

На правах рукописи

Евграфова Анна Валерьевна

**Крупномасштабные течения и вихревые структуры в неоднородно  
нагретых слоях жидкости**

01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Пермь – 2016

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Конвективные течения, возникающие в слоях жидкости над неоднородно нагретой поверхностью, существуют во многих природных и технологических системах. При этом течения могут состоять из структур различной интенсивности и масштабов, которые в равной степени могут влиять на происходящие в системе процессы. Изучение механизмов зарождения, эволюции и устойчивости крупномасштабных вихревых потоков особенно актуально в контексте проблемы описания и предсказания возникновения и характера эволюции циклонов и антициклонов в атмосфере Земли. Обладая колоссальными запасами энергии, эти вихревые структуры играют первостепенную роль в формировании погодных условий на больших территориях и способны вызвать не только сильные ливни, но и большие волны на поверхности моря, штормовые приливы и смерчи. Большой интерес представляют и вторичные движения, развивающиеся на фоне крупномасштабных течений. Являясь неотъемлемой частью не только многих геофизических процессов, но и ряда технологических приложений, вторичные структуры существенно влияют на процессы массопереноса и определяют интенсивность теплообмена.

Сложность изучения природных конвективных систем определяется наличием многочисленных усложняющих факторов (реагирующие компоненты, фазовые переходы, сложная геометрия и топография подстилающей поверхности). Поэтому изучение процессов вихреобразования в таких системах идет по пути построения простых математических и физических моделей, растет значимость лабораторного эксперимента. Преимуществом лабораторных экспериментов является возможность исследовать реальную физическую систему с небольшим числом управляющих параметров. Это позволяет изучить роль самых значимых из них в процессах возбуждения и эволюции вихревых структур и многократно воспроизводить течения в контролируемых условиях. Так в серии работ Г.П.Богатырева был получен лабораторный аналог тропического циклона во вращающемся слое с локально нагретой подложкой. Дальнейшие исследования течений в покоящихся и вращающихся слоях жидкости при наличии на дне локализованного источника тепла позволили выявить сложную структуру вторичных течений, возникающих над областью нагрева, и изучить механизмы формирования дифференциального вращения. Однако детальное исследование конвективных течений в неоднородно нагретых слоях жидкости проведено не было, несмотря на то, что это может дать ключ к решению многих геофизических задач.

Одним из активно обсуждаемых факторов, влияющих на генерацию крупномасштабных возмущений в атмосфере и океане, полагается наличие в системе ненулевой спиральности. Спиральность, наряду с энергией, является интегралом движения в невязкой жидкости и определяется как скалярное произведение векторов скорости и завихренности. Вопрос о влиянии спиральности на происходящие в гидродинамических системах процессы

остаётся открытым. Работ, посвященных анализу распределений спиральности в реальных физических системах немного. Поэтому анализ распределения спиральности в такой системе, где наряду с основным движением существует развитая мелкомасштабная конвекция, представляет большой интерес.

Целью работы является экспериментальное и численное исследование вихревых течений в цилиндрическом слое жидкости при наличии неоднородного нагрева. В рамках поставленной цели были поставлены следующие задачи:

- детально исследовать возникновение вторичных течений в пограничном слое над локализованным источником тепла;
- определить характер влияния управляющих параметров на структуру конвективного вихря во вращающемся цилиндрическом слое жидкости при наличии локализованного нагрева;
- построить и верифицировать посредством эксперимента математические модели, и на основе численных расчетов предложить физическую интерпретацию механизмов возникновения вторичных структур и провести анализ распределений спиральности

#### Научная новизна

1. Проведено комплексное исследование течений, возникающих в неоднородно нагретом цилиндрическом слое жидкости. Построены и верифицированы посредством эксперимента трехмерные модели в двух CFD-пакетах.

На основе полученных экспериментальных и численных данных:

2. Исследованы структура и динамика вторичных течений над локализованным источником тепла в широком диапазоне управляющих параметров.
3. Впервые проведено детальное исследование структуры конвективного вихря, возникающего во вращающемся цилиндрическом слое жидкости при наличии неоднородного нагрева. Показано, что формирование устойчивого локализованного вихря происходит в узком интервале управляющих параметров.
4. Выполнен анализ распределений спиральности в гидродинамической системе, в которой помимо основного крупномасштабного потока существуют развитые вторичные течения.

Различные фрагменты работы выполнялись в рамках проекта РФФИ – Урал № 14-01-96011, проекта РФФИ № 16-31-00150.

#### Научное и практическое значение работы.

1. Результаты исследования вторичных течений могут быть использованы для параметризации процессов, протекающих в атмосферном пограничном слое в существующих моделях прогнозирования погоды.

2. Полученные зависимости частоты возникновения вторичных течений от параметров задачи могут быть полезны при проектировании технологических устройств, в которых имеются течения над локализованным источником тепла.
3. Результаты, полученные в ходе анализа распределений спиральности, важны для понимания статистических свойств спиральной турбулентности и экспериментальной реализации течений с ненулевой спиральностью.
4. Зависимость структуры конвективного вихря от степени нагрева, вязкости и скорости вращения представляют интерес для исследований процессов возникновения крупномасштабных вихрей в атмосфере и океане.
5. Полученные экспериментальные данные могут быть использованы для верификации и усовершенствования различных CFD кодов.

### Методология и методы исследования

Количественные измерения температуры в рамках экспериментального исследования проводились при помощи медь-константановых термопар. Данные с термопар передавались на систему сбора данных Agilent. Контроль за частотой измерений и временем приема данных реализован програ обеспечением Agilent BenchLink Data Logger 3. Экспериментальные исследования пространственного распределения скорости проводились с помощью измерительного комплекса ПОЛИС (Институт Теплофизики СО РАН), принцип работы которого основан на методах цифровой трассерной визуализации.

Численное моделирование было реализовано в программных пакетах Fluent и FlowVision.

### Основные положения, выносимые на защиту:

1. Результаты экспериментального исследования естественной конвекции в неподвижном и вращающемся цилиндрическом слое жидкости при наличии локализованного нагрева, включая:
  - обнаружение режимов с различной ориентацией вторичных конвективных валов
  - зависимость периода образования вторичных течений и их пространственной неоднородности от управляющих параметров (или прямо от числа Рэлея)
  - зависимость структуры и характеристик локализованного конвективного вихря от скорости вращения, интенсивности нагрева и вязкости жидкости
  - существование ограниченной области управляющих параметров, где возникает устойчивый конвективный вихрь
2. Результаты верификации трехмерных моделей течения в двух CFD-пакетах, выполненной на основе полученных экспериментальных данных.

3. Результаты численного моделирования течений в неподвижном и вращающемся неоднородно нагретом цилиндрическом слое жидкости, включая:

- особенности структуры вторичных течений и их формирования
- распределение спиральности, как в неподвижном, так и во вращающемся слое жидкости

Обоснованность и достоверность результатов обеспечивается тестированием методов измерений и используемых алгоритмов. Совместным использованием экспериментальных методов и численного моделирования. Сравнением полученных данных, где это возможно, с результатами других авторов.

Апробация работы Основные результаты работы докладывались и обсуждались на научных конференциях: Всероссийская школа-конференция молодых ученых и студентов «Математическое моделирование в естественных науках» (Пермь, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015); Всероссийская конференция молодых ученых «Неравновесные процессы в сплошных средах» (Пермь, 2010, 2012); Всероссийская научно-практическая конференция "Актуальные проблемы механики, математики и информатики" (Пермь, 2010); Международная научно-практическая конференция "39 Неделя Науки СПбГПУ" (Санкт-Петербург, 2010); Всероссийская научная школа молодых ученых «Волны и вихри в сложных средах» (Москва, 2012); Международная конференция «Потоки и структуры в жидкостях» (Санкт-Петербург, 2013, Калининград, 2015); Зимняя школа по механике сплошных сред (Пермь, 2013, 2015); Международный конгресс по теоретической и прикладной механике (Пекин, Китай, 2012); Генеральная ассамблея Европейского общества геофизических наук (Вена, Австрия, 2013, 2014); Международная конференция European Turbulence Conference (Лион, Франция, 2013); Международная конференция «Пермские гидродинамические научные чтения» (Пермь, 2013, 2014, 2015); Международный симпозиум Bifurcations And Instabilities In Fluid Dynamics (Хайфа, Израиль, 2013); Международный форум «Инженерные системы» (Москва, 2015); Международная Научно-Техническая Конференция «Оптические методы исследования потоков» (Москва, 2015), Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Казань, 2015); Международная конференция «Актуальные проблемы механики» (Санкт-Петербург, 2016 г); Неделя динамики жидкости в Варшаве (Польша, Варшава, 2016);

Публикации. По теме диссертации опубликовано 35 работ. Из них 3 статьи в журналах из списка ВАК, 4 статьи в журналах РИНЦ, 5 статей в трудах международных и российских конференций, 23 тезиса докладов конференций.

Личный вклад автора. Автором диссертации выполнена экспериментальная часть работы по изучению вторичных течений в неподвижном слое жидкости, проведен анализ и обработка экспериментальных данных. По исследованию возникновения конвективного вихря во вращающемся слое жидкости автор принимал участие в модернизации установки и обработке всех полученных данных. Для численной реализации автором подготовлены расчетные модели в двух коммерческих пакетах. Проведены расчеты и верификация результатов расчета с экспериментом.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы, содержащего 161 наименование. Полный объем диссертации 128 страниц, 52 рисунка и 7 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В обзоре литературы освещено современное состояние исследований, близких к теме диссертации. Обоснована актуальность исследуемых в диссертации проблем, сформулированы цели и задачи диссертационной работы.

### Глава 1 Вторичные конвективные структуры в адвективном потоке над локализованным источником тепла

Экспериментальная установка представляла собой цилиндрическую полость радиусом 15 см. Подогрев жидкости осуществлялся при помощи медного теплообменника, радиусом 5.2 см, расположенным в центре кюветы заподлицо с ее дном. Питание нагревателя происходило через источник постоянного тока. В качестве рабочей жидкости были использованы силиконовые масла с вязкостью при 25<sup>0</sup>С 5, 10 и 20 сСт (число Прандтля  $Pr = 66, 110$  и  $209$  соответственно). Поверхность жидкости всегда была свободной, температура в комнате поддерживалась постоянной в ходе всех экспериментов с точностью 0.5 К. Высота слоя жидкости в экспериментах не менялась и составляла 3см. Температура масла в кювете измерялась при помощи медь-константановых термопар с диаметром спая не более 0.2 мм и диаметром проводов 0.1 мм. Для измерения двух (горизонтальных) компонент скорости использовалась измерительная система PIV «Полис». Схематично вид установки, а также расположение системы координат представлены на рис. 1.

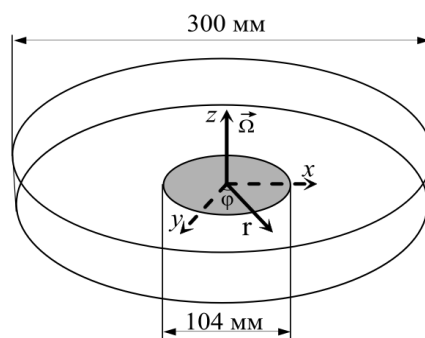


Рис. 1 Схематичный вид экспериментальной установки и расположение системы координат

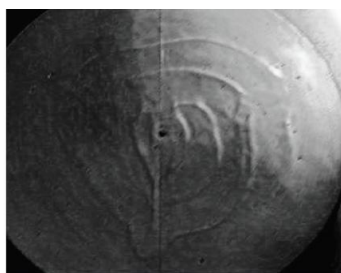
В качестве безразмерных параметров были использованы число Прандтля  $Pr$ , потоковое число Грасгофа  $Gr_f$  и потоковое число Рэлея  $Ra_f$ :

$$Pr = \frac{\nu}{\chi}; \quad Gr_f = \frac{g \beta h^4 P}{C \rho \nu^2 \chi S}; \quad Ra_f = Gr_f \cdot Pr,$$

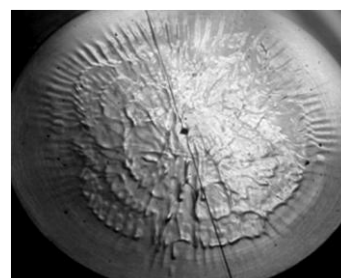
где  $\nu$  – кинематическая вязкость,  $\chi$  – коэффициент температуропроводности,  $g$  – модуль вектора гравитационного ускорения,  $\beta$  – коэффициент теплового расширения,  $h$  – высота слоя жидкости,  $P$  – мощность нагрева,  $C$  – удельная теплоемкость,  $\rho$  – плотность,  $S$  – площадь нагревателя.

Подогрев в центральной области приводит к появлению интенсивного подъемного течения в области нагревателя. Нагретая жидкость, охлаждаясь на свободной поверхности, продолжает свое движения по направлению к периферии, где она опускается вдоль боковых стенок. Спустя некоторое время формируется адвективная ячейка, размер которой совпадает с горизонтальным размером кюветы.

В области подогрева вблизи дна кюветы устанавливается пограничный слой с неустойчивой стратификацией температуры. В этом пограничном слое возникают вторичные структуры в виде конвективных валов различной ориентации. На рис. 2 представлена визуализация вторичных течений непосредственно над нагреваемой областью. При малых нагревах формируется конвективный вал в виде деформированного кольца, который сносится конвергентным течением к центру кюветы. Увеличение нагрева приводит к образованию более сложной структуры, которая представляет собой суперпозицию валов, ориентированных в радиальном направлении и поперечного вала,двигающегося к центру нагревателя.



а



б

Рис. 2. а – теневые картины течения над областью нагрева  $Gr_f = 3.2 \cdot 10^4$ , б - мгновенное поле радиальной скорости  $z=3$  мм  $Gr_f = 1.7 \cdot 10^5$

Движение поперечного вала носит периодический характер. Зависимость частоты возникновения вторичных структур от числа Грасгофа представлена на рис. 3 а. Частота возрастает с увеличением числа Грасгофа, то есть с увеличением нагрева. При фиксированном числе Грасгофа частота растет с увеличением числа Прандтля. Это говорит о том, что число Грасгофа в полной мере не описывает процесс формирования погранслойной конвекции. На рис. 3 б представлена зависимость частоты от потокового числа Рэлея. Разброс точек, соответствующих различным жидкостям, заметно уменьшился.

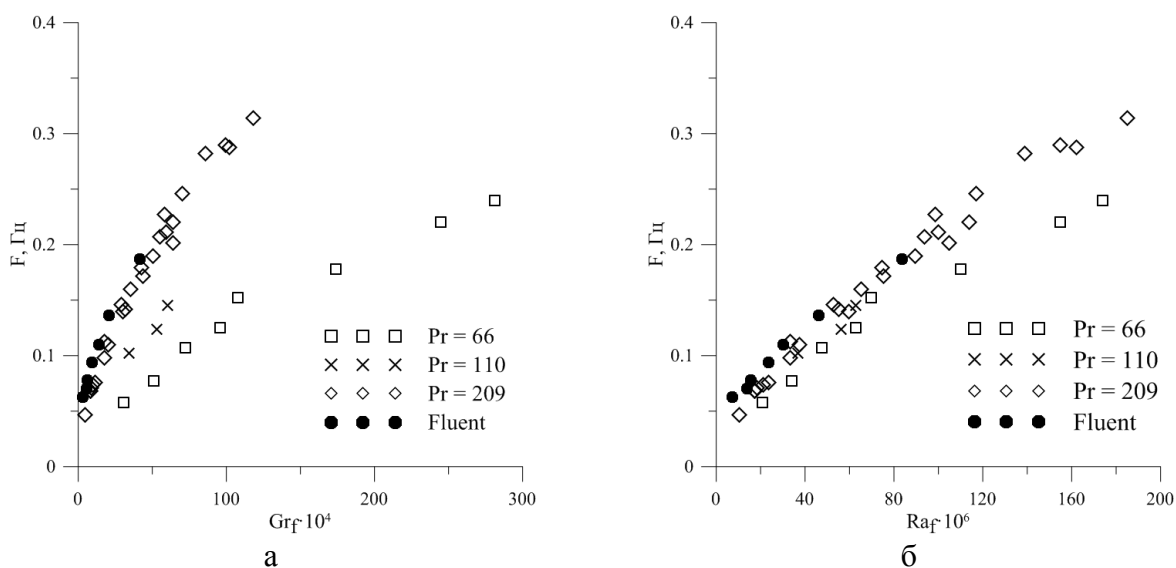


Рис. 3 Зависимости частоты возникновения вторичных структур от потокового числа Грасгофа  $Gr_f$ (а) и Рэлея  $Ra_f$ (б).

Для проведения расчетов использовался коммерческий программный продукт Fluent 6.3. Геометрические размеры расчетной области и значения управляющих параметров выбирались в соответствии с экспериментальными режимами.

На рис. 4 представлены мгновенные поля радиальной скорости и соответствующие им поля температуры для различных значений числа  $Gr_f$ , полученные численно. На малых нагревах волна имеет форму деформированного кольца, что подтверждает экспериментальные наблюдения. Рост нагрева приводит к смене формы вторичных течений. На полях радиальной скорости структура является однородной, тогда как на температурных полях присутствует азимутальная модуляция.



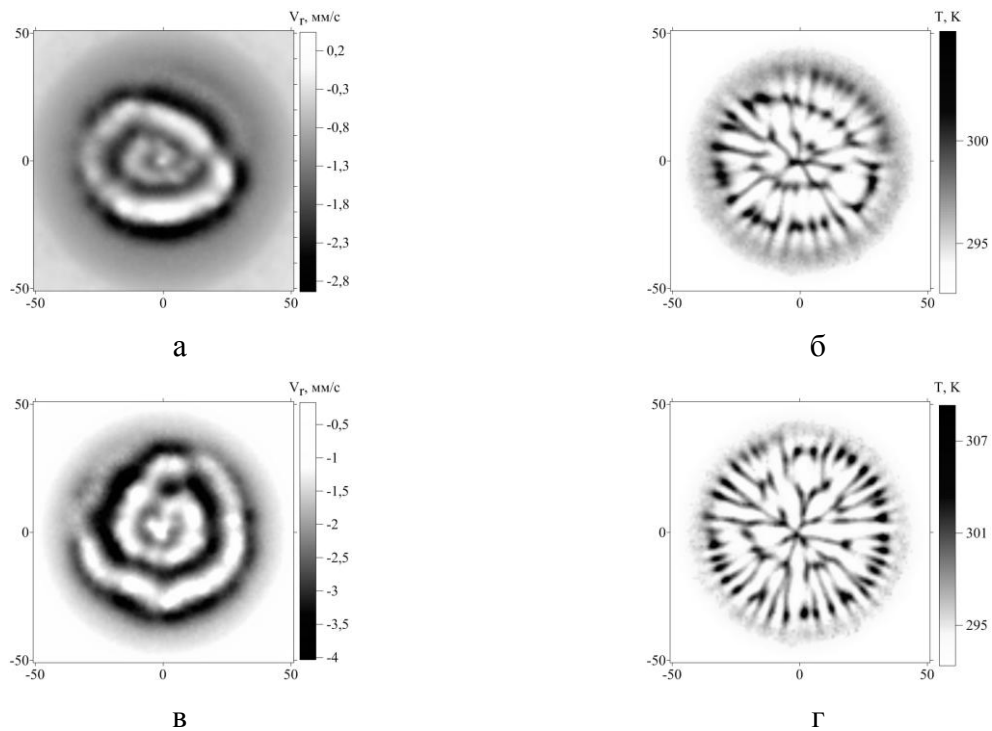


Рис. 4 Поля радиальной скорости (а,в) и температуры(б, г) над нагревателем  $h=3$  мм: а,б -  $Gr_f = 1.4 \cdot 10^5$ , в, г -  $Gr_f = 4.3 \cdot 10^5$

Вращаясь в противоположные стороны, радиальные валы прогревают жидкость, находящуюся между ними. Некоторая часть этой жидкости начинает всплывать. В результате образуется система всплывающих плюмов. Всплывающие плюмы становятся причиной возникновения пары конвективных валов, которые периодически сносятся конвергентным потоком к центру кюветы.

#### Глава 2 Структура конвективного вихря во вращающемся слое жидкости

Для проведения измерений во вращающемся слое жидкости, установка, подробно описанная в главе 1, была помещена на вращающийся стенд, который обеспечивает строго равномерное вращение в диапазоне скоростей  $0.04 \leq \Omega \leq 0.30 \text{ с}^{-1}$ . Измерения полей скорости проводились с помощью измерительного комплекса «Полис». Двойной импульсный Nd-YaG лазер, блок управления и компьютер располагались на неподвижной платформе. Цифровая видеокамера была закреплена во вращающейся системе координат. Мощность нагрева варьировалась от 7 до 28 Вт, скорость вращения  $\Omega$  от 0.081 до  $0.17 \text{ с}^{-1}$ . В качестве рабочих жидкостей были использованы силиконовые масла с вязкостью при  $25^\circ\text{C}$  2.8, 5, 10 и 20 сСт. Всего было проведено 62 независимые реализации.

Наличие подогрева в центральной области дна приводит к возникновению крупномасштабной адвективной ячейки, которая была подробно описана в главе 1. За счет действия сил Кориолиса конвергентный поток в нижней части слоя начинает закручиваться в циклонический, а дивергентный в антициклонический вихрь. Структура основного течения для случая вращающейся модели представлена на рис. 5.

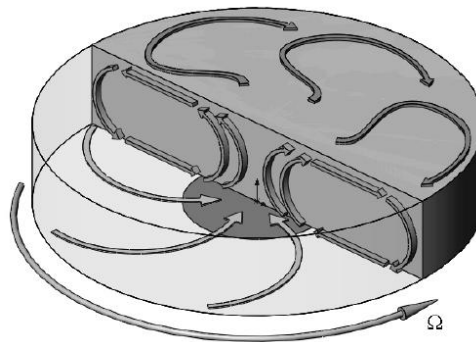


Рис. 5 Структура основного течения

С увеличением нагрева интенсивность меридиональной циркуляции растет, усиливается перенос углового момента в нижних слоях жидкости, таким образом, величина азимутальной скорости также возрастает.

Вращение модели является главным источником углового момента. Можно ожидать, что при увеличении скорости вращения интенсивность циклонического вихря будет расти. Однако возрастающая центробежная сила становится причиной подавления конвекции. Это значит, что при фиксированном нагреве существует оптимальная скорость вращения, превышение которой приводит к уменьшению интенсивности движения. Наличие эффективной скорости вращения демонстрируют осредненные по времени и пространству профили азимутальной скорости для фиксированной мощности нагрева и различной скорости вращения (рис. 6) на высоте  $z = 15$  мм. При увеличении вязкости эффективная скорость вращения уменьшается.

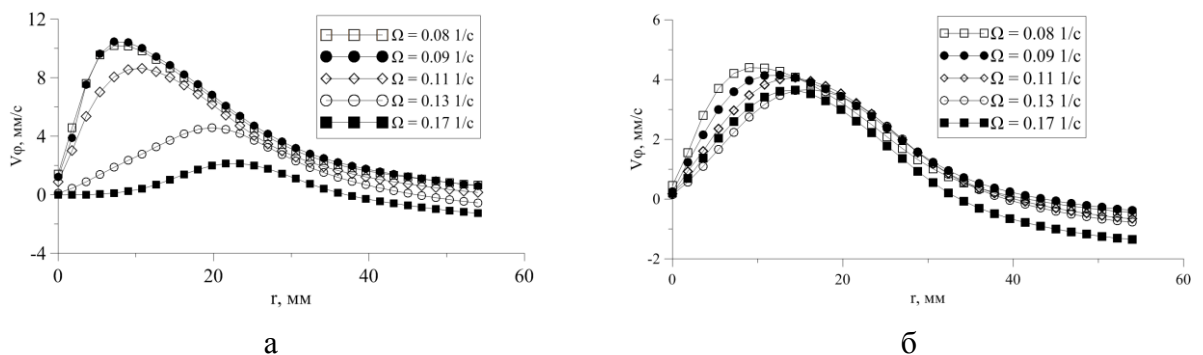


Рис. 6 Распределение средней по времени и пространству азимутальной скорости вдоль радиальной координаты  $z = 15$  мм,  $P = 17$  Вт: а – ПМС5 ( $Pr=66$ ), б – ПМС10 ( $Pr=112$ )

Существенное влияние на структуру и интенсивность течения также оказывают физические свойства жидкости. На рис. 7 представлены средние векторные поля скорости в области нагрева на высоте 15 мм для фиксированной скорости вращения и мощности нагрева, но разных жидкостей.

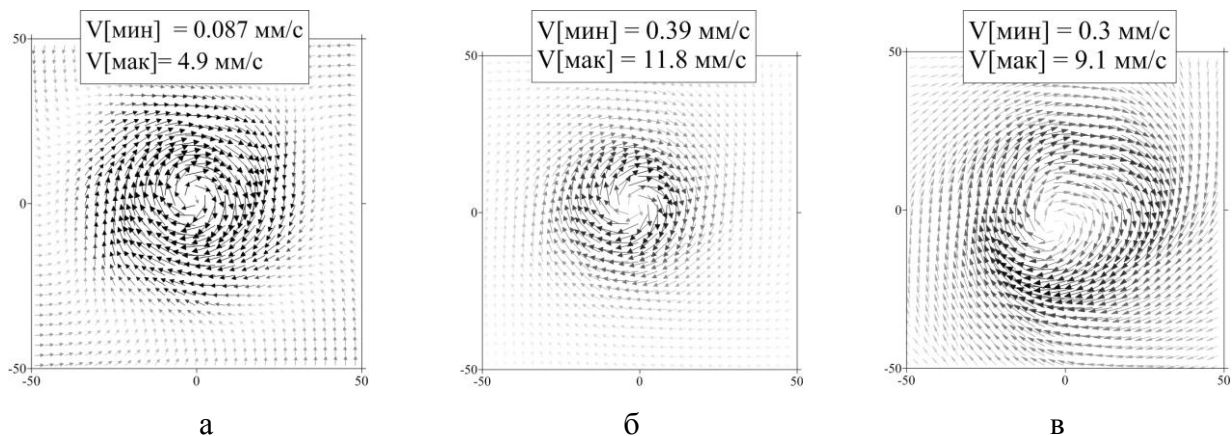


Рис. 7 Векторные поля скорости в области нагрева на высоте  $z = 15$  мм,  $P = 17$  Вт,  $\Omega = 0.081 \text{ с}^{-1}$ : а – ПМС10 ( $Pr=112$ ), б – ПМС5 ( $Pr=66$ ), в – ПМС2.8 ( $Pr=38$ ).

При уменьшении вязкости жидкости максимальная скорость вихря увеличивается в несколько раз, а структура течения кардинально меняется. Сначала вихрь становится более локализованным и интенсивным, затем, при дальнейшем уменьшении вязкости интенсивность вихря резко снижается, а течение принимает форму деформированного кольца. Как и в случае изменения скорости вращения существует такая вязкость жидкости, при которой достигается максимальная интенсивность течения.

Численные расчеты были проведены с помощью программного продукта FlowVision 3.09.02. Размеры расчетной области совпадают с размерами экспериментальной установки. Расчетная модель была расположена во вращающейся системе координат. Ось вращения совпадала с вертикальной осью  $z$ , угловая скорость вращения  $\Omega = 0,081 \text{ с}^{-1}$ , мощность нагрева составляла 13 Вт, начальная температура жидкости 295 К. Начальная скорость равна скорости твердотельного вращения.

Структура полей схожа с полями, полученными экспериментально для режима с высокой скоростью вращения, когда числа Рэлея  $Ra_f$  и Экмана  $E$  оказываются близки. На рис. 8 представлены среднее и мгновенное векторные поля скорости в области нагрева на высоте 15 мм, полученные численно. На среднем поле отчетливо видно вихревое кольцо, что подтверждает экспериментальные данные. Мгновенное поле скорости демонстрирует, что конвективный вихрь возникает не в центре полости, соосно с осью вращения, а в отдалении от центра. Прецессия вихря вокруг центра приводит к тому, что течение в середине слоя представляет собой вихревое кольцо.

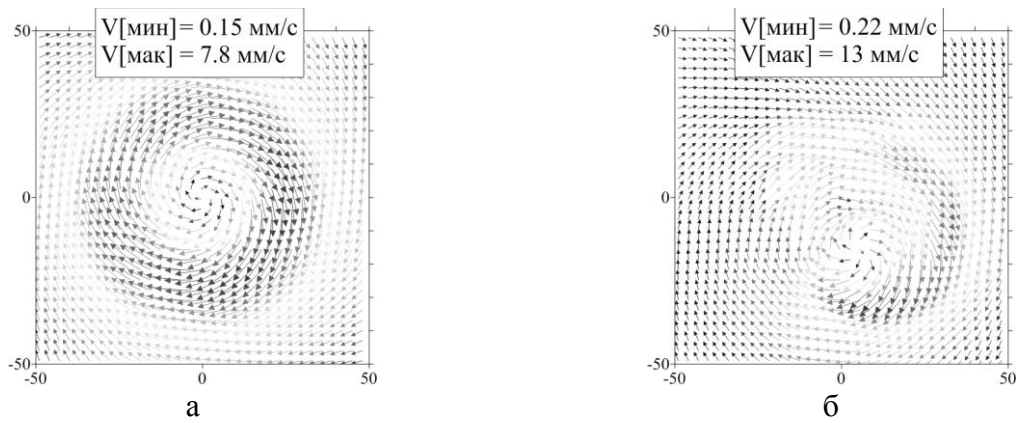


Рис. 8 Векторные поля скорости в области нагрева на высоте  $z = 15$  мм,  $P = 13$  Вт,  $\Omega = 0.081 \text{ c}^{-1}$ , ПМС2.8 ( $Pr=38$ ): а – среднее поле, б – мгновенное поле.

Таким образом, устойчивый конвективный вихрь может существовать только в узком диапазоне управляющих параметров. Относительно небольшая вариация скорости вращения или вязкости жидкости может приводить к значительному изменению интенсивности вихря и его структуры.

### Глава 3 Спиральность в адвективном потоке

Спиральность представляет собой скалярное произведение векторов скорости и завихренности, поэтому для исследования распределения спиральности и ее источников в объеме, необходимо измерение мгновенного распределения всех трех компонент скорости в эксперименте, что является затруднительным. Для анализа распределения спиральности, в случае неподвижного слоя был использован программный комплекс Fluent, а в случае вращающегося слоя – FlowVision. Безразмерные параметры, соответствующие этим двум случаям приведены в таб. 1.

таб.1

	$Gr_f$	$Pr$	$Ra_f$
$\Omega = 0.0 \text{ c}^{-1}$	$1.7 \cdot 10^5$	211	$36 \cdot 10^6$
$\Omega = 0.081 \text{ c}^{-1}$	$4.6 \cdot 10^6$	61	$28 \cdot 10^7$

Наличие нестационарных вторичных течений в пограничном слое над областью нагрева приводит к тому, что поля скорости носят сложный характер. Поэтому для анализа полей спиральности удобно разделить ее на радиальную ( $H_r$ ), азимутальную ( $H_\phi$ ) и вертикальную ( $H_z$ ) спиральность.

$$H_r = V_r \cdot \omega_r, \quad H_\phi = V_\phi \cdot \omega_\phi, \quad H_z = V_z \cdot \omega_z$$

$$\omega_r = \frac{1}{r} \frac{\partial V_z}{\partial \phi} - \frac{\partial V_\phi}{\partial z}, \quad \omega_\phi = -\frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{\partial V_r}{\partial z}, \quad \omega_z = \frac{1}{r} \frac{\partial(rV_\phi)}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial V_r}{\partial \phi}$$

В таблице 2 приведены значения средних по времени и пространству вкладов спиральности  $\langle H \rangle$  и их средних квадратичных отклонений  $\sigma_H$  для

случая неподвижного слоя. На рис. 9 представлены распределения среднеквадратичных отклонений спиральности, где области максимумов пульсаций приходятся на области формирования и всплытия вторичных структур. Поэтому осреднение, представленное в таблице, было проведено в двух областях: по всему объему и в области над нагревателем.

Таб. 2

Вклады спиральности, $\text{м/с}^2$	Весь объем		Область над нагревателем	
	$\langle H \rangle$	$\sigma_H$	$\langle H \rangle$	$\sigma_H$
Радиальная $\langle H_r \rangle$	$4.9 \cdot 10^{-8}$	$1.6 \cdot 10^{-5}$	$4.8 \cdot 10^{-8}$	$1.2 \cdot 10^{-5}$
Азимутальная $\langle H_\varphi \rangle$	$-7.4 \cdot 10^{-9}$	$5.7 \cdot 10^{-6}$	$1.5 \cdot 10^{-8}$	$4.1 \cdot 10^{-6}$
Вертикальная $\langle H_z \rangle$	$2.1 \cdot 10^{-9}$	$1.0 \cdot 10^{-6}$	$6.4 \cdot 10^{-9}$	$6.4 \cdot 10^{-7}$

Величина спиральности системы оказывается незначительной по сравнению с ее среднеквадратичными отклонениями. Нестационарные когерентные структуры в виде горизонтальных валов и конвективных струй создают локальные пульсации спиральности, но не дают заметного вклада в средние значения.

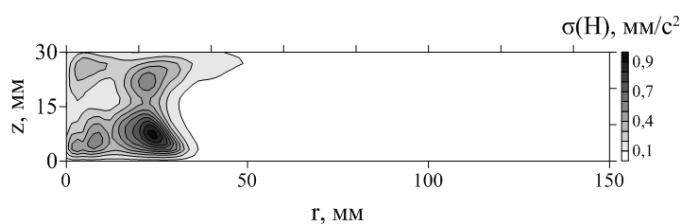


Рис. 9 Осредненные по азимутальной координате среднеквадратичные отклонения спиральности

Во вращающемся слое жидкости при наличии локализованного нагрева и действия сил Кориолиса в нижнем конвергентном (сходящемся) течении появляется циклонический вихрь, а в верхнем дивергентном - антициклонический. Это происходит в результате перераспределения углового момента между центром и периферией посредством интенсивной радиальной циркуляции.

Одной из причин формирования ненулевой спиральности в такой системе может являться взаимодействие интенсивного подъемного течения и конвективного вихря в центральной части полости. В дополнении к этому, на периферии существуют значительные градиенты радиальной и азимутальной скорости по вертикали. Наличие сдвигового течения будет неизбежно приводить к генерации горизонтальной спиральности.

Поле средней спиральности можно видеть на рис. 10 а. Наибольший вклад в среднюю спиральность, как и ожидалось, вносит вертикальная составляющая, однако существует максимум в области всплытия конвективных плюмов, как наблюдалось в случае неподвижного слоя.

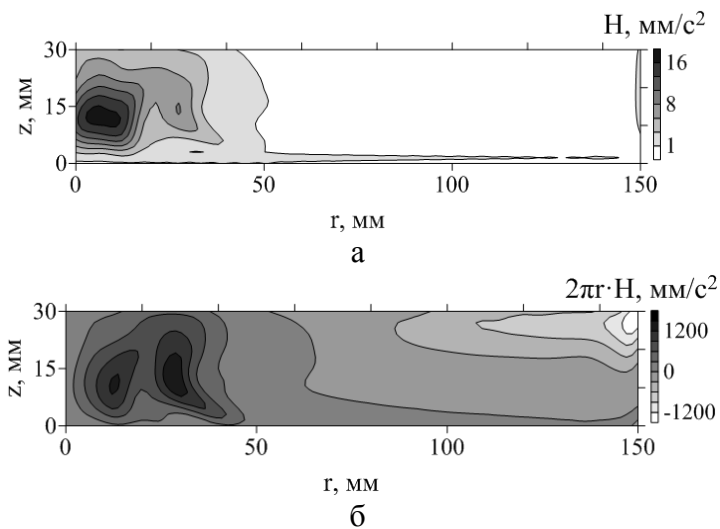


Рис. 10 Осредненное по пространству поле а – средней спиральности, б – интегральная спиральности

Несмотря на то, что максимум спиральности приходится на центральную область, где сочетание подъемного течения и интенсивного локализованного вихря играет ключевую роль, его вклад в интегральное значение спиральности может быть незначительным. На рис.10 б представлено осредненное по времени поле интегральной спиральности. Большой вклад в интегральную спиральность вносит не только вертикальная, но и азимутальная спиральность, наличие которой вызвано большими градиентами радиальной скорости по вертикали у боковых стенок полости. Максимумы азимутальной спиральности приходятся на области перехода конвергентного течения на дивергентное. Знак азимутальной скорости не совпадает со знаком градиента радиальной скорости, что приводит к отрицательной спиральности в области антициклонического движения и положительной спиральности в области циклонического вихря. Так как течение в данной системе несимметрично, интегральное значение спиральности оказывается положительным. Это является важным результатом, так как подтверждает возможность создания в лабораторных условиях течения, топология которого будет приводить к наличию системы с ненулевой спиральностью.

На рис.11 представлено поле среднеквадратичных отклонений спиральности. Амплитуда возмущений оказывается значительной, таким образом, вторичные структуры вносят значительный вклад в величину мгновенной спиральности системы.

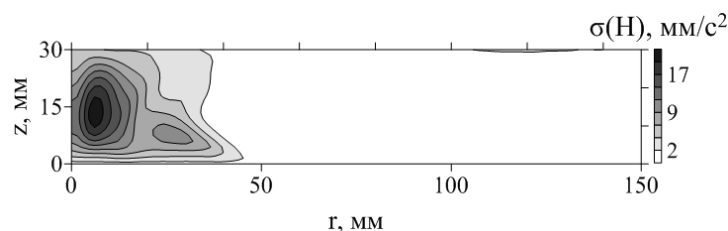


Рис. 11 Поле среднеквадратичных отклонений спиральности

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проведено экспериментальное исследование формирования конвективных структур над локализованным источником тепла в неподвижном слое жидкости. Показано, что на фоне основного течения, которое занимает весь объем полости, развивается система вторичных структур в виде конвективных валов различной ориентации. Образование поперечных структур происходит периодически с характерной частотой, зависящей от числа Рэлея.
2. Полученные экспериментальные данные использованы для верификации численной модели. На основе экспериментальных и численных данных предложен физический механизм возникновения поперечных конвективных валов.
3. Экспериментально и численно исследована структура конвективного вихря, возникающего во вращающемся цилиндрическом слое жидкости с локальным подогревом в центре. Показано, что структура вихря определяется скоростью вращения, физическими свойствами жидкости и интенсивностью нагрева. Обнаружено, что устойчивый конвективный вихрь существует только в ограниченном диапазоне управляющих параметров. Уменьшение вязкости, рост нагрева и скорости вращения сначала приводят к потере осесимметричности вихря, а затем к его распаду.
4. Проведен анализ распределения спиральности в течении, в котором помимо основного крупномасштабного потока существуют развитые вторичные структуры. Показано, что в неподвижном слое величина средней спиральности системы оказывается меньше ее среднеквадратичных отклонений. Во вращающемся слое жидкости общая спиральность системы ненулевая. Пульсации спиральности сосредоточены в области формирования и всплытия вторичных структур.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ИЗЛОЖЕНО  
В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ:

1. **Евграфова А.В., Левина Г.В., Сухановский А.Н. Формирование завихренности и спиральности при взаимодействии адвективного потока с вторичными структурами//Вычислительная механика сплошных сред. – 2013. – Т.6. - №4. - С. 451-459**
2. **A. Sukhanovskii, A. Evgrafova, E. Popova Horizontal rolls over localized heat source in a cylindrical layer//Physica D: Nonlinear Phenomena. – 2016. - Vol. 316. - P. 23–33**
3. **A. Sukhanovskii, A. Evgrafova, E. Popova Laboratory study of a steady-state convective cyclonic vortex//Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. – 2016. - Vol. 142. - P. 2214-2223**
4. Евграфова А. В., Сухановский А. Н. Экспериментальное исследование вторичных структур над локализованным источником тепла в случае осевой

- симметрии//Научный журнал Вестник Пермского Университета. Математика. Механика. Информатика. – 2011. - Вып. 5 (9). – С. 75-79
5. Евграфова А.В., Сухановский А.Н. Численное моделирование крупномасштабного течения в цилиндрическом слое жидкости с локальным подогревом снизу//Научный журнал Вестник Пермского Университета. Математика. Механика. Информатика. – 2011. - Вып. 5 (9). – С. 79-83
  6. Евграфова А.В., Левина Г.В., Сухановский А.Н. Генерация спиральности в адвективном потоке//Научный журнал Вестник Пермского Университета. Физика. - 2012. - Вып. 5 (9). – С. 52-55
  7. Евграфова А.В., Ибраев Д.Ф., Сухановский А.Н. Моделирование конвективных течений в CFD-пакетах// Вестник Пермского Университета. Математика. Механика. Информатика. - 2012. - Вып. 3(11). - С. 37-41
  8. Евграфова А.В., Сухановский А.Н. Исследование спиральных валов в конвективном потоке, натекающем на горячую поверхность// Сборник трудов всероссийской научно-практической конференции Неравновесные переходы в сплошных средах, Пермь, ПГНИУ, 2010, С. 79-82.
  9. Евграфова А.В., Сухановский А.Н. Исследование спиральных валов в случае осевой симметрии//Материалы международной научно-практической конференции "39 НЕДЕЛЯ НАУКИ СПбГПУ", Санкт-Петербург, 6-11 декабря, 2010, часть 5, С.165.
  10. A. Evgrafova, A. Sukhanovsky Horizontal rolls in a cylindrical layer with a local heating// Proceedings of 23-th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics ICTAM, Beijing, 2012, 19-24 August.
  11. A. Evgrafova, A. Sukhanovsky, G. Levina Secondary flows and their influence on helicity generation in the cylindrical fluid layer//Proceedings of international conference Fluxes and Structures In Fluids, Saint-Petersburg, 2013, P.92-94
  12. A. Evgrafova, A. Sukhanovsky, G. Levina Experimental and numerical study of secondary flow dynamics in a cylindrical fluid layer// European Geosciences Union General Assembly, 7-12 April 2013, Vienna, Austria, Abstracts, id. EGU2013-265
  13. A. Evgrafova, A. Sukhanovsky, E. Popova Instability of spiral convective vortex// European Geosciences Union General Assembly, 28 April - 2 May 2014, Vienna, Austria, id.88
  14. A.N. Sukhanovsky, A.V. Evgrafova, E.N. Popova The small-scale convection in the cylindrical fluid layer with local heating from below// Proceedings of International conference Fluxes and structures in fluids, 23-26 June 2015, Kaliningrad
  15. A. Evgrafova, A. Sukhanovskii, E. Popova. The characteristics of steady-state convective cyclonic vortex// Proceedings of international conference Advanced Problems in Mechanics , г. Санкт-Петербург, 27 июня - 2 июля 2016, С. 69-76
  16. Anna Evgrafova, Andrey Sukhanovskii, Elena Popova Laboratory study of a steady-state convective cyclonic vortex// Abstracts of 8th European Postgraduate Fluid Dynamics Conference, 6-9 July 2016, Warsaw, Poland, P. 27.