёзной проблемы. Использование лишь минимально возможного числа удерживаемых членов оставляет открытым вопрос о сохранении качественного поведения рассматриваемой физической системы при более подробном описании.

4. В главах 3 и 4, в которых рассматривается инжекционный механизм возбуждения конвективного движения, уравнение Пуассона численно решается при помощи итерационного метода последовательной верхней релаксации. В настоящее время существуют более быстрые и точные прямые (безытерационные) методы решения подобных уравнений.

5. В главах 3 и 4 используются периодические граничные условия по горизонтали, возникает параметр периодичности – длина волны конвективной структуры. В диссертации нет обоснования выбора этого параметра.

Необходимо отметить, что сформулированные замечания не изменяют общего благоприятного впечатления о диссертационной работе, а некоторые из них могут быть использованы как пожелания для будущих исследований.

Заключение

Диссертационная работа О.О. Некрасова характеризуется полнотой и завершенностью, ясно и грамотно написана, достаточно подробно иллюстрирована графиками и рисунками. Диссертационное исследование выполнено автором на современном уровне и является завершенной научно-исследовательской работой в области и теоретического исследования электротермоконвективных течений, возникающих в горизонтальном слое. Представленные в диссертации результаты достоверны, выводы обоснованы. Применяемые в работе подходы могут быть использованы при изучении актуальных задач конвекции и теплопереноса.

Диссертационная работа содержит достаточное количество графического материала, представляющего результаты теоретических исследований и численного моделирования. После каждой главы имеются выводы, а целом по работе сформулированы ее основные итоги.

Содержание диссертации достаточно полно и правильно отражено в автореферате.

Таким образом, представленная диссертация «**Электротермоконвекция слабопроводящей жидкости в горизонтальном слое при нагреве сверху**» удовлетворяет всем требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденных постановлением Правительства РФ N 842 от 24.09.2013 предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор – Некрасов Олег Олегович – заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Отзыв составлен заведующим лабораторией общей аэродинамики Научно-исследовательского института механики Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова доктором физико-математических наук Никитиным Николаем Васильевичем. Отзыв обсужден и утвержден на научном семинаре «Неустойчивость и турбулентность» в НИИ механики МГУ 19.09.2023 г. Протокол № 12.

И.о. директора НИИ механики МГУ,
профессор РАН, доктор физико-математических наук



Дмитрий Владимирович Георгиевский

Заведующий лабораторией общей аэродинамики
НИИ механики МГУ,
доктор физико-математических наук

Николай Васильевич Никитин

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (Научно-исследовательский институт механики Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова).

Адрес: 119192 Москва, Мичуринский проспект, д. 1

Телефон: (495) 939-31-21

E-mail: common@imec.msu.ru

Подписи Д.В. Георгиевского и Н.В. Никитина заверяю
Ученый секретарь НИИ механики МГУ М.Ю. Рязанцева