

ОТЗЫВ

официального оппонента Кривилева Михаила Дмитриевича на диссертацию Некрасова Олега Олеговича «Электротермоконвекция слабопроводящей жидкости в горизонтальном слое при нагреве сверху», представленную к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 — Механика жидкости, газа и плазмы

Диссертационная работа О.О. Некрасова посвящена теоретическому исследованию и численному моделированию процессов возникновения и эволюции течений, возникающих в горизонтальном слое слабопроводящей жидкости под действием нагрева сверху и постоянного (или переменного) электрического поля. В работе исследована линейная устойчивость и нелинейная электротермоконвекция слабопроводящей жидкости для двух различных случаев возникновения свободного заряда: 1) заряд накапливается в жидкости за счет зависимости электропроводности жидкости от температуры (электрокондуктивный механизм); 2) заряд инжектируется в диэлектрическую жидкость с катода (инжекционный механизм). Общим элементом в этих двух случаях является наличие колебательных течений, которыми можно эффективно управлять и, следовательно, влиять на теплоперенос внутри горизонтального слоя, изменяя амплитуду и период (частоту) внешнего электрического поля.

Актуальность темы исследований диссертанта обусловлена необходимостью расширения фундаментальных знаний о характере электроконвективных течений слабопроводящей жидкости в условиях совместного действия электрического, теплового и гравитационного полей. Возможность эффективного управления теплопереносом в слое слабопроводящей жидкости при помощи внешнего электрического поля может найти свое применение в высоковольтных устройствах, немеханических переключателях и датчиках, а в

перспективе существенно ускорить создание новой базы для автоматизированных систем управления и контроля на основе использования слабопроводящих жидкостей. Важно отметить, что разработка приборов на новых технических принципах требует предварительной проработки физических аспектов. В этом ключе подготовленная диссертационная работа О.О. Некрасова является несомненно актуальной и расширяет спектр решенных задач в области гидродинамики слабопроводящих жидкостей.

Высокая степень **обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, достоверности результатов** обусловлены использованием моделей, корректно описывающих гидродинамические и электрические процессы в слабопроводящих жидкостях; апробированных методик расчета для определения характеристик линейной устойчивости, анализа динамических систем и нелинейной эволюции течений; высокой степенью согласованности полученных разными способами результатов, а также соответствием между результатами диссертационной работы и ранее известными данными в случае изотермической электроконвекции.

В диссертации содержится целый ряд **новых результатов**, среди которых следует особенно отметить:

1. Обнаружен новый тип эволюции маломодовой системы, характеризующей электроконвекцию слабопроводящей жидкости при наличии электрокондуктивного механизма: изменение электроконвективного параметра приводит к гистерезису среднего теплотока через слой, причем на верхней (высокоинтенсивной) ветви гистерезисной петли наблюдается *синхронный* режим колебаний, а на нижней (с малым теплотоком) – друг друга сменяют колебательные течения: *квазипериодические, хаотические и субгармонические*.

2. При совпадении частот модуляции инжектируемого заряда и собственной частоты бегущей волны обнаружен режим амплитудно- и фазовомодулированной волны, характеризующийся периодическим изменением интенсивности конвекции и скорости бегущей волны, а также вида конвективной структуры.

3. Впервые проведен линейный анализ устойчивости нагреваемого сверху слоя диэлектрической жидкости в случае автономной униполярной инжекции заряда с катода. Определены зависимости критических волновых чисел и электрических чисел Релея возникновения конвекции от интенсивности инжекции, подвижности заряда и интенсивности нагрева. Показано, что рост интенсивности инжекции и подвижности заряда приводит к понижению частоты нейтральных колебаний.

4. Построены бифуркационные диаграммы электротермоконвективных течений в случае автономной инжекции и постоянного электрического поля. Вместо часто используемого безиндукционного приближения применен подход, в котором электрическое поле в конденсаторе зависело от перераспределения зарядов внутри жидкости (так называемая, полная постановка). Это позволило рассмотреть случай умеренной инжекции, вплоть до $S=1$. Бифуркационные диаграммы демонстрируют разнообразные типы конвективных течений жидкости, среди которых следует отметить устойчивый смешанный режим бегущих волн, сочетающий в себе черты бегущей и стоячей волны. Данный результат чрезвычайно интересен.

5. Обнаружено, что воздействие на систему переменного электрического поля на резонансных частотах даже при крайне малых амплитудах модуляции вызывает переход к режиму течения, обладающим в несколько раз большей интенсивностью теплопереноса.

Научное значение работы заключается в анализе электротермоконвективных течений и обнаружении ряда новых сценариев их нелинейной эволюции, что дополняет теорию нелинейных колебательных и волновых течений жидкости, находящейся в постоянном или модулированном внешнем поле.

Практическое значение диссертационной работы состоит в том, что результаты линейной теории и численного моделирования нелинейных течений могут быть использованы для планирования лабораторных экспериментов, а также при разработке систем эффективного управления и контроля теплопереноса в слабопроводящих жидкостях с помощью электрических полей.

Оценка диссертации. В целом текст диссертации написан в ясном, грамотном языке; аккуратно оформлен и иллюстрирован графиками. По содержанию диссертации можно сделать следующие замечания:

- 1) Работа посвящена изучению конвекции в слабопроводящих жидкостях, при этом не дано определение слабой проводимости. При постановке задачи следовало привести количественные критерии для данного термина, поскольку они определяют границы применимости моделей.
- 2) При использовании спектральных методов с разложением решения по базису периодических функций обычно требуется дополнительный анализ чувствительности решения к количеству функции в выбранном базисе. В работе есть ссылка на предыдущие исследования для маломодовой модели, но отсутствуют данные, как увеличение числа мод влияет на решение.
- 3) При решении задач переноса для бесконечного слоя в расчетной вычислительной области зачастую происходит искусственное ограничение получаемых решений за счет влияния вертикальных границ. В работе не приведены данные об анализе чувствительности результатов к протяженности расчетной области в горизонтальном направлении.
- 4) В работе отмечено, что воздействие на систему переменного электрического поля на резонансных частотах вызывает интенсификацию теплопереноса. Из текста диссертации неясно, какова физическая природа этого явления.

Следует отметить, что приведенные выше замечания не меняют общего положительного впечатления от диссертационной работы.

Заключение по диссертации.

Проведенный выше анализ позволяет утверждать, что рассматриваемая диссертация представляет собой законченную научно-исследовательскую работу, выполненную соискателем самостоятельно и на достаточно высоком научном уровне. Ее основное содержание отражено в периодической печати (шесть статей принадлежат изданиям, индексируемым в системе Scopus), докладывалось на Всероссийских и международных конференциях. Автореферат диссертации полно и правильно отражает ее содержание.

Отмеченные недочеты не снижают научной значимости представленной диссертационной работы и высокого квалификационного уровня диссертанта. В целом, диссертация является законченной научно-квалификационной работой. В диссертации приведены результаты, позволяющие квалифицировать их как решение актуальной научной задачи в области моделирования гидродинамических процессов в слабопроводящих средах. Текст автореферата и диссертации, а также выполненные публикации полностью отражают суть работы. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы. Диссертация отвечает всем требованиям «Положения о порядке присуждения учёных степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 г., а ее автор Некрасов Олег Олегович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Официальный оппонент,

доктор физико-математических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, доцент, заведующий учебно-научной лабораторией «Физика конденсированных сред», ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет», 426034,

г. Ижевск, ул. Университетская, 1, тел. раб. 8 (3412) 916-230, эл. почта mk@udsu.ru

12.10.2023 г.

Кривилев Михаил Дмитриевич

Я, Кривилев Михаил Дмитриевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Некрасова Олега Олеговича, и их дальнейшую обработку.

12.10.2023 г.

М.Д. Кривилев

Подпись официального оппонента заверяю.

Учёный секретарь
Учёного совета ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет»

