

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента члена-корреспондента РАН Марковича Д.М.  
на диссертацию Евграфовой Анны Валерьевны  
«Крупномасштабные течения и вихревые структуры в неоднородно  
нагретых слоях жидкости»,  
представленную на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук по специальности  
01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы»

Диссертационная работа Евграфовой А.В. посвящена экспериментальному и численному исследованию конвективного течения в неоднородно нагреваемом цилиндрическом слое жидкости, в том числе при наличии вращения.

**Актуальность темы.** Для изучения сложных геофизических процессов и технических систем, в которых существенную роль играет динамика крупномасштабных вихревых структур, возникающих и эволюционирующих в неоднородно нагреваемых слоях жидкости, необходимо получение понятных причинно-следственных связей в контролируемых условиях. Лабораторный эксперимент в канонической постановке, с минимумом определяющих параметров, совместно с параллельным верифицированным математическим моделированием, позволяющим в ряде случаев существенно уменьшить трудоемкость исследования, являются наиболее приемлемыми инструментами для предсказательного исследования природных процессов и оптимизационного проектирования технологических установок. Важный вопрос о влиянии спиральности на гидродинамику системы, крупномасштабные конвективные структуры, является слабо изученным и количество работ, посвященных его исследованию, в мировой литературе весьма ограничено. В данном контексте цели и задачи настоящей диссертационной работы представляются весьма актуальными.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка цитируемой литературы (161 источник). Общий объем диссертации 128 страниц, включая 52 рисунка и 7 таблиц.

**Цель диссертации** – экспериментальное и численное исследование термогравитационной конвекции с генерируемыми вихревыми структурами в цилиндрическом слое жидкости при неоднородном нагреве.

Для достижения поставленной цели в диссертации решены следующие задачи:

1. Исследовано возникновение вторичных течений в пограничном слое над локализованным источником тепла.
2. Изучена гидродинамика крупномасштабного конвективного вихря во вращающемся цилиндрическим слое жидкости с локальным источником нагрева. Определено влияние основных определяющих параметров на его структуру.
3. Построены математические модели исследуемых процессов, проведена их верификация, на основе проведенных численных экспериментов предложена физическая интерпретация механизмов возникновения вторичных вихревых структур.
4. Проведен анализ распределений завихренности и спиральности в гидродинамической системе с развитыми конвективными вторичными течениями.

**Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций** обусловлена:

- Использованием надежных, зарекомендовавших себя экспериментальных методов с тестированием подходов и алгоритмов;
- Параллельным проведением эксперимента и математического моделирования, верификацией расчетов экспериментом;
- Публикацией основных результатов работы в центральных российских и международных изданиях;

**Научная новизна** работы определяется следующим:

1. На основе проведенных экспериментальных и численных исследований с применением современных методов измерения скорости и классических методов измерения температуры, а также разработанных верифицированных математических моделей, реализованных в двух программных расчетных пакетах, изучена структура конвективного течения в

неоднородно нагреваемом цилиндрическом слое жидкости, в том числе при наличии вращения.

2. Впервые изучена структура конвективного вихря, генерируемого во вращающейся конвективной системе, представляющей собой цилиндрический слой жидкости с неоднородным нагревом. Определен диапазон параметров, в котором происходит формирование устойчивого локализованного вихря.

3. На основе выполненного анализа распределений завихренности и спиральности в гидродинамической системе с развитыми вторичными течениями выполнена оценка величины спиральности по сравнению со среднеквадратичными отклонениями для неподвижного слоя, а также оценен вклад спиральных мод в общий баланс энергии для вращающегося слоя.

**Научная и практическая значимость работы** определяется востребованностью полученных результатов по динамике вторичных конвективных течений в геофизических и технических приложениях: для оптимизации существующих и разработки новых моделей прогноза погоды на основе углубленного анализа закономерностей течения в атмосферном пограничном слое, анализа амплитудно-частотных характеристик вторичных течений при проектировании технологических устройств. Результаты детальных экспериментальных исследований представляют собой подробную базу для верификации разрабатываемых CFD кодов. Проведенный анализ спиральности для исследуемой системы имеет исключительную важность для теории турбулентности и вихревых течений.

### **Апробация результатов.**

Основные результаты диссертационной работы опубликованы автором в 35 трудах, из них 3 статьи в рецензируемых журналах, рекомендуемых ВАК РФ, 4 статьи в журналах РИНЦ, 5 статей в трудах международных и российских конференций и 23 тезиса докладов на конференциях. Опубликованные работы в полной мере отражают основное содержание диссертации.

### **Структура работы.**

Во Введении обоснована актуальность темы диссертации, изложены цели работы, описана научная новизна, научно-практическая ценность

работы, кратко приведена информация о методологии и методах исследования, изложены основные положения, выносимые на защиту, приведена информация о публикациях и аprobации работы, а также о личном вкладе соискателя.

В первой главе приведен обзор литературы по теме диссертации. Проанализированы работы по конвективным течениям в неоднородно нагретых слоях жидкости, по развитию неустойчивостей в геофизических системах, по роли спиральности в генерации вихревых течений.

Вторая глава посвящена исследованию конвективных структур в адвективном потоке над локализованным источником тепла. Описана экспериментальная установка, методы измерений, основные безразмерные критерии и управляющие параметры. Приведено описание математической модели. Содержательной частью второй главы являются результаты экспериментального и численного исследования течений в цилиндрическом слое с локализованным источником тепла. Показано, что в данной системе возникают структуры, форма и интенсивность которых зависит от мощности нагрева. Предложена феноменологическая интерпретация механизма возникновения данных структур.

В третьей главе приведены результаты изучения структуры конвективного вихря во вращающемся слое жидкости. Приведено описание экспериментального стенда с модифицированной системой подвода лазерного ножа, дополнительные определяющие критерии для систем с вращением, описана математическая модель. В результате комплексного исследования автором показано влияние интенсивности нагрева, скорости вращения, а также физических свойств жидкости на возникновение конвективного вихря, его интенсивность, установлен диапазон параметров, в котором существует устойчивый конвективный вихрь спиральной структуры.

Четвертая глава посвящена анализу распределения спиральности в течении, в котором помимо основного течения существуют развитые вторичные структуры. Проведена оценка уровня пульсаций спиральности по сравнению со средними значениями. Для случая вращающегося слоя показано, что большой вклад в интегральную спиральность вносит азимутальная компонента. Оценена доля энергии, приходящаяся на спиральные моды.

## **Замечания по диссертации и автореферату.**

1. Литературный обзор является не вполне исчерпывающим, хотя и достаточным по объему для кандидатской диссертации. В частности, некоторые утверждения по тексту вызывают вопросы. Так, на странице 25 выражение «... Однако проведенные до настоящего времени численные эксперименты не дают оснований для поддержки идеи обратного каскада энергии» представляется не вполне обоснованным. Можно привести ряд ссылок, где наличие обратного каскада подтверждено численным моделированием. G. Boffetta, A. Celani, and M. Vergassola, Phys. Rev. E 61, R29 2000, B.V. Il'yushin and D. V. Krasinsky, Phys. Rev. E 81, 2010, а также ряд других работ.
2. При постановке задачи автором утверждается, что использование силиконовых масел в качестве рабочих жидкостей позволяет минимизировать эффекты термокапиллярной конвекции. При этом было бы более корректно в квалификационной диссертационной работе провести количественные оценки влияния эффекта Марангони, на основе сопоставления соответствующего безразмерного критерия с критерием Рэлея. Кроме того, было бы более правильным привести в диссертации свойства используемых жидкостей (дана только ссылка на справочную литературу).
3. В диссертации автор использует два пакета для математического моделирования – ANSYS FLUENT для системы без вращения и FLOW VISION для системы с вращением. Чем обусловлен такой выбор? В чем преимущества каждого пакета для выбранной задачи? Не было бы более корректным использовать один и тот же пакет для минимизации эффектов алгоритмической реализации?
4. На стр. 79, Рис. 3.12. видно, что сгущение сетки значительно влияет на результат расчета и наиболее близкие к эксперименту результаты получены при наибольшем разрешении ( $h=0,5$  мм). Представляется, что было бы рациональным проанализировать указанную тенденцию при еще большем сгущении расчетной сетки. В идеале, приемлемым считалось бы разрешение, при котором дальнейшее сгущение не влияет на результаты расчетов.
5. В математической постановке задачи тепловым граничным условием является равенство теплового потока (мощности) на нагревателе и свободной поверхности жидкости и адиабатические условия на других границах. При этом тепловой поток оценивался на основе данных по мощности, подводимой к нагревателю. Для более корректного сопоставления с экспериментом было бы правильным учесть поправку на потери мощности за

счет теплопроводности с нижней стороны нагревателя и по его периметру, либо, на основе оценок показать, что эти потери пренебрежимо малы. Кроме того, формула (2.7) записана некорректно – она показывает равенство плотности теплого потока на нагревателе и свободной поверхности, что не так. Правильнее записать  $P(\text{surf}) = P(\text{heat})$ .

6. Одним из выводов по второй главе является факт, что частота возникновения поперечных валов растет с увеличением потокового числа Рэлея. Не было ли предпринято попыток обобщения полученных результатов в безразмерной критериальной форме, в частности, на основе характерного числа Струхала?

7. Из методических замечаний по эксперименту хотелось бы отметить следующее. Для стратифицированных течений соотношение плотности несущей среды и трассерных частиц в разных областях потока является различным. В условиях низких скоростей потока эффекты, связанные с разностью плотностей, становятся существенными. Стратификация по плотности среды неизбежно приводит к стратификации по концентрации трассеров (за счет всплытия/опускания), особенно при существенной дисперсии по их размерам, что не может не влиять на соотношение сигнал/шум, и, соответственно, погрешность измерений. В диссертации этот вопрос не обсуждается.

8. **Технические замечания – опечатки.** Стр. 65 – ссылка на таблицу 4.1. Правильно – на таблицу 3.1. На стр. 72 предложен безразмерный комплекс для обобщения влияния всех определяющих параметров в задачах с вращением – квадратный корень из произведения чисел Грасгофа и Экмана (ссылка на формулу 3.4, правильно – 3.3). В формуле 3.3 этот параметр представлен как корень из отношения чисел Грасгофа и Экмана. Стр. 78, подпись к рис. 3.11 – опечатка в обозначении графиков (а,б – Flow Vision, в,г – эксперимент). Стр. 79 – «Изучению формы вторичных течений... в неподвижном цилиндрическом слое... посвящена глава 1». Правильно: «...посвящена глава 2).» Нумерация глав в автореферате отличается от нумерации глав в диссертации. Небольшое количество других несущественных опечаток перечислять не будем.

Указанные замечания ни в коей мере не снижают высокую научную ценность данной диссертационной работы и не влияют на ее общую положительную оценку.

## **Заключение.**

Диссертация Евграфовой А.В. является законченной научно-исследовательской работой, выполненной на высоком научном уровне. Решены актуальные задачи по экспериментальному исследованию и численному моделированию течений в неоднородно нагретых слоях жидкости. Полученные результаты имеют как фундаментальное значение, так и существенную практическую значимость. Результаты исследований имеют высокую степень научной новизны и достоверности. Выводы работы обоснованы. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

По объему, качеству и новизне представленная диссертационная работа полностью удовлетворяет критериям Положения ВАК РФ «О присуждении ученых степеней», а ее автор, Евграфова Анна Валерьевна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы».

Заместитель директора по научной работе  
ФГБУН «Институт теплофизики им. С.С.  
Кутателадзе» СО РАН, доктор физико-  
математических наук, профессор, член-  
корреспондент РАН

 Маркович Дмитрий Маркович

21 октября 2016 г.

630090, г. Новосибирск,  
ул. Академика Лаврентьева, д. 1.  
Тел.: + 7 (383) 330-90-40  
Email: [dmark@itp.nsc.ru](mailto:dmark@itp.nsc.ru)

