

ВИХРЕВЫЕ СТРУКТУРЫ РАЗЛИЧНЫХ МАСШТАБОВ В НЕПОДВИЖНОМ И ВРАЩАЮЩЕМСЯ СЛОЕ ЖИДКОСТИ С ЛОКАЛИЗОВАННЫМ НАГРЕВОМ*

А.Н. Сухановский, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

А.Ю. Васильев, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

А.В. Евграфова, *Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермский государственный национальный исследовательский университет*

Е.Н. Попова, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

Р.А. Степанов, *Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермский национальный исследовательский политехнический университет*

А.С. Теймуразов, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

А.М. Павлинов, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

Проведено исследование формирования вихревых структур различных масштабов в неподвижном и вращающемся слое жидкости с локализованным источником тепла. В области подогрева вблизи дна кюветы образуется температурный пограничный слой, в котором формируются вторичные структуры. В широком диапазоне управляющих параметров вторичные течения представляют собой суперпозицию радиальных конвективных валов, направленных по направлению основной циркуляции и поперечного возмущения, сносимого к центру. Формирование поперечных структур носит периодический характер с частотой, которая растет с увеличением нагрева. Интенсивный циклонический вихрь в центральной части полости существует в достаточно узком диапазоне управляющих параметров. Уменьшение вязкости, рост нагрева или скорости вращения сначала приводят к потере осесимметричности вихря, а затем к его распаду. Показано, что потеря устойчивости циклонического вихря связана с перестройкой структуры радиального течения.

Ключевые слова: *циклонический вихрь, локализованный нагрев, вращение, PIV, FlowVision, угловой момент.*

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] показано, что валы – это характерные структуры пограничных слоев циклонов и ураганов, которые оказывают существенное влияние на теплообмен между водой и воздухом. Несмотря на постоянный мониторинг за процесса-

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

ми 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 то же 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 жидко-

сти с локальным подогревом в центре на установке, подробно описанной в [8], с использованием современных систем измерений.

Экспериментальная установка 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. Стенд обеспечивал равномерное вращение в широком диапазоне угловых скоростей.

В качестве рабочей жидкости использовалась полиметилсилоксановая жидкость (силиконовое масло) с кинематической вязкостью при 25°C 20 сСт. 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 измерялась при помощи медь-константановых термопар. Для измерения двух (горизонтальных) компонент скорости использована измерительная система PIV «Полис». Схематично вид установки, а также расположение системы координат представлены на рис. 1.

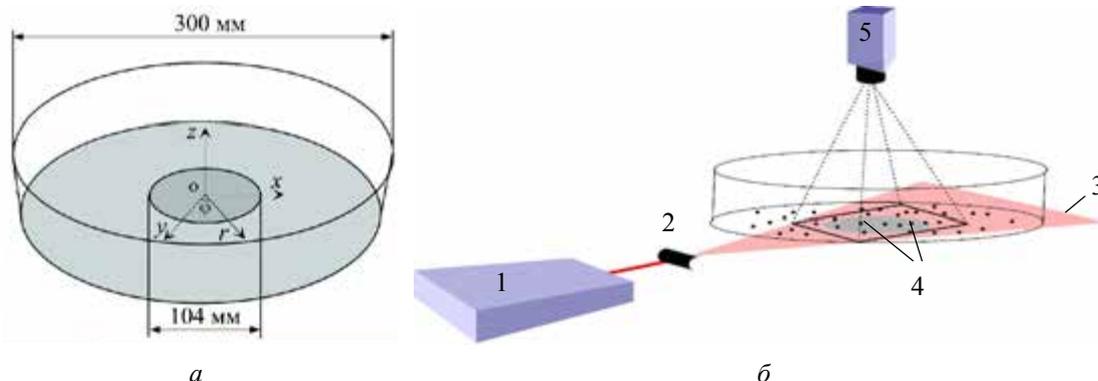


Рис. 1. Вид экспериментальной установки и расположение системы координат (а); схема измерения скоростей (б): 1 – лазер, 2 – оптическая насадка, 3 – лазерный нож, 4 – светоотражающие частицы, 5 – цифровая видеокамера

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. Векторное поле скорости, приведенное на рис. 2 и полученное численно, демонстрирует структуру основного течения.

В области подогрева вблизи дна кюветы устанавливается температурный пограничный слой с неустойчивой стратификацией 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 определяет

ся 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. Существование этих двух видов структур видно также на фотографиях, полученных при засевании потока алюминиевой пудрой (рис. 3, в, з).

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 его концах. При сильных нагре-

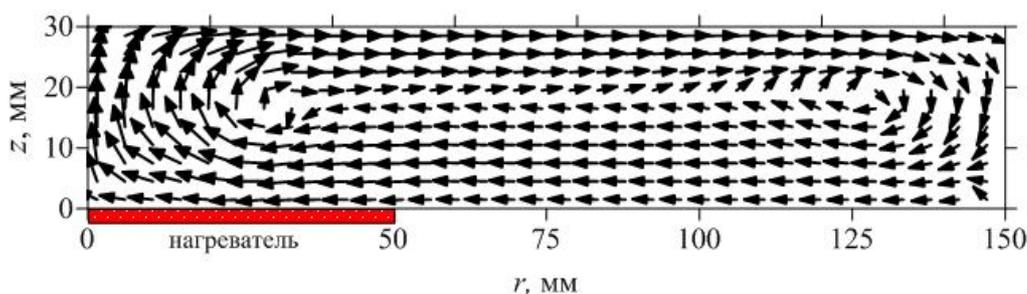


Рис. 2. Векторное поле скорости

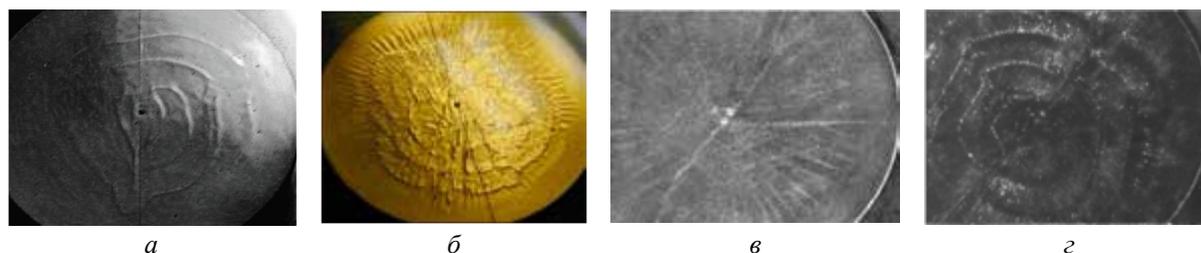


Рис. 3. Виды вторичных структур над нагревателем: $Ra = 7,2 \cdot 10^6$ (а); $Ra = 40 \cdot 10^6$ (б); радиальные структуры $Ra = 14 \cdot 10^6$ (в); поперечное возмущение $Ra = 14 \cdot 10^6$ (з)

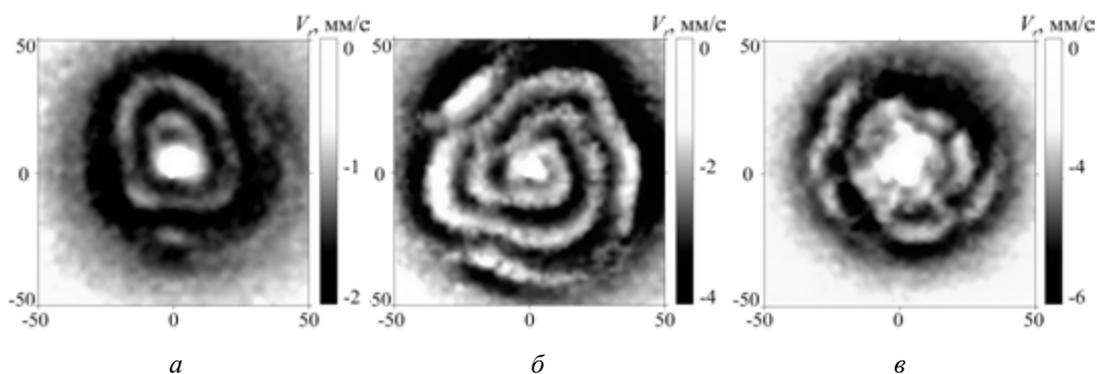


Рис. 4. Мгновенные поля радиальной скорости над нагревателем $z=3$ мм:
 $Ra = 7,2 \cdot 10^6$ (а), $Ra = 21 \cdot 10^6$ (б), $Ra = 32 \cdot 10^6$ (в)

вах структура вторичных течений усложняется.

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.

При малых надкритичностях рост частоты формирования вторичных течений

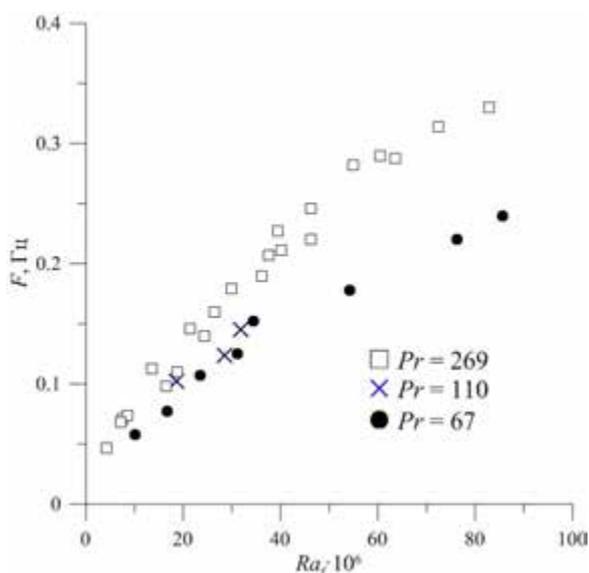


Рис. 5. Зависимость частоты образования вторичных структур от потокового числа Рэлея

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.

Сила Кориолиса, действуя на радиальные течения, приводит к образованию азимутальных движений. В центре формируется интенсивный циклонический вихрь, а на периферии – относительно слабое антициклоническое течение (рис. 6).

Измерения показали, что структура течений подобна типичной структуре тропического циклона, построенной на основе натуральных наблюдений и численных расчетов, включая наличие мелко-масштабных валов в пограничном слое. Характеристики вихря были изучены для различных значений кинематической вязкости, скорости вращения и мощности нагрева. Обнаружено, что малые вариации скорости вращения способны приво-

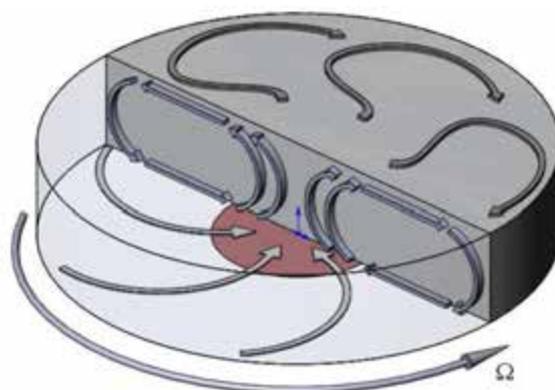


Рис. 6. Схема конвективных течений

дить к существенной перестройке структуры вихря [10].

Выводы

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 стратифи-

кацией 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.

Библиографический список

1. *Brown R.A., Etling D.* Roll vortices in the planetary boundary layer: A review // *Boundary-Layer Meteorology*. – 1993. – Vol. 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. – Vol. 37. – Pt. 2. – P. 251–255.
5. *Incropera F.P., Knox A.L., 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 // *Изв. РАН. МЖГ*. – 2007. – № 4. – С. 39–49.
8. *Sukhanovsky A., Batalov V., Teymurazov A., Frick P.* Horizontal rolls in convective flow above a partially heated surface // *The European Physical Journal B – Condensed Matter and Complex Systems*. – 2012. – Vol. 85. – № 1. – P. 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. *Sukhanovskii A., Evgrafova A., Popova E.* Laboratory study of a steady-state convective cyclonic vortex // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. – 2016. – Vol. 142. – Is. 698. – P. 2214–2223. DOI: 10.1002/qj.2823.

VORTICAL STRUCTURES OF DIFFERENT SCALES IN A NON-ROTATING AND ROTATING LAYER OF FLUID WITH LOCALIZED HEATING

A.N. Sukhanovskii¹, A.Yu. Vasiliev¹, A.V. Evgrafova^{1,3}, E.N. Popova¹,
R.A. Stepanov^{1,2}, A.S. Teymurazov¹, A.M. Pavlinov¹

¹ *Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS*

² *Perm National Research Polytechnic University*

³ *Perm State National Research University*

A study of vortical structures of different scales in a rotating and non-rotating layer of fluid with localized heating was carried out. In the heating area near the bottom a layer with unstable stratification is formed. The unstable stratification leads to the formation of secondary flows. In a wide range of governing parameters secondary flows appear as a superposition of radial and transverse rolls. The formation of secondary flows is a periodic process, the frequency increases along with a heating. An intensive cyclonic vortex exists in a short interval of the governing parameters. A decrease of viscosity, an increase of heating or angular velocity lead to asymmetry of

the vortex and further to its breakdown. It was shown that instability of the vortex is strongly connected with a change of the structure of radial flow.

Keywords: cyclonic vortex, localized heating, rotation, PIV, FlowVision, angular momentum.

Сведения об авторах

Сухановский Андрей Николаевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории физической гидродинамики, Институт механики сплошных сред УрО РАН (ИМСС УрО РАН), 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1; e-mail: san@icmm.ru

Васильев Андрей Юрьевич, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории физической гидродинамики, ИМСС УрО РАН; e-mail: vasiliev.a@icmm.ru

Евграфова Анна Валерьевна, младший научный сотрудник лаборатории физической гидродинамики, ИМСС УрО РАН; ассистент кафедры общей физики, Пермский государственный национальный исследовательский университет (ПГНИУ), 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15; e-mail: eav@icmm.ru

Попова Елена Николаевна, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории физической гидродинамики ИМСС УрО РАН; e-mail: popovadu@icmm.ru

Степанов Родион Александрович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории физической гидродинамики ИМСС УрО РАН; профессор кафедры математического моделирования систем и процессов, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ), 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: rodion@icmm.ru

Теймуразов Андрей Сергеевич, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории физической гидродинамики ИМСС УрО РАН; e-mail: tas@icmm.ru

Павлинов Александр Михайлович, аспирант лаборатории физической гидродинамики ИМСС УрО РАН; e-mail: pam@icmm.ru

Материал поступил в редакцию 21.10.2016 г.