

ИНДЕКС УДК 532.516.013.4, 536.25

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

© М. Хаджимуса

НИИ Механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москваdmpn@mail.ru

Аннотация

Проведено экспериментальное исследование конвективных когерентных структур в плоском горизонтальном слое жидкости, подогреваемом снизу и допускающем вращение относительно вертикальной оси. Показано резкое уменьшение времен установления конвективных структур с ростом надкритичности. Вращение, наоборот, увеличивает времена установления. При увеличении отношения толщины слоя к его диаметру времена установления также увеличиваются.

INVESTIGATION OF CONVECTIVE STRUCTURES IN THE HORIZONTAL LIQUID LAYER HEATED UP FROM BELOW AND ROTATING ABOUT VERTICAL AXIS

Convective coherent structures are experimentally investigated for plane horizontal layer of fluid, heated from below. Rotation around vertical axis is possible. Abrupt decrease of time of stabilization of convective structures with the growth of supercriticality is shown. To the contrary, rotation increases the time of stabilization. With the growth of ration of the width to the diameter stabilization time also increases.

Одной из актуальных проблем теории гидродинамической неустойчивости является выявление особенностей и времен установления конвективных ячеек и тому 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 [1-3]. С другой стороны в ряде экспериментов [4] 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 [4-8].

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

1. Исследование проводилось на установке института механики МГУ, созданной Ю.Н. Беляевым и его коллегами [1].

Схема установки показана на рис. 1. Плоский слой жидкости I размещается в пространстве между медными дисками 2 и боковой стенкой из органического стекла. Диаметры дисков 2 $d = 490$ мм. Высота слоя может варьироваться от 5,5 мм до 60 мм.

Диски изготовлены из меди марки М-1 и имеют толщину 39 мм. Их поверхности обработаны на станке, а затем доведены 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.

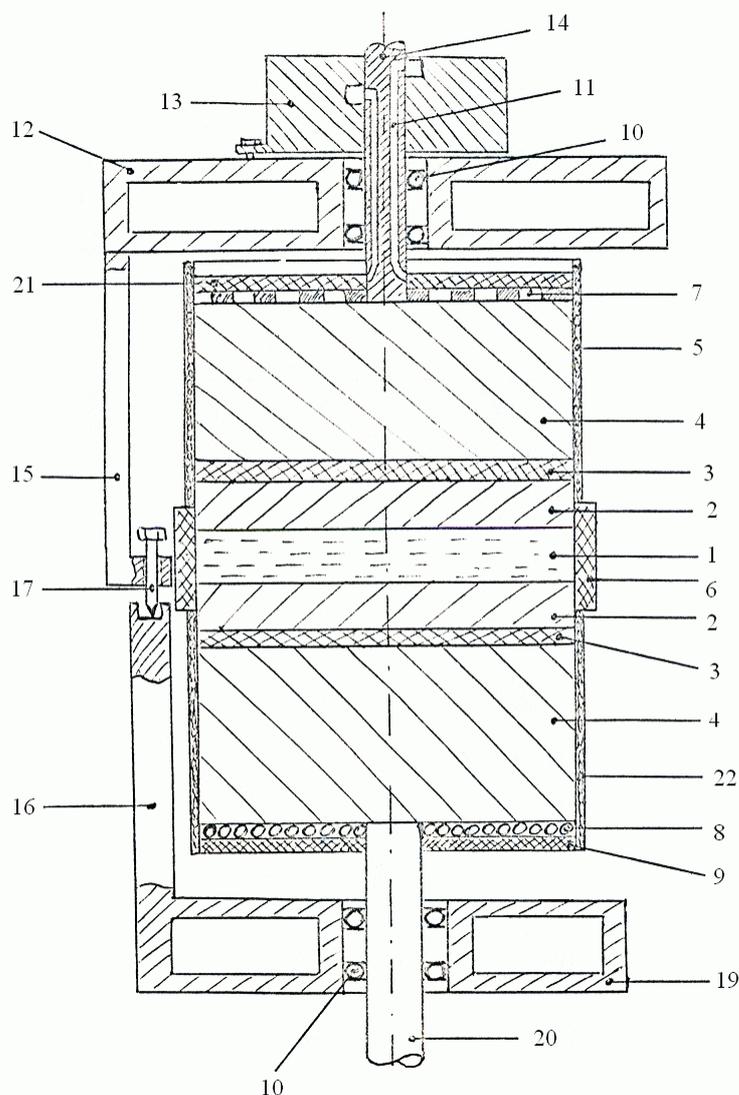


Рис. 1

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 с 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 Йогансона 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 специальной 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 $0,01^{\circ}\text{C}$.

Одним из важнейших параметров установки является равномерность распределения температуры на поверхности медных дисков. Измерения проводились в условиях, когда боковые поверхности блоков не были теплоизолированы, 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 контактным 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 МГСО 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 шайбами 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 шайбы. Между этой шайбой 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 Ф2-16, 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: $2 < Pr < 10000$, $0,1 \leq Ta \leq 10^9$, $10^2 \leq Ra \leq 10^8$, $10^{-3} \leq |R_0| \leq \infty$ ($R_0 = (\Omega_2 - \Omega_1)/\Omega_1$). 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 точностью.

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 ММТ-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 $6 \div 9$ 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.

2. 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 : $0 \leq Ta < 17000$ и аспектного отношения Γ : $10 \leq \Gamma < 100$

$$Ra = \alpha g h^3 \Delta T / \chi \nu, \quad Ta = 4 \Omega^2 h^4 / \nu^2,$$

$$Pr = \nu / \chi, \quad \Gamma = L / h,$$

(h – толщина слоя, L – диаметр слоя, g – ускорение силы тяжести, Ω – угловая скорость вращения, ν , χ и α – коэффициенты вязкости, температуропроводности и теплового расширения, ΔT – разность температур T_{\max} и T_{\min} , приложенных на границах слоя).

Полученные результаты показывают резкое уменьшение характерных времен установления с ростом надкритичности (рис. 2, кр. 1). И наоборот, существенное увеличение этих времен с ростом Ta (рис. 2, 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.

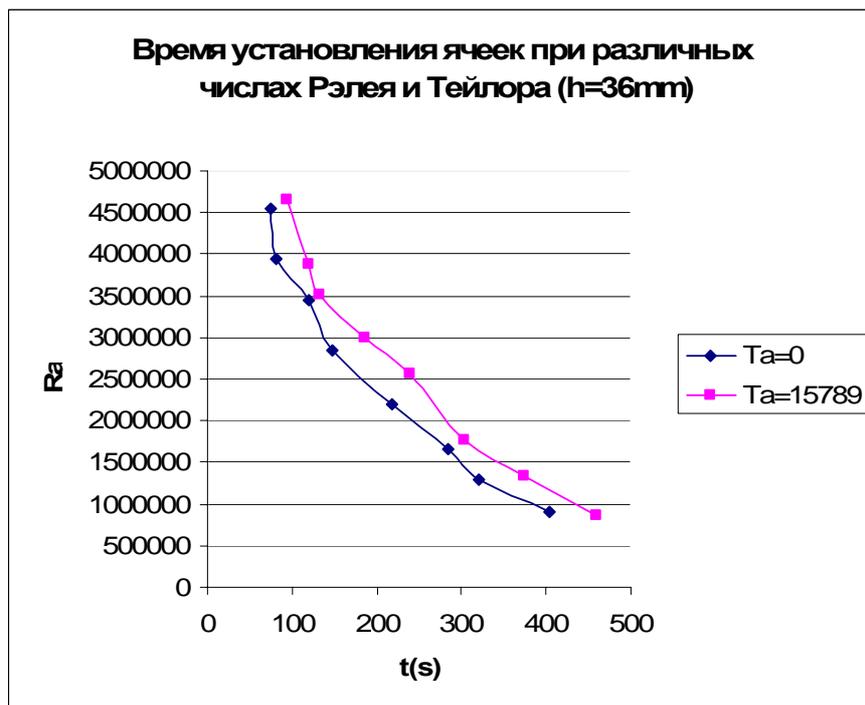


Рис. 2

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 видеофильм 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 рис. 3 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.

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.



Рис. 3

Большой интерес представляют эксперименты со слегка наклоненным слоем (рис. 4). 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 [9].



Рис. 4

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.

3. Аналогичные исследования были проведены также и с помощью тепловизора.

При работе использовался инфракрасный тепловизор TermaCAMTMSC3000 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 320×240 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 Reseach 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 (рис. 5). Причем, при визуализационном контроле над поверхностью верхнего слоя этих предвестников распада не наблюдается.

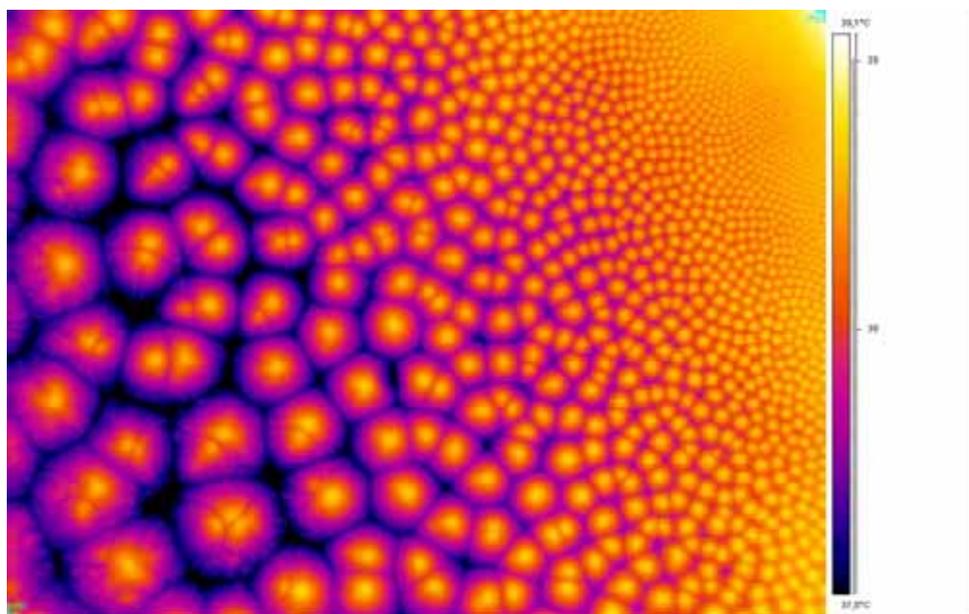


Рис. 5

Кроме того, полученные данные позволяют провести количественный анализ температурных полей, например, с помощью преобразования Фурье, получить сопоставление пове-

дения температурных полей в случаях свободной и твердой верхней поверхностей и ряд других новых количественных исследований.

В заключение сформулируем основные результаты и выводы:

Выполнен комплекс исследований, направленный на изучение когерентных турбулентных конвективных структур в горизонтальном плоском слое жидкости, подогреваемом снизу и допускающем вращение относительно вертикальной оси.

Разработана методика анализа когерентных турбулентных структур, основанная на визуализации пространственной формы вихревых когерентных структур с использованием лазерных ножей, цифровой видеосъемки, цифрового цветного фотографирования, тепловизора и последующей обработки полученных числовых массивов на ПК.

Установлено резкое уменьшение характерных времен формирования конвективных структур с увеличением надкритичности.

Показано сильное увеличение этих характерных времен с ростом числа Тейлора и с ростом отношения толщины слоя к его диаметру.

Литература

1. Беляев Ю.Н. Гидродинамическая неустойчивость и турбулентность в сферическом течении Куэтта. М. Из-во МГУ, 1987, 348с.
2. Герценштейн С.Я. Нелинейные задачи теории гидродинамической устойчивости. М. Из-во МГУ, 2001, 260с.
3. Полежаев В.И. Гидромеханика, тепло и массообмен при росте кристаллов. Итоги науки и техники // Механика жидкости и газа, Т.18, М.:ВИНИТИ, 1984, С.198–269.
4. Гетлинг А.В. Конвекция Рэлея – Бенара. М., Эдиториал УРСС, 1999, 248с.
5. Рабинович М.И., Езерский А.Б. Динамическая теория формообразования. М. Из-во «Янус-К», 1998, 192с.
6. Езерский А.Б., Кияшко С.В., Матусов П.А., Рабинович М.И. Динамика доменов в параметрически возбуждаемой капиллярной ряби // Изв. Вузов. Нелинейная и прикладная динамика, 1994, Т.2, №2, С.64–72.
7. Езерский А.Б., Кияшко С.В., Назаровский А.В. Связанные состояния топологических дефектов в параметрически возбуждаемой капиллярной ряби. Препринт №496, ИПФ РАН, 1999, 27с.
8. Афенченко В.О., Кияшко С.В. Движение фронта при конкуренции роликовых доменов. Препринт №649, ИПФ РАН, 2003, 31с.
9. Бердников В.С., Гришков В.А., Марков В.А., Пшеничников Ю.М. Тепловая гравитационно-капиллярная конвекция в подогреваемых снизу горизонтальных слоях жидкости. XXVII Сибирский теплофизический семинар. Изд-во Института теплофизики СО РАН, 2004, С.1–19.