

На правах рукописи

Хаджимуса Мхаммадали

Экспериментальное исследование конвективных когерентных структур в горизонтальном слое жидкости, подогреваемом снизу и вращающемся относительно вертикальной оси

01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва, 2006

Диссертация выполнена на кафедре газовой и волновой динамики механико-математического факультета и в Институте механики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор С.Я. Герценштейн

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
А.Н. Рожков,
к.ф.-м.н. А.А. Кашко

Ведущая организация: Пермский государственный
педагогический институт

Защита состоится « 8 » декабря 2006г. в 18 ч. 20 мин. на заседании диссертационного совета Д501.001.89 при МГУ им. М.В. Ломоносова по адресу: 119992, г. Москва, Воробьевы горы, главное здание МГУ, аудитория 16-24.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке механико-математического факультета МГУ.

Автореферат разослан «...» ноября 2006 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

доктор физико-математических наук

А. Н. Осипцов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы Проблема турбулентности является, по мнению многих известных ученых, проблемой номер один современного естествознания. Особо актуальной эта проблема стала в последнее время в связи с обнаружением в гидродинамических течениях так называемых «странных аттракторов» - нового класса решений уравнений Навье-Стокса, обладающих стохастическими свойствами и хорошо описывающих реальные турбулентные течения, например, в круглой трубе, в конвекции и т.д. В связи с этим открытием к настоящему времени сформировалось новое научное направление в гидродинамике – прямое численное моделирование турбулентных течений на основе решения нестационарных двумерных и трехмерных уравнений Навье-Стокса без привлечения каких-либо полуэмпирических гипотез. В рамках такого подхода

уже удалось рассмотреть широкий класс различных течений. При этом, в частности, выявилась огромная роль когерентных турбулентных структур, которые, как правило, присутствуют во всех турбулентных течениях и несут большую энергетическую нагрузку. Теоретическое и особенно экспериментальное исследование подобных структур на сегодняшний день выполнено недостаточно подробно и далеко не во всех своих аспектах.

Цель работы изучение турбулентных конвективных структур, возникающих при конвективной неустойчивости плоского горизонтального слоя жидкости, подогреваемой снизу и допускающей вращение относительно вертикальной оси.

Научная новизна состоит в изучении свойств турбулентных конвективных структур, в определении времен установления конвективных ячеек, в анализе влияния вращения и отношения толщины слоя к его диаметру на эти когерентные структуры.

Практическая ценность состоит в возможном приложении развитого подхода к изучению когерентных структур и к выявлению их роли в широком классе аэрогидродинамических течений.

Апробация работы Основные результаты диссертации докладывались на Всесоюзных конференциях «Современные проблемы аэрогидродинамики» (Институт механики МГУ, 2005, 2006 г.), на Ломоносовских чтениях МГУ (2005, 2006 г.), на международной конференции «Нелинейные задачи теории гидродинамической неустойчивости и турбулентность». Москва. 2006г. Работы, вошедшие в диссертацию, обсуждались на семинаре профессора С.Я. Герценштейна и на секции аэромеханики Института механики МГУ.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 7 работ. Основные результаты содержатся в работах [1-7].

Структура и объем. Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Основная часть диссертации содержит 146 стр., из которых 81 стр. – рисунки. Список литературы содержит 42 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении сформулирована цель исследований, показана актуальность темы, выделены положения, выносящиеся на защиту и порядок изложения материала в работе.

В главе 1 дан обзор известных исследований по данной проблеме.

Одной из актуальных проблем теории гидродинамической неустойчивости является выявление особенностей и времен установления конвективных ячеек и подобных когерентных структур. С одной стороны, из численных и аналитических исследований хорошо известно, что эти времена довольно малы, причем и для двумерных, и для трехмерных течений. С другой стороны, в ряде экспериментов процесс установления может занимать более суток. Мало того, экспериментаторы наблюдают при этом пространственный хаос, описание которого включает «фазовую турбулентность», хаос спиральных дефектов, взаимодействие дислокаций, конкуренцию доменов и ряд других интересных переходных процессов.

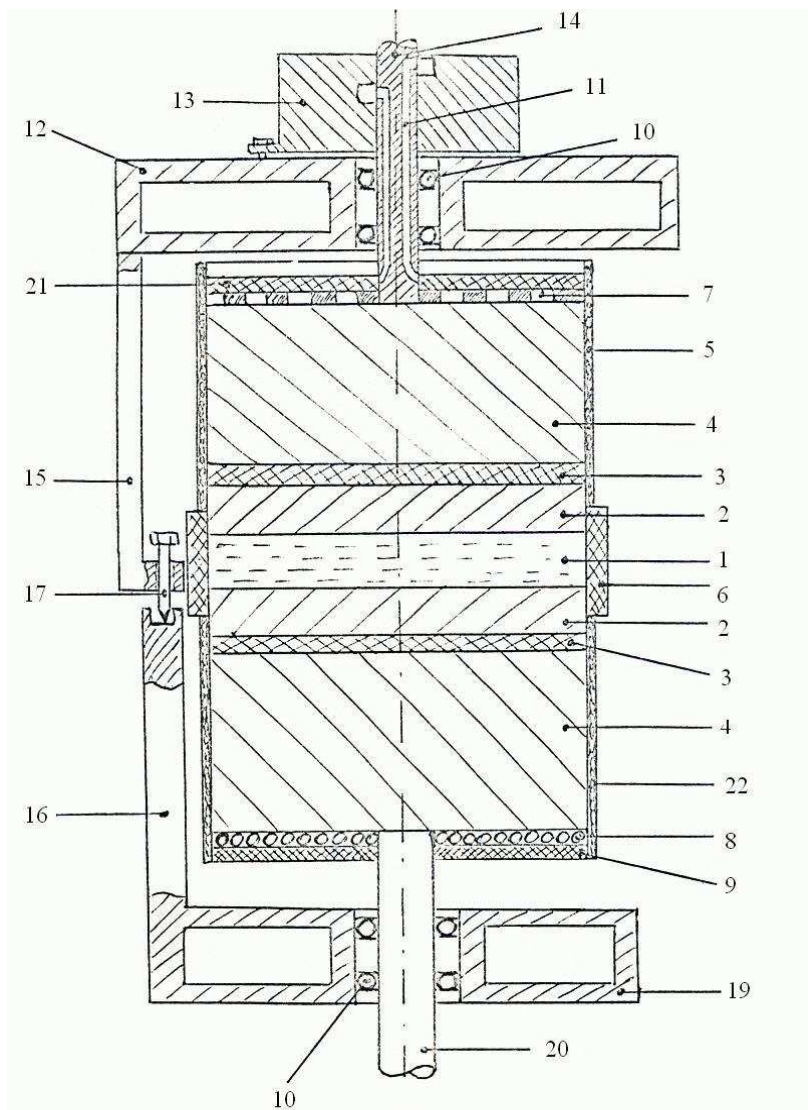
Основное содержание данной работы – установить соответствие теории и эксперимента в этих процессах установления конвективных когерентных структур.

В главе 2 описывается экспериментальная установка.

Исследование проводилось на установке Института механики МГУ «Плоский слой». Эта установка была изготовлена в ИКИ АН СССР под руководством академика Г.И. Петрова, а собрана в Институте механики МГУ

ЮН. Беляевым и его коллегами. Отладка установки и ее современная модификация проведена автором диссертации.

Схема установки показана на фиг.1.



Фиг.1

Схема установки

На фиг.2 показана фотография установки. Плоский слой жидкости I размещается в пространстве между медными дисками 2 и боковой стенкой из органического стекла. Диаметры дисков $2d = 490$ мм. Высота слоя может варьироваться от 5,5 мм до 60 мм.



Фиг. 2. Фотография установки

Диски изготовлены из меди марки М I и имеют толщину 39 мм. Их поверхности обработаны на станке, а затем доведены шлифовкой до высокого класса точности. Отклонения от плоскостности, как показали измерения с помощью лекальной линейки и специального уровнеметра с отсчетом по катетометру КМ 6, не превышают на всей поверхности $\pm 0,01$ мм.

Диски 2 через переходные слои 3 из эпоксидной смолы марки ЭД-5 склеены с алюминиевыми дисками 4 того же диаметра, что и медные, и имеют

высоту 300 мм. Толщина эпоксидных слоев 9,5 мм и выдержана с точностью $\pm 0,04$ мм.

Алюминиевые диски 4 изготовлены из сплава АК-6 и перед склейкой их торцовые поверхности обработаны с точностью $\pm 0,03$ мм. Алюминиевые диски через фланцы $d = 490$ мм скрепляются с валами 14 и 20. Прецизионное изготовление узлов и посадочных мест и тщательная сборка обеспечивают хорошую центровку дисков на валах, при этом торцовые биения поверхностей медных дисков непосредственно соприкасающихся с жидкостью не превышают $\pm 0,02$ мм. Валы на прецизионных радиально-упорных подшипниках 10 укреплены во втулках, которые сварены в силовые плиты 12 и 19. К каждой плите приварены по три опоры 16 и 15 с ребрами жесткости. При сборке верхняя и нижняя части установки устанавливаются на опорных винтах 17 с дифференциальной резьбой, что позволяет регулировать толщину зазора между дисками с точностью до $\pm 0,01$ мм. На концах опор имеются приспособления, позволяющие смещать верхний диск относительно нижнего в горизонтальной плоскости и обеспечивать соосность всей системы дисков. Жесткое крепление валов, прецизионная обработка шеек валов под подшипники, а также высокое качество подшипников обеспечивают малость радиальных биений боковых стенок медного диска: они не превышают $\pm 0,02$ мм.

К опорам нижнего диска приварены подпятники со вкладышами, которые устанавливаются на упоры в опорной станине, сваренной из труб. Станина с помощью фланцев на болтах крепится на железобетонном основании.

Упоры, на которые устанавливаются подпятники, имеют регулировочные винты, позволяющие устанавливать поверхность нижнего медного диска

горизонтально, что проверяется с помощью катетометра КМ 6. Отклонение диаметрально расположенных краев поверхности нижнего диска от горизонтального уровня удается свести к величине, не превышающей $\pm 0,01$ мм. Расстояние между верхним и нижним медными дисками устанавливается с помощью мерных плиток Югансона с точностью около 0,01 мм.

Железобетонное основание станины развязано от аналогичного основания, служащего для крепления рамы двигателей привода установки во вращение. Они залиты в углубления в разрезном полу помещения, причем, часть пола, на которой размещена сама установка, представляет собой монолитную бетонную плиту, установленную на грунт.

Тепловой режим конвективного слоя регулируется подогревателем 9 и теплообменником 7. Подогреватель изготовлен из нихромовой проволоки $d = 1,6$ мм в виде плоской плотно виток к витку намотанной спирали и имеет мощность около 250 Вт, что обеспечивает нагревание нижнего алюминиевого диска до температуры $\sim 75^{\circ}\text{C}$. В верхнем торце алюминиевого диска верхнего блока выфрезерованы канавки 7 в виде биспирали, по которым циркулирует охлаждающая жидкость. В поперечном сечении канавки имеют вид квадрата со стороной 15 мм. Сверху этот диск накрывается крышкой из нержавеющей стали. Подвод жидкости осуществляется через каналы 11, высверленные в валу 14, вал также изготовлен из нержавеющей стали. Через муфту 13, укрепленную на плите 12 и насаженную на вал, осуществляется сопряжение неподвижной части конструкции с вращением. Утечка жидкости через зазоры между валом и муфтой предотвращается сальниковым уплотнением со специаль-

ной набивкой. Кроме того, через закрепленные на муфте штуцеры загоняется масло-графитовая смазка. Муфта изготовлена из бронзы

Регулировка и поддержание температуры производится путем измерения ее в алюминиевых блоках, сравнения с эталонной и подачи управляющего сигнала рассогласования на схемы управления мощностью подогревателя и ультратермостата. Приведенные схемы должны обеспечивать постоянство температуры блоков не хуже $\pm 0,01^{\circ}\text{C}$. Управляющий сигнал может поступать и из медных блоков, если требуется поддерживать постоянство температуры на границах конвективного слоя. В том случае, если нестабильность температуры верхнего диска не удастся ликвидировать с помощью одного термостата, предусмотрено тандемное включение двух ультратермостатов. Термостатированная охлажденная жидкость – вода или масло подается в теплообменник верхнего блока через штуцеры на переходной муфте 13.

Для измерения температуры медных и алюминиевых дисков в них высверлены глубокие каналы $d = 2$ мм параллельно торцовым поверхностям так, что измерительные точки (всего 32, по 8 в каждом блоке и одно дополнительное в нижнем алюминиевом блоке) располагаются в плане равномерно по окружностям: 4 – по окружностям диаметра 200 мм и 4 – по окружностям диаметра 350 мм. В эти отверстия вставляются датчики температуры. Чувствительным элементом датчика является термистор СТЗ-14, который позволяет измерять температуру с точностью, превышающей $0,01^{\circ}$.

Одним из важнейших параметров установки является равномерность распределения температуры на поверхности медных дисков. Измерения проводились в условиях, когда боковые поверхности блоков не были теплоизоли-

рованы, а перепад температуры между окружающей средой и блоками составлял 20°C . Показано, что небольшая неоднородность температуры $\pm 0,02^{\circ}\text{C}$, имеющаяся в алюминиевых дисках практически исчезает в медных.

Выводы датчиков температур через специальные пазы глубиной 4 мм на боковой поверхности блоков проходят далее через центральные отверстия в валах и по кольцевым контактными кольцам токосъемников, собранным в пакет. Токосъемники насажены на оконечности валов, а на кожухи червячных редукторов надеты муфты с отверстиями, в которые закреплены патроны. В эти патроны вставляются подпружиненные контактные щетки, изготовленные из меднографитового материала марки МГО и контактирующие с поверхностями контактных колец. Кольца посеребрены и тщательно отполированы, торцы контактных щеток также отполированы. Для уменьшения влияния шумов контакта к ним подводятся сигналы выхода мостовой схемы, измеряющей сопротивление датчика. Эти элементы монтируются непосредственно на вращающихся частях установки. Датчики калибровались по ртутному термометру, имеющему шкалу деления $0,01^{\circ}\text{C}$. Для этого датчики и термометр помещались в глубокие ниши, высверленные в массивном блоке из меди, который во время измерений устанавливался в термостате.

Из-за большой массы блоков установки весьма важной оказывается динамика прогрева и охлаждения блоков при импульсивных тепловых нагрузках. Такие измерения также проделаны.

Для измерения нестационарных тепловых потоков некоторые из отверстий для датчиков температуры высверлены на расстоянии всего 3 мм от торцевой поверхности дисков.

Тепловая изоляция установки обеспечивается пайбами 9 и 21. Первая сделана из стеклотекстолита и несет, кроме того, всю конструкцию теплоизоляции боковых поверхностей дисков установки; вторая же изготовлена из пенопласта. Стальной экран 22 также является несущим элементом; воздушный зазор между ним и боковой поверхностью нижнего алюминиевого диска служит эффективной теплоизоляцией. Экран 22 служит также для крепления смотрового кольца 6 и специальной текстолитовой пайбы. Между этой пайбой и смотровым кольцом вставляется уплотнитель, который при жестком креплении кольца на экране обжимает уплотнитель; тем самым создается уплотнение, препятствующее вытеканию рабочей жидкости. Сверху на кольцо устанавливается теплоизоляционный колодец, изготовленный из пенопласта и служащий для отделения от окружающей среды верхнего блока установки. Такая конструкция боковой теплоизоляции обеспечивает свободное независимое вращение нижнего и верхнего блоков. Для создания твердотельного вращения конвективного слоя в стенках колодца сделаны отверстия с резьбой, в которые вкручиваются упоры, что позволяет вращать оба блока одним двигателем.

Смотровое кольцо обеспечивает визуальные наблюдения слоя.

Валы 14 и 20 через установленные на силовых плитах 12 и 19 червячные редукторы приводятся во вращение двумя независимыми двигателями типа ПН-5. Двигатели установлены на мощной раме, которая в свою очередь укрепляется на железобетонном основании, механически развязанном с основанием установки. На каждой из подставок двигателей установлены шестеренчатые редукторы, соединенные с валами двигателей через переходные

муфты. Передача вращения от шестеренчатых редукторов к червячным осуществляется с помощью карданных валов. Для уменьшения передачи вибраций подставки, на которой укреплен двигатель, к установке карданный вал привода верхнего блока сделан по возможности коротким. Вращение этого вала передается на установку через тщательно отъюстированный и закрепленный в опоре вал.

Скорости вращения двигателей поддерживаются постоянной системой с фазовой стабилизацией и измеряются фотоэлектрической схемой с выходом на частотомер. В этой схеме сигнал от прерывателя светового луча, насаженного на вал двигателя, после усиления поступает на двигатель частоты, другой вход которого подключен к прецизионному генератору ГЗ-110, который является опорным. Оба сигнала затем подаются на фазометр ФЭ-16, а сигнал рассогласования их фаз после усиления и коррекции управляет напряжением источника питания двигателя. Схема обеспечивает постоянство скорости вращения двигателя в пределах $\pm 0,03\%$.

Питание на подогреватель нижнего блока подается через ртутный токосъемник.

Установка обладает широкими возможностями и позволяет производить измерения в следующем диапазоне измерения значений определяющих параметров: $0,1 \leq Ta \leq 10^9$, $10^2 \leq Ra \leq 10^8$, $10^{-3} \leq |R_0| \leq \infty$ ($R_0 = (\Omega_2 - \Omega_1) / \Omega_1$). Безразмерный горизонтальный масштаб слоя (отношение продольного его размера к поперечному) можно изменять от 10 до 100. Скорость вращения границ слоя можно независимо варьировать в пределах от 0,01 до 1 об /сек. и поддерживать ее с высокой точностьюю $2 < Pr < 10000$.

В самое последнее время проведен ряд работ по модернизации установки. В частности, была проведена модернизация схемы измерения температуры. После замены неисправных частей и модернизации системы измерений была получена возможность измерять температуры в диапазоне от 10 до 50 градусов Цельсия с погрешностью 0,01 градуса. Использовалась беспроводная система связи, которая позволила упростить схему подключения термодатчиков и измерения температуры, а также снизила вероятность отказа оборудования. Для измерения температуры используются терморезисторы ММГ-6 сопротивлением около 10 кОм, запаянные в медные трубки диаметром 2 мм.

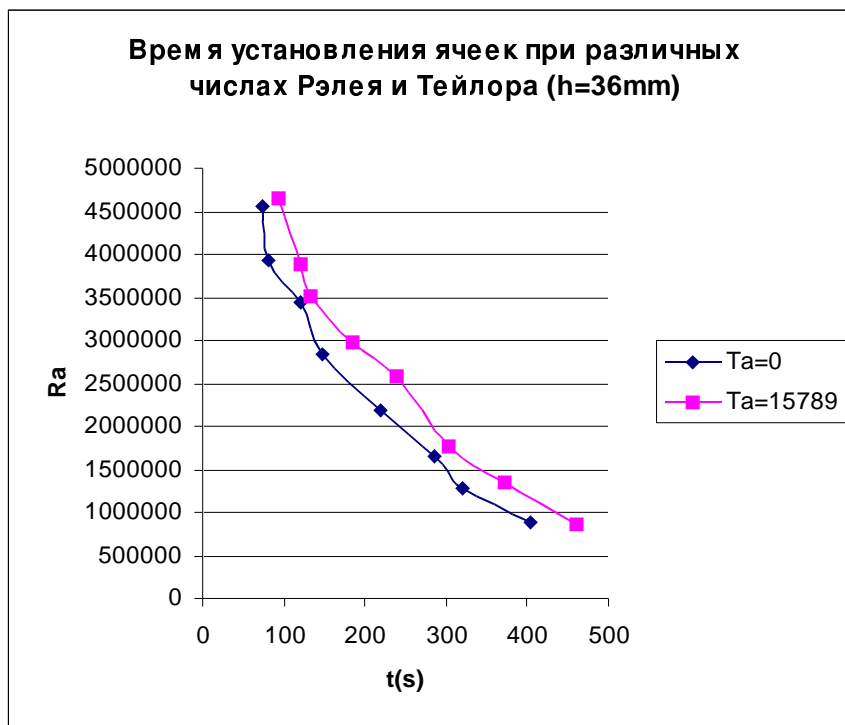
Выходы терморезисторов подключаются к плате расположенной непосредственно на диске установки. Плата для каждого диска позволяет подключать до 16 термодатчиков. Питание платы осуществляется от аккумулятора с напряжением 6-9 В, расположенного также непосредственно на диске. На плате расположены 12-ти битный АЦП и радиопередатчик, обеспечивающий связь с персональным компьютером. АЦП опрашивает термодатчики, кодирует информацию в двоичный вид и передает на приемник, подключенный непосредственно к компьютеру.

Приемник и передатчик хорошо защищены от воздействия сторонних электромагнитных излучений и обладают встроенной системой коррекции ошибок, что позволяет быть уверенным в корректной передаче данных.

Связь приемника с компьютером осуществляется через USB-интерфейс. Таким образом, достигается простота подключения измерительной части установки к компьютеру, а также упрощается написание программного обеспечения для измерения температуры.

В главе 3 описывается экспериментальная методика и представлены результаты методических исследований.

Экспериментальные исследования конвективной неустойчивости проводились, в частности, для силиконового масла с числом Прандтля $Pr = 200$ с малой добавкой алюминиевой пудры (для визуализации) в диапазоне чисел Рэлея Ra : $1000 < Ra < 500000$, чисел Тейлора Ta : $0 \leq Ta < 17000$. Полученные результаты показывают резкое уменьшение характерных времен установления с ростом надкритичности (фиг.3, кр.1); и наоборот, существенное увеличение этих времен с ростом Ta (фиг.3, кр.2). Интересно, что с увеличением толщины слоя характерные времена установления также увеличиваются, что, по-видимому, объясняется влиянием торцевых (боковых) стенок – резко уменьшается отношение радиуса диска к толщине слоя.



Фиг.3

Зависимость времени установления конвективных ячеек от чисел Рэлея при толщине слоя 36мм и $Ta=0$ – кривая 1; кривая 2 – аналогично, но при наличии вращения ($Ta=15789$).

Эксперимент по определению характерного времени установления конвективных ячеек проводился следующим образом. Первоначально, после длительного прогрева нижней границы слоя, при свободной верхней границе, наблюдался выход на режим. Производится измерение характерных температур установившегося режима на свободной поверхности. Затем жидкость тщательно перемешивается, причем во всех опытах перемешивание производится одним и тем же способом. После перемешивания замеряется поверхностная температура и затем снимается цифровой видеofilm верхней границы с одновременным измерением ее температуры. Проводится также аналогичная процедура с применением тепловизора. Под временем установления понимается время, при котором характерные поверхностные температуры достигают 95% значения температуры установившегося режима. Интересно, что после равномерного перемешивания первоначально начинают выделяться крупномасштабные ячейки, которые затем начинают дробиться и постепенно уменьшаться. По-видимому, это объясняется влиянием боковых границ, которые вносят интенсивные крупномасштабные возмущения в конвективный слой, а амплитуды мелкомасштабных возмущений после перемешивания изначально малы и нужно определенное время для их выделения на общем фоне.

Отметим, что при высоких числах Рэлея хаос определяется ансамблем этих мелкомасштабных возмущений различной формы и различного местоположения.

Представленный на фиг.4 фрагмент снимка верхней границы слоя демонстрирует форму ячеистой структуры слоя при свободной верхней границе, а также, одновременно, при наличии твердой прозрачной (стеклянной) верхней границы. Для свободной границы характерна ячеистая структура. Отметим, что при больших числах Рэлея формы ячеек сильно изменчивы



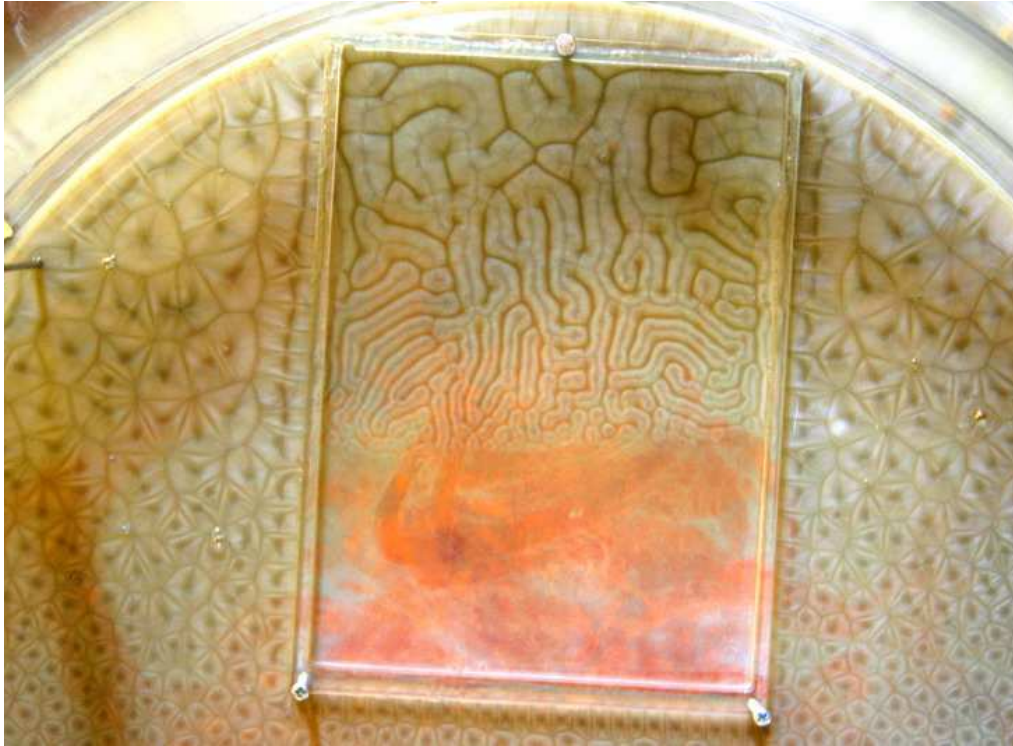
Фиг. 4

Фотография конвективных ячеек на свободной поверхности и при наличии твердой прозрачной стеклянной верхней границы в горизонтальном невращающемся плоском слое (при $Ra=13864$, $t=108$ min, $h=6$ мм, при длине d^1 и ши -

рине d^2 стеклянной пластины соответственно $d^1 = 233$ мм, $d^2 = 168$ мм,
 $T_{\max} = 27,73^{\circ}\text{C}$, $T_{\min} = 24,92^{\circ}\text{C}$, T_{\max} – температура нижней границы,
 T_{\min} – температура верхней границы.

При наличии твердой верхней границы проявляется тенденция к образованию валовых структур, особенно при низких числах Рэлея. С увеличением надкритичности начинают проявляться неустойчивости различного рода и двумерные конвективные валы сильно искажаются.

Большой интерес представляют эксперименты со слегка наклоненным слоем (фиг.5). Если установку с плоским слоем небольшой толщины слегка наклонить, то в приподнятой части слоя толщина слоя жидкости может обращаться в нуль, а в опущенной части будет медленно увеличиваться и вблизи торца слоя может равняться, например, 6 мм. При этом в различных частях слоя конвекция развивается практически независимо, так как при малой толщине слоя жидкости в нем развивается порядка сотни ячеек, а удаленные ячейки взаимодействуют весьма слабо. Это дает возможность одновременно наблюдать эволюцию конвективных ячеек в широком диапазоне чисел Рэлея. Особенно это важно при дорогостоящих экспериментах, например, с применением тепловизора.



Фиг.5

Фотография конвективных ячеек на свободной верхней поверхности и при наличии твердой прозрачной стеклянной верхней границы слегка наклоненного плоского слоя (угол наклона к горизонтали составляет 0,01 радиана) при температурах нижней и верхней границах слоя соответственно $T_{\max}=37,67$ и $T_{\min}=31,58$, при максимальной толщине слоя 6 мм.

Подобные результаты можно наблюдать и при горизонтальной нижней границе со слегка наклонной прозрачной верхней. Для этой цели была изготовлена крепежная рамка для прозрачной стеклянной верхней стенки на регулируемых винтах, упирающихся в нижнюю стенку.

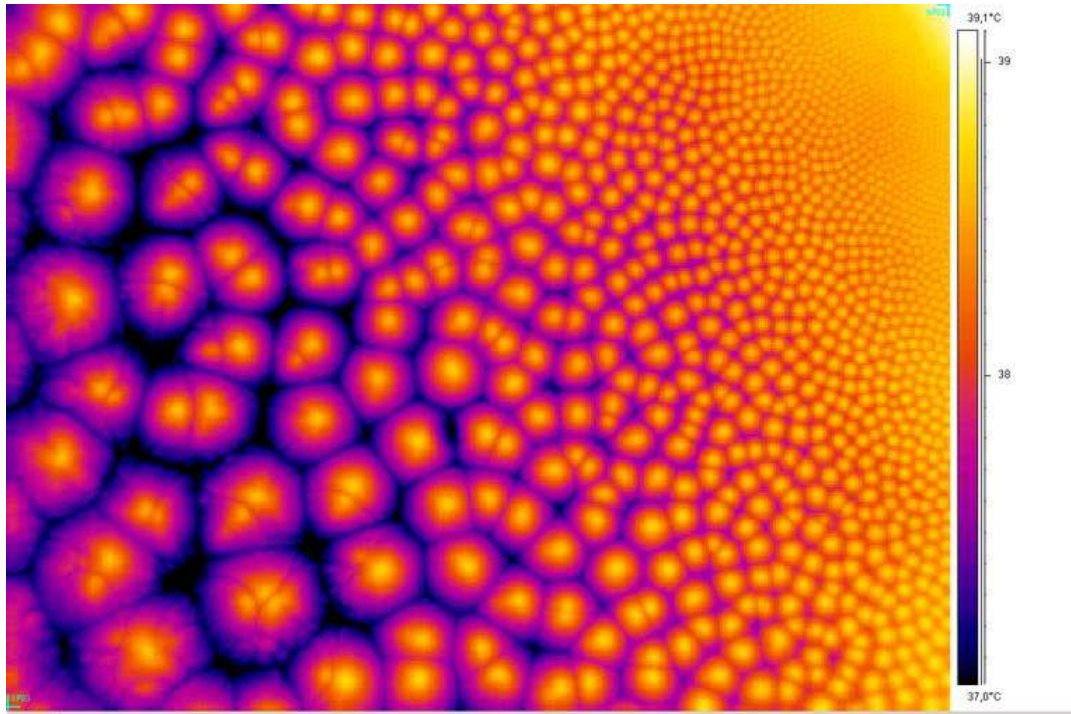
Любопытно, что при этом также имеется тенденция к образованию конвективных структур близких к конвективным валам. При свободной верхней границе, как и ранее, наблюдаются пространственные ячейки.

Аналогичные исследования были проведены также и с помощью тепловизора.

При работе использовался инфракрасный тепловизор TermaCAMTM SC3000 фирмы “FLIR Systems”, США, Швеция. Данная система работает в инфракрасной области электромагнитного спектра на длинах волн от 8 мкм. до 9 мкм., в диапазоне температур от -40°C до $+1500^{\circ}\text{C}$. Для измерения температуры на реальных объектах в тепловизоре предусмотрена возможность установки значения излучательной способности объекта. Максимальная относительная погрешность измерения составляет $\pm 2\%$ от предела измерения. Кадр содержит 320x240 точек, с разрешающей способностью по температуре $0,02^{\circ}\text{C}$ при 30°C . Угол поля зрения используемого в работе объектива $20^{\circ}\times 15^{\circ}$. Фиксируемые изображения сохраняются на PC-карте. Затем информация с этой карты перегружается в PC для последующего анализа с помощью программы TermaCAMTM Reseacher Pro 2.7.

Инфракрасный экран изготовлен из кристалла KCl толщиной 10 мм, спектральный коэффициент пропускания которого $\tau_{\lambda}\approx 0,9$ в диапазоне рабочих длин волн тепловизора (8-9 мкм). Инфракрасный экран использовался в качестве твердой стенки и позволял измерять температуру на поверхности жидкости.

Проведенные исследования выявили, в частности, наличие тонкой тепловой структуры в крупных конвективных ячейках, предшествующих их распаду (фиг.6). Причем, при визуализационном контроле над поверхностью верхнего слоя этих предвестников распада не наблюдается.



Фиг.6

Распределение температур на части свободной верхней границе плоского слоя, наклоненного к горизонтали под углом в 0,01 радиана.

Кроме того, полученные данные позволяют провести количественный анализ температурных полей, например, с помощью преобразования Фурье, получить сопоставление поведения температурных полей в случаях свободной и твердой верхней поверхностей и ряд других новых количественных исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении сформулированы основные результаты и выводы:

1. Выполнен комплекс исследований, направленный на восстановление и модернизацию уникальной высокоточной экспериментальной установки, созданной для изучения турбулентных конвективных структур в горизонтальном плоском слое жидкости, подогреваемой снизу и допускающей вращение относительно вертикальной оси.
2. Разработана методика анализа когерентных конвективных структур, основанная на визуализации пространственной формы вихревых структур с использованием лазерных ножей, цифровой видеосъемки, цифрового фотографирования, тепловизора и последующей обработки полученных числовых массивов на ПК.
3. Показано, что конвективные ячейки восстанавливаются (после их разрушения) на временах порядка минуты, хотя выход всей тепловой установки на установившийся режим требует многих часов. Установлено резкое уменьшение времен восстановления конвективных структур с нарастанием надкритичности, а также их сильное увеличение с ростом числа Тейлора и отношения толщины слоя к его диаметру.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах [1-7].

1. Н.С. Бухарин, П.С. Миневиц, М. Хаджимуса. Когерентные конвективные структуры в плоском вращающемся слое, эксперимент // Тез. докл. «Ломоносовские чтения». Изд. МГУ. 2005. С. 48.
2. П.С. Миневиц, А.А. Мнахов, М. Хаджимуса. Экспериментальное исследование турбулентных конвективных движений и когерентных структур в плоском горизонтальном слое жидкости, подогреваемом снизу и вращающемся относительно вертикальной оси // Тез. докл. «Ломоносовские чтения». Изд. МГУ. 2006. С. 75.
3. П.С. Миневиц, А.А. Мнахов, М. Хаджимуса. Экспериментальное исследование когерентных турбулентных структур на установке «Плоский слой» в широком диапазоне надкритичности // Материалы международной конференции «Нелинейные задачи теории гидродинамической неустойчивости и турбулентность». Изд. МГУ. 2006. С. 74-75.

4. П.С. Миневич, М. Хаджимуса. Турбулентные когерентные структуры, возникающие при неустойчивости горизонтального плоского слоя // Тез. докл. Всесоюзная конференция «Современные проблемы аэрогидродинамики» Буревестник. Изд. МГУ. 2005. С. 37.
5. П.С. Миневич, А.А. Мнахов, М. Хаджимуса. Когерентные турбулентные структуры в горизонтальном слое» // Тез. докл. Всесоюзная конференция «Современные проблемы аэрогидродинамики». Буревестник. Изд. МГУ. 2006. С. 69-70.
6. М. Хаджимуса. Экспериментальное исследование конвективных течений в плоском горизонтальном слое жидкости, подогреваемом снизу и вращающемся относительно вертикальной оси // Изв. РАН. МЖГ. 2007. № 2 (в печати).
7. М. Хаджимуса. Исследование конвективных ячеек в горизонтальном слое жидкости, подогреваемом снизу и вращающемся относительно вертикальной оси // Электронный журнал «Физико-химическая кинетика в газовой динамике». <http://www.chemphys.edu.ru> (Регистрационное свидетельство Эл. № 77-6360).

Хаджимуса Мхаммадали

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОНВЕКТИВНЫХ

КОГЕРЕНТНЫХ СТРУКТУР В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ СЛОЕ
ЖИДКОСТИ, ПОДОГРЕВАЕМОМ СНИЗУ И ВРАЩАЮЩЕМСЯ
ОТНОСИТЕЛЬНО ВЕРТИКАЛЬНОЙ ОСИ

Подписано к печати ... Заказ № ... Тираж ...

Формат 60×84 1/16 Бумага офсетная.

Печать офсетная ...