

“УТВЕРЖДАЮ”

Директор ФГБУН Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН

Член-корреспондент РАН И.И. Мохов

“24” 10 2016 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации —

Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института физики атмосферы им. А.М.Обухова Российской академии наук

на диссертационную работу А.В. Евграфовой

“ КРУПНОМАСШТАБНЫЕ 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

Диссертация А.В. Евграфовой посвящена экспериментальному изучению конвективных течений с неоднородными источниками тепла при наличии вращения – одному из наиболее распространенных типов конвекции в природе и технике. Развитые конвективные режимы характеризуются разнообразием разномасштабных в пространстве и времени структур, существенно влияющих на процессы переноса тепла, примесей и импульса. При этом сложность изучения природных систем, отягощенная одновременным действием различных факторов по прежнему актуальность лабораторных экспериментов, как одной из разновидностей малопараметрического подхода к изучению сложных систем, имеющего немалые достоинства и давшего немало важных результатов. Количество таких работ не убывает, при этом, наряду с новыми экспериментами, воспроизводятся и старые схемы на более точном уровне фиксации измеряемых величин и методов обработки. В этой связи, новые и оригинальные результаты, представленные в диссертационной работе А.В. Евграфовой, представляют собой заметное продвижение в этом направлении и являются весьма актуальными.

Диссертация содержит введение, четыре главы основного материала и заключение с общим объемом 128 страниц.

Во введении анализируется современное состояние рассматриваемой проблемы, обосновывается актуальность темы диссертации. Дан подробный обзор по конвекции в неоднородно нагретых слоях жидкости. Особое внимание уделяется конвективным структурам в атмосфере, детально описаны лабораторные эксперименты. Подчеркивается особость класса конвективных течений с локализованными источниками тепла. Обсуждается роль спиральности в генерации вихревых течений. Структура введения отражает структуру диссертации, которая воспроизводится по тексту и в конце раздела. Хочется отметить достаточную и глубокую проработанность введения, равно как и последующих разделов настоящего диссертационного исследования.

В первой главе диссертационной работы исследуются вторичные конвективные структуры, возникающие в адвективном потоке над локализованным источником тепла при отсутствии вращения. Описывается экспериментальная установка и измерительный комплекс, особенности используемого метода PIV, дающего погрешность измерения скоростей не более 5%. Обосновывается выбор рабочей жидкости – силиконового масла, имеющего меньшую зависимость коэффициента поверхностного натяжения от температуры по сравнению с водой. Можно отметить, используемые диссидентом системы термопар для измерений средних и пульсационных значений температуры. Отмечается, что хотя и скорости движений в лабораторном эксперименте на много порядков меньше чем в атмосфере, структуры меньших масштабов из лаборатории подобны наблюдаемым в природе при использовании при определении безразмерных параметров турбулентных коэффициентов теплопроводности. В качестве основных критериев подобия выбираются потоковое число Грасгофа, определяемое через толщину слоя рабочей жидкости и потоковое число Рэлея. Далее приводится подробное описание механизма формирования вторичных структур. Основные движения сосредоточены в радиальных валах. Возникают и кольцевые структуры, как раз, индуцированные движениями в пространстве между основными радиальными валами. процесс их возникновения носит периодический характер. При увеличении интенсивности нагрева форма этой поперечной к основному потоку структуры претерпевает изменения от неправильного кольца в плоскую спираль и далее в суперпозицию двух спиралей и в более трудно идентифицируемые формы. Спектр пульсаций температуры содержит одну выделенную частоту, соответствующую формированию конвективного вала. Частота возникновения поперечных вторичных структур оказывается пропорциональной потоковому числу Рэлея. Особенностью и достоинством настоящего исследования является параллельный расчет течений в экспериментальной установке, выполненный диссидентом. Это позволяет провести верификацию методов измерения и спланировать направление экспериментальных работ. Результаты первой главы проверялись расчетами на

пакете Fluent. Продемонстрировано хорошее совпадение экспериментальных и модельных средних профилей скорости, формирование и частота кольцевых структур. Предлагается разумный физический сценарий возникновения таких движений.

Вторая глава настоящего диссертационного исследования посвящена исследованию конвективного вихря уже во вращающемся слое жидкости.

Установка с рабочей жидкостью размещается на вращающемся стенде с шаговым двигателем, обеспечивающим равномерное вращение в диапазоне частот 0.04-0.30 с^{-1} с точностью 0.001 с^{-1} . Измерения полей скорости проводились с помощью измерительного комплекса ПОЛИС. Размещение комплекса на вращающейся установке потребовало его модификации для устранения появления областей теней, вызванных системой закрепления видеокамеры. В первом разделе главы детально описано разнообразие, решаемых при этом технических вопросов. Наряду с потоковыми числами Грасгофа и Рэлея использовалось так называемое конвективное число Россби – безразмерный параметр, характеризующий соотношение между силой плавучести и силой Кориолиса. Также рассматриваются число Экмана и обратное к нему число Рейнольдса, представляющего собой безразмерную скорость вращения. Отмечается, что обилие параметров задачи требует значительных ресурсов времени для экспериментов и объемов для хранения данных. Это ограничило проведение измерений на 3 горизонтальных уровнях над нагревателем. Были построены карты режимов в координатах числа Экмана и числа Рэлея, числа Экмана и числа Россби, что позволило провести систематизацию проведенных экспериментов, насчитывающих 62 реализации. В центральной области над нагревателем формируется циклонический вихрь. За пределами формируется антициклоническое вращение. Обнаружено, что для фиксированного нагрева существует оптимальная скорость вращения, при которой наблюдается максимум интенсивности азимутального вращения конвективного вихря. Диссертант напоминает, что на этот эффект указывалось еще в работе Богатырева, Смородина в 1996 году. Существует и оптимальное значение вязкости, при которой достигается максимальная интенсивность течения в вихре. Подобные наблюдения приводят к необходимости поиска безразмерного параметра, хорошо определяющего свойства течения. Диссертант предлагает в качестве подобного параметра квадратный корень из соотношения числа Грасгофа и числа Экмана, который оказывается пропорциональным безразмерному времени образования экмановского слоя и корню из потока тепла. Зависимость циклонической завихренности на высоте 15 мм (середина слоя рабочей жидкости) в области нагрева, приведенная на рис. 3.9 демонстрирует примерно линейный рост с ростом нового параметра S. При этом сложно выделить оптимальные скорости вращения или значения вязкости. Здесь более удобным оказывается зависимость от параметра S безразмерной азимутальной скорости, являющую собой отношение максимальной азимутальной скорости к азимутальной скорости самой платформы

на данном радиусе. В данной системе координат спад интенсивности конвективного вихря заметен при увеличении S .

Визуализация течения демонстрирует наличие спиральных структур в возникающем вихре. Для математического моделирования данного эксперимента использовался пакет Flow Vision. Моделирование подтвердило наблюдаемую трехмерную структуру течения. Одним из основных выводов главы является узость диапазона управляющих параметров, при которых может формироваться устойчивый конвективный вихрь со спиральной структурой.

Третья глава посвящена исследованию спиральности в адvectionном потоке в неподвижном цилиндрическом слое и вращающемся слое с локализованным нагревом в центральной области. Исторически, это исследование было выполнено доктором наук ранее экспериментов первых 2 глав и использовало численное моделирование в пакете Fluent для неподвижного слоя и FlowVision для вращающегося. Спиральность распределяется по координатным компонентам и делится на среднюю и пульсационную составляющие. Без вращения не обнаруживается возникновение интенсивного вихревого движения. Наблюдается хорошо известное значительное превышение среднеквадратичных отклонений компонент спиральности над ее средними значениями. В случае вращения механизмы генерации спиральности более очевидны, как показывает доктор наук. Рассматриваются далее результаты для условий существования устойчивого конвективного вихря. Наибольший вклад в среднюю спиральность вносит вертикальная составляющая. Существует при этом максимум и в области всплытия конвективных плюмов. В случае вращения слоя пульсационная составляющая спиральности оказывается более значительной по амплитуде, чем без вращения и составляет около 12% от средней спиральности. Приводится качественная картина возникновения средней спиральности в данной конфигурации. Пульсации спиральности связаны с перманентно возникающими вторичными течениями – системой разно-ориентированных валов и плюмов.

В *Заключении* сформулированы основные выводы докторской диссертации. Приводятся рекомендации и перспективы по дальнейшей разработке рассматриваемой темы.

Научная новизна результатов докторской диссертации определяется в первую очередь полученными в ней оригинальными результатами. Проведено детальное исследование возникновения конвективных структур над локализованным источником тепла в неподвижном и вращающемся случае. Выполненные измерения указывают на сложный характер взаимодействия вторичных структур, вместе с тем, как мы представляем, доступный описанию в рамках конечномерной малопараметрической модели. Эмпирическим путем установлены новые безразмерные параметры, характеризующие развитие конвективного вихря над локализованным источником тепла при вращении и, существующего устойчиво только в ограниченном диапазоне управляющих параметров.

Диссертация написана хорошим языком. Хотелось бы отметить добротное качественное и количественное описание как наблюдаемых и исследуемых явления, так и технических задач, возникающих при экспериментальном исследовании. Диссертанту на наш взгляд удалось успешно справиться с этой непростой задачей. Текст диссертации свидетельствует о глубоком понимании происходящих процессов. Несмотря на практическое отсутствие формул диссертация при этом глубоко "аналитична" и "физична". Нам представляется, что А.В. Евграфова относится тем самым к уникальному и редкому типу экспериментаторов и имеет большие научные перспективы.

Содержание автореферата правильно отражает содержание диссертации. Её основные результаты опубликованы в отечественных и международных изданиях, входящих в список ВАК и широко докладывались на конференциях различного уровня. Автор отзыва имел удовольствие слушать доклад диссертанта на Европейской Ассамблее Геонаук (EGU).

В качестве недостатков работы, отметим недоработанный, как нам кажется, материал по исследованиям спиральности в третьей главе и отдельные опечатки.

Несмотря на высказанные замечания, можно констатировать, что диссертация выполнена на высоком научном уровне.

Результаты диссертации могут быть использованы в Институте проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Институте физики атмосферы РАН им. А.М. Обухова, Институте прикладной физики РАН, Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Институте физики земли им. О.Ю.Шмидта РАН, Институте космических исследований РАН, МГУ им. М.В. Ломоносова, Институте экспериментальной метеорологии НПО "Тайфун" и других организациях.

В целом диссертация А.В. Евграфовой представляет собой завершённую научно-квалификационную работу на актуальную тему, в которой на основе выполненных автором экспериментальных исследований получены новые оригинальные результаты, вносящие существенный вклад в динамику конвекции с неоднородным нагревом. Эти результаты достаточно обоснованы и в достаточной мере отражены в публикациях автора. Представленная диссертация удовлетворяет требованиям Положения ВАК Минобразования РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, соответствует специальности 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы», автореферат правильно отражает содержание диссертации, и её автор Евграфова Анна Валерьевна заслуживает присуждения

ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05
(Механика жидкости, газа и плазмы).

Диссертационная работа рассмотрена на заседании научного семинара
Отдела Динамики Атмосферы Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Института физики атмосферы им. А.М.Обухова Российской
академии наук (вел заседание академик РАН Голицын Георгий Сергеевич) 20
сентября 2016 г.

Заведующий лабораторией
геофизической гидродинамики



д.ф.-м.н. О.Г. Чхетиани