

УДК 536.252

А. В. Евграфова<sup>1,2</sup>, А. Н. Сухановский<sup>1</sup>, Е. Н. Попова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт механики сплошных сред УрО РАН, Россия,  
614013, Пермь, ул. Акад. Королёва, 1, E-mail: [eav@icmm.ru](mailto:eav@icmm.ru)

<sup>2</sup>Пермский государственный научно-исследовательский университет, Россия,  
614990, Пермь, ул. Букирева, 15

## ВТОРИЧНЫЕ КОНВЕКТИВНЫЕ СТРУКТУРЫ В НЕОДНОРОДНО НАГРЕТОМ ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ СЛОЕ ЖИДКОСТИ

### АННОТАЦИЯ

Данная работа посвящена исследованию формирования крупномасштабного течения в цилиндрическом слое жидкости при наличии на дне локализованного источника тепла. Показано, что формирование слоя с неустойчивой стратификацией температуры, над областью нагрева, приводит к возникновению вихревых вторичных течений. Проведено исследование динамики и характеристик вторичных конвективных структур в широком диапазоне управляющих параметров.

### КОНВЕКЦИЯ, ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ, ВТОРИЧНЫЕ СТРУКТУРЫ

### ВВЕДЕНИЕ

В природе и в различных технологических процессах на фоне крупномасштабной циркуляции часто наблюдается формирование вторичных течений в виде горизонтальных валов, оси которых могут быть направлены как вдоль основного потока, так и поперек. Интерес к изучению вторичных течений сильно возрос в связи со свидетельствами их образования в атмосферном пограничном слое [1]. В работах [2 – 3] было показано, что валы – это характерные структуры пограничных слоев циклонов и ураганов, которые оказывают существенное влияние на тепломассообмен между водой и воздухом. Несмотря на постоянный мониторинг за процессами в океане и атмосфере, большое разнообразие наблюдаемых явлений делает чрезвычайно сложным выделение основных параметров и механизмов, определяющих генезис вихревых структур и течений в атмосфере и океане. В тоже время метод математического моделирования динамических процессов в океане и атмосфере обладает целым рядом ограничений. В связи с этим растет значимость лабораторного моделирования геофизических течений.

Экспериментально продольные валы были обнаружены впервые в пограничном слое над нагретой наклонной пластиной [4]. В ряде работ рассматривалось образование спиральных структур, вызванных конвективной неустойчивостью в вынужденном течении в плоских горизонтальных каналах [5 – 6]. В случае свободной конвекции такой вид структур был исследован в работах, посвященных анализу устойчивости адвективных течений, вызванных неоднородным подогревом полостей с различной геометрией. В [7, 8] вторичные течения возникают в прямоугольной полости при наличии на дне ступенчатого перепада температур. В цилиндрическом слое жидкости горизонтальные валы впервые наблюдались

над локализованным источником тепла в работе [9], посвященной лабораторному моделированию тропических циклонов.

Цель данной работы – детальное исследование формирования вторичных структур в цилиндрическом слое жидкости с локальным подогревом в центре, на установке подробно описанной в [8], с использованием современных систем измерений.

## ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Рабочая кювета представляет 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 использовалась полиметилсилоксановая жидкость (силиконовое масло) с кинематической вязкостью при  $25^{\circ}\text{C}$  – 20сСт. 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 3 см.

Температура масла в кювете измерялась при помощи медь-константановых термопар с диаметром спая не более 0,2 мм и диаметром проводов 0,1 мм. Данные с термопар передавались на систему сбора данных Agilent, с 20 канальным мультиплексором. Контроль за частотой измерений и временем приема данных реализован программным обеспечением Agilent BenchLink Data Logger 3.

Для измерения двух (горизонтальных) компонент скорости используется измерительная система PIV «Полис», разработанная и изготовленная в Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН (г. Новосибирск). Схематично вид установки, а также расположение системы координат представлены на рис. 1.

В качестве безразмерного параметра использовано потоковое число Рэлея, определенное через радиус нагревателя и мощность нагрева.

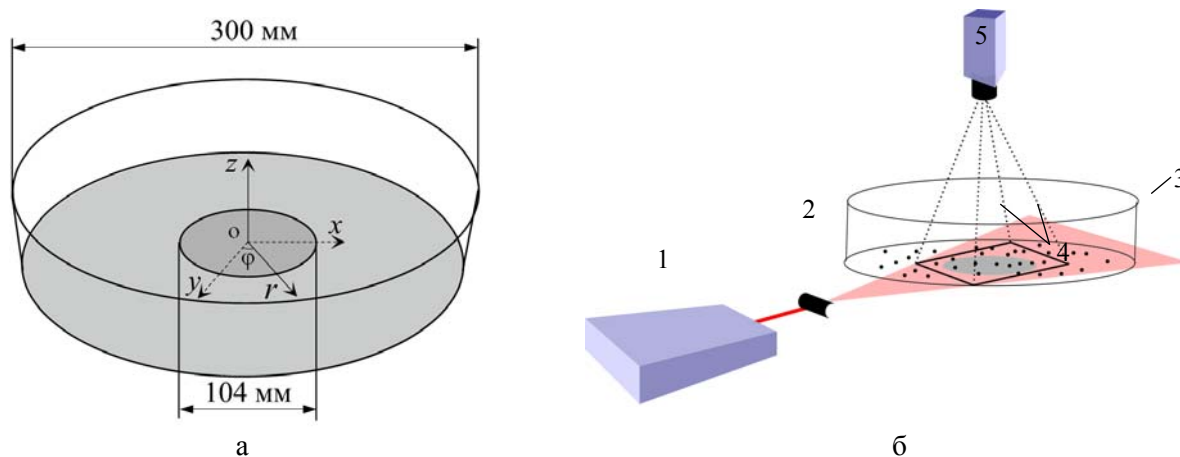


Рис. 1. Вид экспериментальной установки и расположение системы координат (а); схема измерения скоростей (б): 1 – лазер, 2 – оптическая насадка, 3 – лазерный нож, 4 – светоотражающие частицы, 5 – цифровая видеокамера

## РЕЗУЛЬТАТЫ

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. Помимо экспериментов, была проведена серия расчетов

в CFD пакете Fluent. Описание математической модели подробно приведено в [10], где также проведено сравнение численных и экспериментальных результатов. Векторное поле скорости, приведенное на рис. 2 и полученное численно, демонстрирует структуру основного течения.

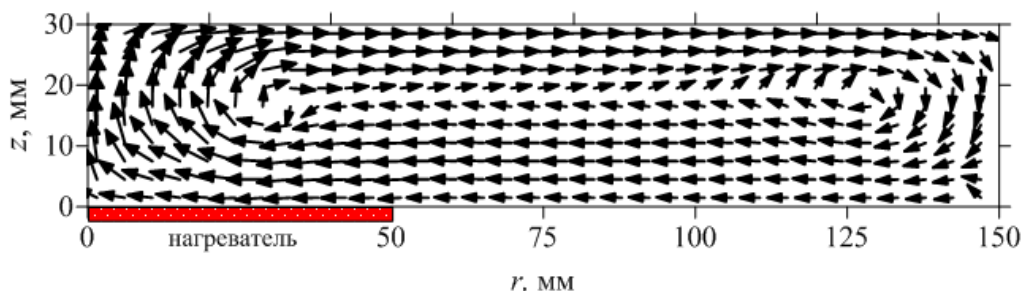


Рис. 2. Векторное поле скорости

В области подогрева вблизи дна кюветы устанавливается температурный пограничный слой с неустойчивой стратификации плотности жидкости: температура с увеличением высоты уменьшается, так что вверху пограничного слоя находится более тяжелая жидкость по сравнению с той, которая у дна кюветы.

В пограничном слое вследствие неоднородности температуры, по высоте, создаются все условия для образования ориентированных определенным образом конвективных валов. Развивающиеся на фоне основного течения, эти валы входят в класс так называемых вторичных структур, форма и размер которых определяется формой нагревателя и характеристиками пограничного слоя.

При малых нагревах формируется конвективный вал в виде спирали, который сносится конвергентным течением к центру кюветы (рис. 3, а). Увеличение нагрева приводит к разрушению спирали и образованию более сложной структуры, которая представляет собой суперпозицию валов, ориентированных в радиальном направлении и спирального вала,двигающегося к центру нагревателя. Сосуществование этих двух видов структур видно также на фотографиях, полученных при засевании потока алюминиевой пудрой (рис. 3, в, г).

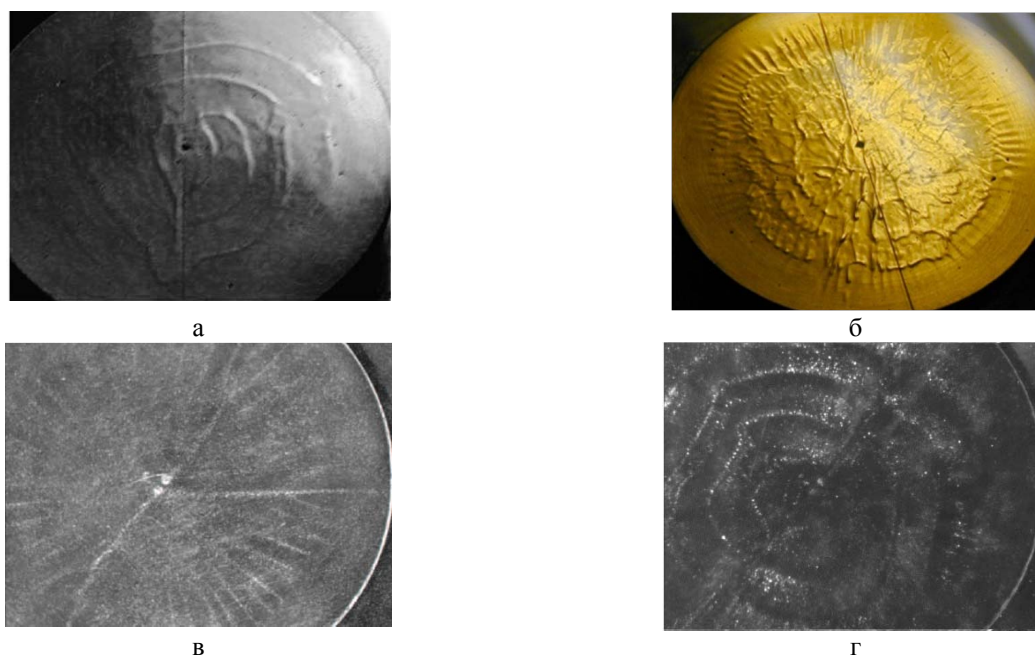


Рис. 3. Виды вторичных структур над нагревателем: а –  $Ra = 7,2 \cdot 10^6$ ; б –  $Ra = 40 \cdot 10^6$ ; в – радиальные структуры  $Ra = 14 \cdot 10^6$ ; г – поперечное возмущение  $Ra = 14 \cdot 10^6$

Мгновенные поля радиальной скорости непосредственно над нагреваемой областью (рис. 4) подтверждают визуальные наблюдения наличием четко выраженной вторичной структуры, поперечной к основному течению. При малых нагревах структура имеет форму неправильного кольца. При увеличении нагрева кольцо перестраивается в спираль, причем при увеличении мощности нагрева поле радиальной скорости представляет собой суперпозицию двух спиралей, концы которых находятся на противоположных концах представленного поля. При сильных нагревах структура вторичных течений усложняется.

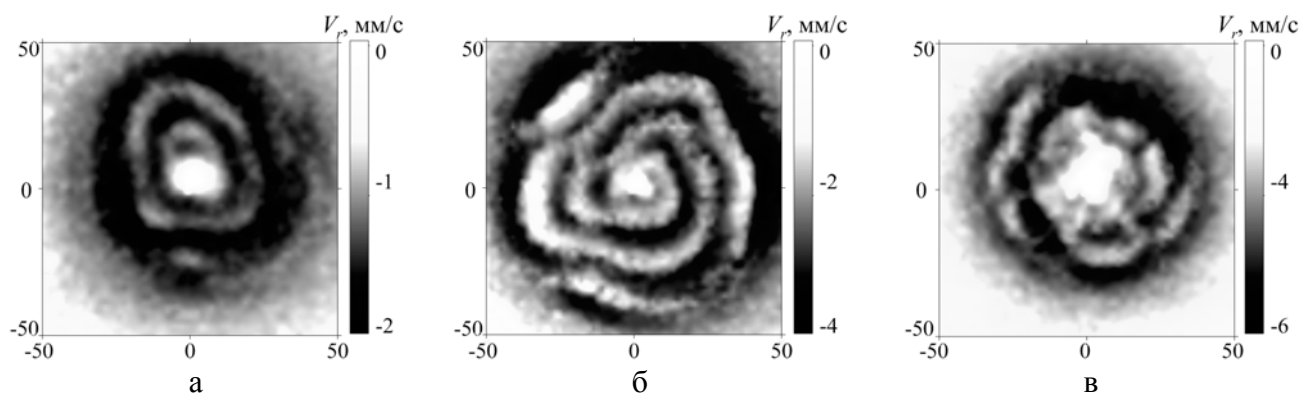


Рис. 4. Мгновенные поля радиальной скорости над нагревателем  $z=3$  мм: а)  $Ra = 7,2 \cdot 10^6$ , б)  $Ra = 21 \cdot 10^6$ , в)  $Ra = 32 \cdot 10^6$

Особый интерес представляет собой характер формирования вторичных структур, а именно периодичность их образования. При движении к центру нагревателя конвективный вал приводит к возмущению не только поля скорости, но и температуры. Причем частоты их флуктуаций совпадают. Частота образования вторичных структур не зависит от радиальной координаты и растет с увеличением нагрева. На рис. 5 представлена зависимость частоты пульсаций радиальной скорости от числа Рэлея.

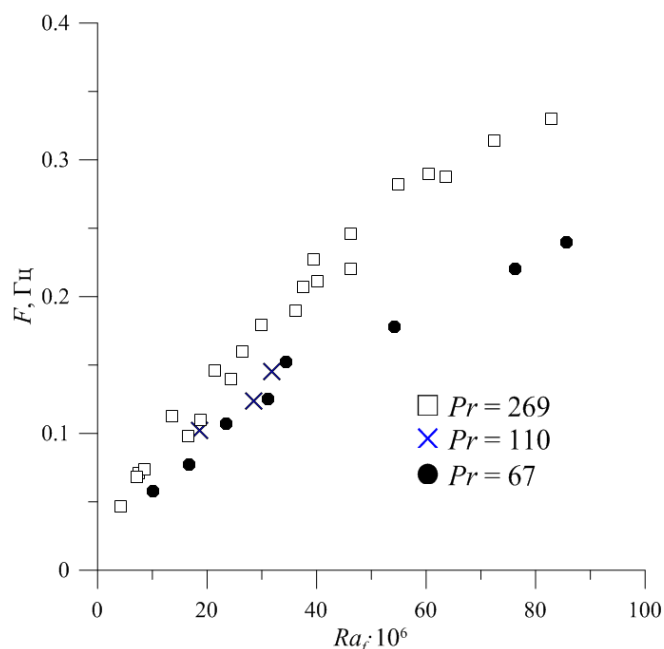


Рис. 5. Зависимость частоты образования вторичных структур от потокового числа Рэлея

При малых надкритичностях рост частоты формирования вторичных течений носит универсальный характер для различных жидкостей. Увеличение нагрева приводит к смене режима движения жидкости для малых чисел Прандтля, о чем свидетельствует различие между кривыми на рис. 5.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено экспериментальное и численное исследование формирования конвективных структур над локализованным источником тепла для жидкостей с различным значением числа Прандтля. Основное течение, занимающее весь объем полости, приводит к образованию пограничного слоя с неустойчивой стратификацией и формированию системы вторичных, конвективных течений. Обнаружены поперечные валы, переход от поперечных валов к радиальным, и, при дальнейшем росте нагрева, к суперпозиции радиальных и поперечных структур. Показано, что для широкого интервала параметров образование поперечных структур происходит периодически с характерной частотой, зависящей от числа Рэлея.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 14-01-96011.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Brown R. A., Etling D.** Roll vortices in the planetary boundary layer: A review // *Boundary – Layer Meteor.* 1993. V. 65. № 3. P. 215-248.
2. **Morrison I., Businger S., Marks F.** An Observational Case for the Prevalence of Roll Vortices in the Hurricane Boundary Layer // *Journal of Atmospheric Sciences.* 2005. Vol. 62. P. 2662–2673
3. **Zhang J.A., Katsaros K.B.** Black Effects of Roll Vortices on Turbulent Fluxes in the Hurricane Boundary Layer // *Boundary-Layer Meteorology.* 2008. Vol. 128. P. 173–189
4. **Sparrow E. M., Husar R. B.** Longitudinal vortices in natural convection flow on inclined plates // *J. Fluid Mech.* 1969. V. 37. Pt 2. P. 251-255.
5. **Incropera F. P., Knox A. L. and Maughan J. R.** Mixed-convection flow and heat transfer in the entry region of a horizontal rectangular duct // *Journal of Heat Transfer.* 1987. Vol. 109, P. 434 – 439.
6. **Benderradji A., Haddad A., Taher R.** Characterization of fluid flow patterns and heat transfer in horizontal channel mixed convection // *Heat and Mass Transfer.* 2008. Vol. 44. P. 1465–1476.
7. **Баталов В. Г., Сухановский А. Н., Фрик П. Г.** Экспериментальное исследование спиральных валов в адвективном потоке, натекающем на горячую горизонтальную поверхность // *МЖГ.* № 4-2007. С. 39-49.
8. **Sukhanovsky A., Batalov V., Teymurazov A., and Frick P.** Horizontal rolls in convective flow above a partially heated surface // *The European Physical Journal B - Condensed Matter and Complex Systems*, Volume 85, Number 1 (2012), pp. 1-12. DOI:10.1140/epjb/e2011-20420-7.
9. **Богатырев Г.П.** Возбуждение циклонического вихря или лабораторная модель тропического циклона // *Письма в ЖЭТФ.* 1990. Т. 51, вып. 11. С. 557-559.
10. **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, №4, С. 451-459

A. V. Evgrafova<sup>1,2</sup>, A. N. Sukhanovskii<sup>1</sup>, E. N. Popova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Institute of Continuous Media Mechanics, Russia,  
Perm, Korolyov, 1, 614013, E-mail: eav@icmm.ru*

<sup>2</sup> *Perm State University, Russia, 614990, Perm, Bukireva street, 15.*

## **SECONDARY CONVECTIVE STRUCTURES OVER DISCRETE HEAT SOURCE IN A CYLINDRICAL FLUID LAYER**

*Convection over localized heat source in a cylindrical layer was studied experimentally for fluids with different values of Prandtl number. Basic flow produced by horizontal temperature gradient occupies the whole layer and leads to the unstable temperature stratification over the heating area and formation of complex system of secondary flows. The main focus of our study was spatial and temporal evolution of small-scale convective structures. Transition from transverse rolls to radial rolls and further to their superposition was observed and studied in details. It was found that transverse rolls appears periodically for a wide range of governing parameters. Physical interpretation of secondary flows formation is proposed.*

CONVECTION, BAUNDARY LAYER, SECONDARY STRUCTURES