

**РОЗДІЛ I. ПРИРОДА, ТЕОРІЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ
МЕЗОМЕТЕОРОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ**
(SECTION I. NATURE, THEORY AND MODELLING OF MESOSCALE
METEOROLOGICAL PROCESSES)

УДК 550.3

В.Г. Баталов, к.ф.–м.н., А.Н. Сухановский, к.ф.–м.н., П.Г. Фрик, д.ф.–н., проф.
Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

**ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АТМОСФЕРНОЙ МЕРИДИОНАЛЬНОЙ
ЦИРКУЛЯЦИИ И ЭФФЕКТ СУПЕРРОТАЦИИ**

Аннотация. Экспериментально исследована эволюция крупномасштабного азимутального поля скорости во вращающемся цилиндрическом слое жидкости (радиус 150 мм, глубина 30 мм) при наличии меридиональной циркуляции. Два случая были рассмотрены: прямая циркуляция с меридиональным течением к оси вращения в верхней части слоя, возбуждаемая нагревом на периферии и обратная циркуляция с меридиональным течением от оси вращения в верхней части слоя, обеспечиваемая нагревом в центре. Благодаря силе Кориолиса меридиональное течение формирует азимутальное движение. Детальная трехмерная структура поля скорости была восстановлена с использованием метода PIV для большого интервала значений чисел Грасгофа. Было показано, что зависимость энергии меридиональной циркуляции от числа Грасгофа для обоих типов циркуляции (ячеек) подобна. Меридиональная циркуляция и вязкие взаимодействия на твердой границе приводят к существенному изменению интегрального углового момента слоя жидкости. Прямая меридиональная циркуляция приводит к росту интегрального углового момента, а обратная к его уменьшению.

Ключевые слова: суперротация, меридиональная циркуляция, дифференциальное вращение, момент импульса.

1 Введение

Интерес к исследованию дифференциального вращения (ДВ) во вращающихся слоях обусловлен изучением крупномасштабных атмосферных потоков. ДВ является частью глобальной атмосферной циркуляции, которая в значительной степени определяет формирование климата. Основной причиной возникновения крупномасштабных движений в атмосфере являются горизонтальные градиенты температуры, то есть крупномасштабные движения имеют конвективную природу. Анализ интегральных характеристик ДВ для атмосфер различных планет показал, что атмосфера в целом может опережать движение планеты, это явление было названо глобальной суперротацией. Проблема напрямую связана с диффузией и транспортом углового момента в атмосфере. В [1] было сделано предположение, что перенос углового момента в основном происходит за счет меридиональной циркуляции и горизонтальной диффузии. Распределение углового момента и суперротация во вращающемся цилиндрическом канале были численно исследованы в [2]. Было показано, что суперротация определяется граничными условиями на стенках канала.

В данной работе мы возвращаемся к экспериментальному исследованию конвективного течения во вращающемся плоском цилиндрическом слое с применением современных измерительных методов.

2 Лабораторная установка и методика измерений

На рис. 1 изображена экспериментальная установка. Для измерения полей скорости использовалась система PIV «Полис», разработанная и изготовленная в

Институте Теплофизики СО РАН. Система включает в себя двойной импульсный Nd-YaG лазер, блок управления, цифровую видеокамеру и компьютер. Синхронизация работы лазера и видеокамеры, измерения и обработка результатов производились при помощи программного пакета Actual Flow, разработанного в ИТ СО РАН. Методом PIV, измерялись поля скорости в жидкости (1) во вращающемся прозрачном цилиндре (2) диаметром 300 мм, изготовленном из оргстекла. Толщина слоя жидкости во всех экспериментах составляла 30 мм, поверхность была открытой. В качестве рабочей жидкости использовалось трансформаторное масло. Угловая скорость вращения цилиндра была постоянна и равнялась 0.069 с^{-1} с точностью 0.002 с^{-1} . Вращение осуществлялось при помощи редуктора с коллекторным электродвигателем (3). Локализованный поток тепла осуществлялся при помощи электрических нагревателей. Один из нагревателей (4) располагался заподлицо с дном в центральной зоне таким образом, что ось вращения системы проходила через его центр. Диаметр нагревателя составлял 105 мм. Второй (5) в виде кольца шириной 20 мм располагался по периферии модели.

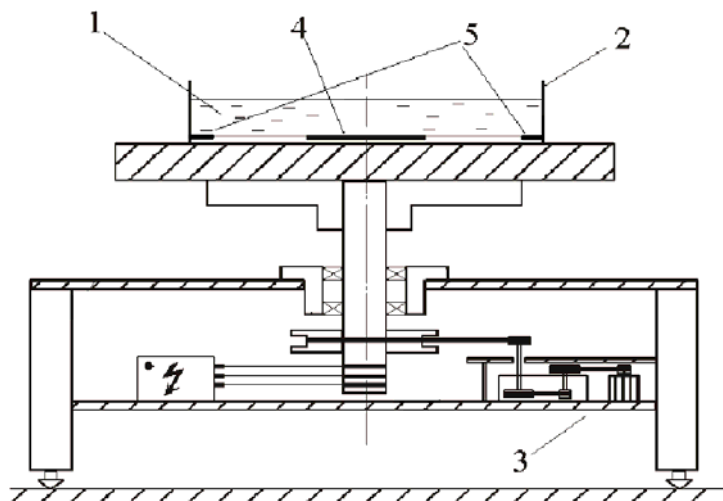


Рис. 1 – Экспериментальная установка.

В случае подогрева жидкости на периферии, в модели устанавливалась прямая меридиональная ячейка, схематически изображенная на рис. 2 (слева), с подъемным течением над нагревателем и опускным в центральной области модели. В случае подогрева жидкости в центре модели, устанавливался режим течения, схематически

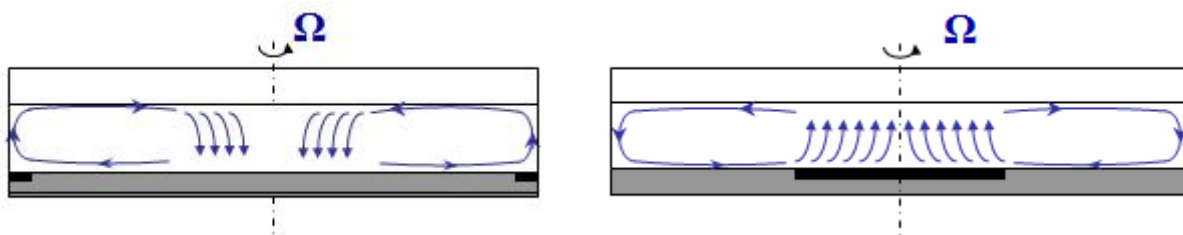


Рис. 2 – Схематичное изображение прямой (слева) и обратной (справа) конвективных меридиональных ячеек.

изображенный на рис. 2 (справа), с подъемным течением в центре и опускным на периферии – обратная меридиональная ячейка. Контролируемыми параметрами эксперимента, определявшими течение в слое, были скорость вращения кюветы и мощность нагревателя, но для описания наблюдаемых режимов и обобщения результатов удобнее пользоваться безразмерными параметрами.

Для характеристики вращения использовалось число Экмана: $E = \nu/2\Omega h^2$. В качестве характеристики величины нагрева использовалось число Грасгофа, определяемое через поток тепла от нагревателя следующим образом: $Gr_f = g\beta h^4 q / c\rho\chi\nu^2$, где g - ускорение свободного падения, β – коэффициент объемного расширения трансформаторного масла, h – толщина слоя, q – поток тепла ($q = P/S$, где P - мощность нагревателя, S – его площадь), c – теплоемкость, χ - коэффициент температуропроводности, ν – коэффициент кинематической вязкости. Зависимость числа Грасгофа от мощности нагрева показана на рис. 3.

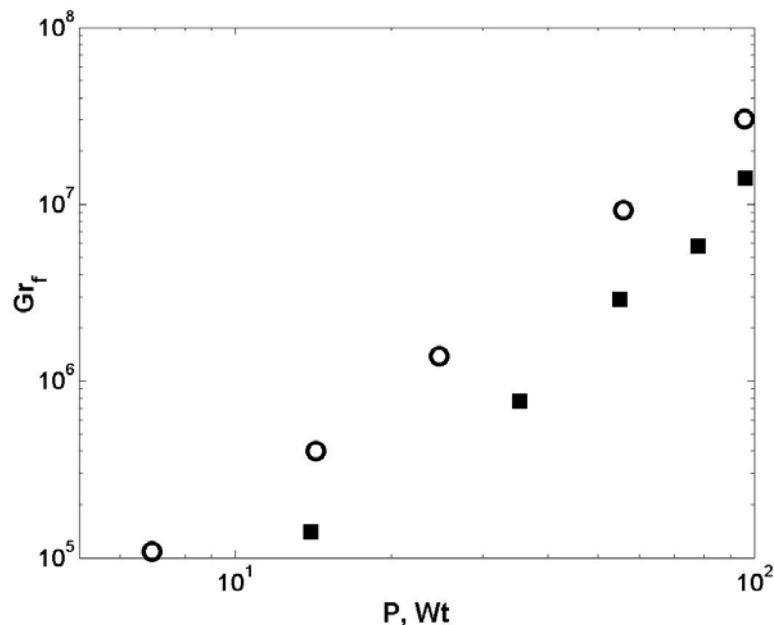


Рис. 3 – Зависимость числа Грасгофа Gr_f от мощности нагрева P , квадраты соответствуют прямой циркуляции, круги – обратной.

3 Результаты

В случае слабого нагрева на периферии прямая меридиональная ячейка занимает весь слой, обеспечивая радиальное течение, направленное к периферии в нижнем слое и направленное к центру в верхнем. С ростом нагрева меридиональная ячейка прижимается к периферии (рис. 4а).

Функция тока для меридионального поля скорости, показанная на рис. 4, определялась соотношением: $\partial_z \psi = -rV_r$, $\partial_r \psi = rV_z$, где V_r – радиальная компонента вектора скорости, а V_z – вертикальная компонента вектора скорости. Формирование дифференциального вращения в такой системе происходит следующим образом. Действие силы Кориолиса на радиальное движение приводит к появлению циклонического течения в верхнем слое и антициклонического течения около дна.

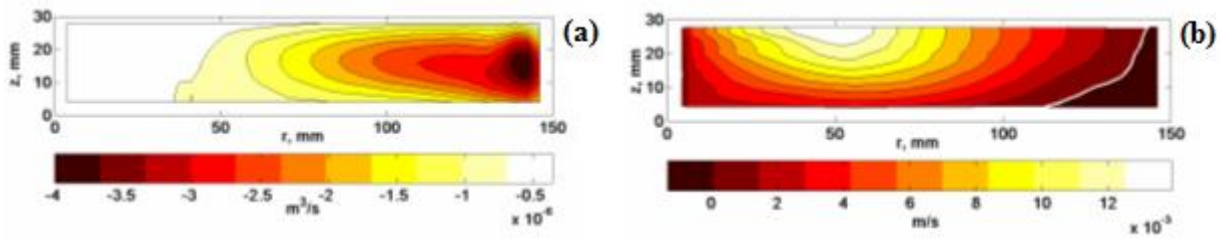


Рис. 4 – Функция тока (a) и среднее азимутальное поле скорости (b) для прямой меридиональной ячейки, $Gr_f = 1,4 \cdot 10^7$. Белая изолиния скорости на правом рисунке показывает границу между циклоническим и антициклоническим движением. Значения азимутальных скоростей приведены относительно вращающейся системы отсчета, связанной с дном модели.

Затем транспорт углового момента за счет меридиональной циркуляции и диффузия за счет вязкости приводит к стационарному режиму (рис. 4b). Максимум циклонической скорости расположен в верхней части слоя, на среднем радиусе, максимум антициклонической скорости расположен около дна и смещен к внешней стенке.

Локальный нагрев в центральной части дна создает вертикальный и горизонтальный градиенты температуры. Горизонтальный градиент температуры приводит к образованию обратной меридиональной ячейки (рис. 2, справа). Течение в нижней части направлено к центру, а над центральной частью формируется интенсивное подъемное течение. В верхней части слоя радиальное движение направлено к периферии. На рис. 5 показаны функция тока и распределение азимутальной скорости в вертикальном сечении для наибольшего значения числа Грасгофа ($Gr_f = 3,1 \cdot 10^7$). С ростом Gr_f циклоническое движение занимает центральную часть слоя, вытесняя антициклоническое движение на периферию.

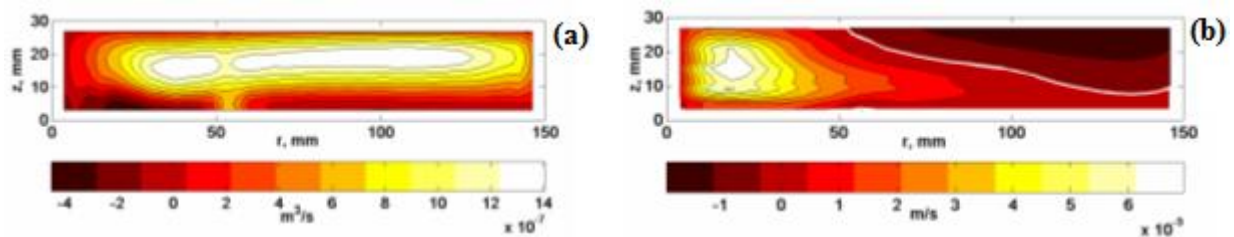


Рис. 5 – Функция тока (a) и среднее азимутальное поле скорости (b) для обратной меридиональной ячейки, $Gr_f = 3,1 \cdot 10^7$. Белая изолиния на правом рисунке показывает границу между циклоническим и антициклоническим движением.

В случае дифференциального вращения существует обмен моментом между жидкостью и моделью. На стадии установления стационарного режима в жидкости поток этого момента в общем случае не равен нулю. Когда режим течения в жидкости достигает стационарного состояния, обмен моментом импульса существует по-прежнему, но суммарный поток момента через границу слоя становится равным нулю. При этом интегральный момент импульса слоя жидкости может оказаться большим, чем твердотельный момент этого слоя при той же угловой скорости модели или меньшим.

Для количественной характеристики этого отличия используется величина S , введенная в [2], вычисляемая по формуле:

$$S = (L - L_s) / L_s,$$

где $L = \rho \int_{\delta_1}^{h-\delta_2} dz \int_{\delta_3}^{R-\delta_4} r dr \int_0^{2\pi} r V_\varphi(z, r, \varphi) d\varphi$ – интегральный момент импульса слоя,

L_s – интегральный момент импульса слоя в случае твердотельного вращения. Если $S > 0$, то говорят, что имеет место глобальная суперротация, если $S < 0$, то говорят, что имеет место глобальная субротация жидкости.

На рис. 6 показана зависимость S от числа Грасгофа. Видно, что величины глобальной суперротации и субротации монотонно увеличиваются с ростом Gr_f . Однако величина глобальной суперротации растет быстрее и достигает больших значений при одинаковых числах Грасгофа. Возможно, различная эффективность суперротации и субротации вызвана различной пространственной структурой меридиональной циркуляции.

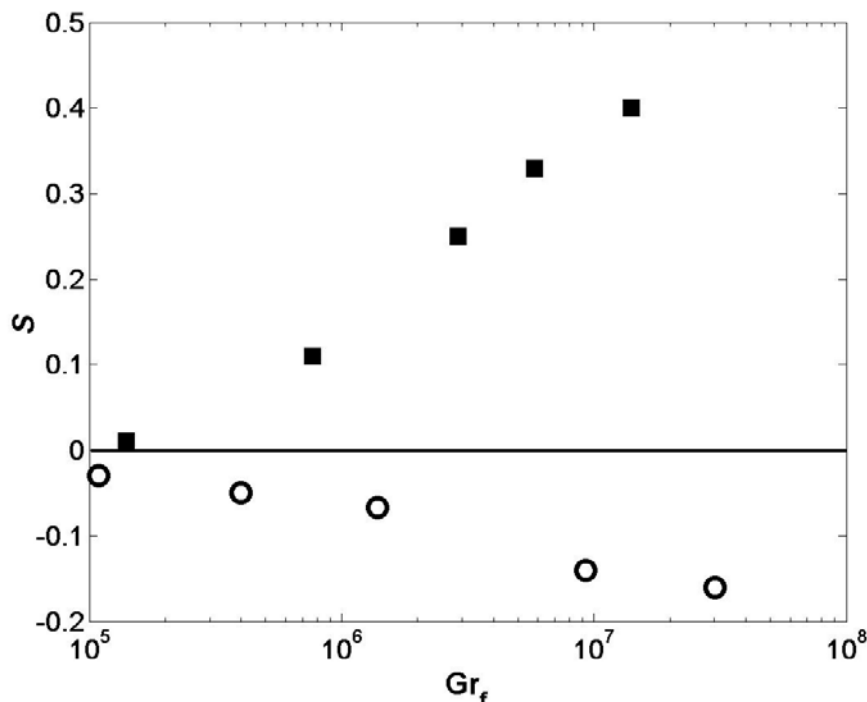


Рис. 6 – Зависимость величины глобальной суперротации от числа Грасгофа; квадраты соответствуют прямой циркуляции, круги – обратной.

Как отмечалось ранее, структура меридионального течения различна для прямой и обратной ячеек. Для того, чтобы оценить насколько структура меридионального течения влияет на его энергию, мы рассчитали кинетическую энергию радиального движения (она несколько меньше полной кинетической энергии меридионального течения) для прямой и обратной ячеек. Зависимость кинетической энергии радиального движения W_r от числа Грасгофа Gr_f показана на рис. 7. Хорошо видно, что энергия для обоих типов циркуляции, несмотря на различную пространственную структуру,

зависит от числа Грасгофа подобным образом. Зависимость $W_r(Gr_f)$ дана в логарифмических координатах и наклон прямой показывает степенную зависимость близкую к "1/2". Обращая внимание на зависимость числа Грасгофа от мощности нагрева (рис. 3) можно заключить, что энергия радиального движения линейно зависит от мощности нагрева, независимо от расположения области нагрева.

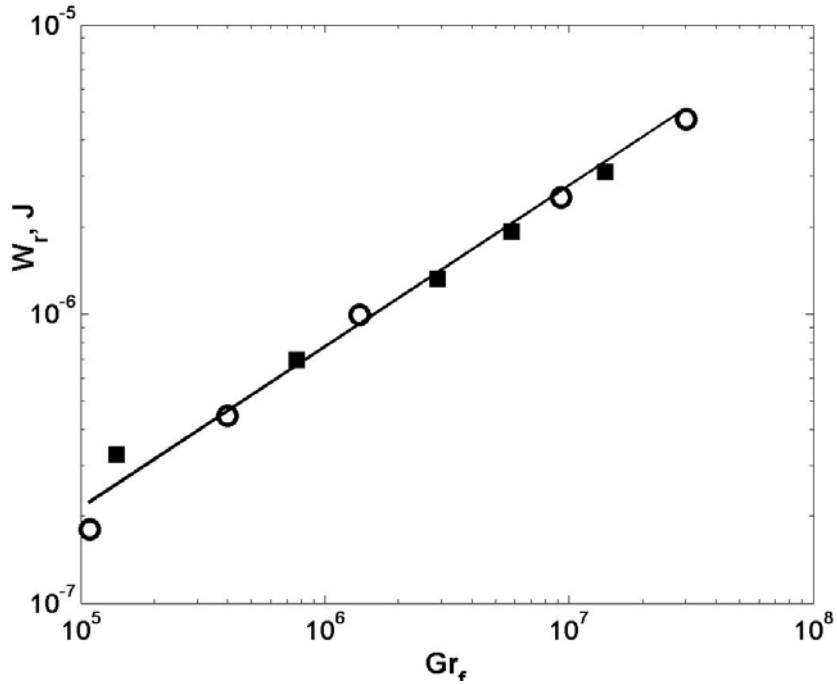


Рис. 7 – Зависимость кинетической энергии радиального движения W_r от числа Грасгофа Gr_f ; квадраты соответствуют прямой циркуляции, круги – обратной.

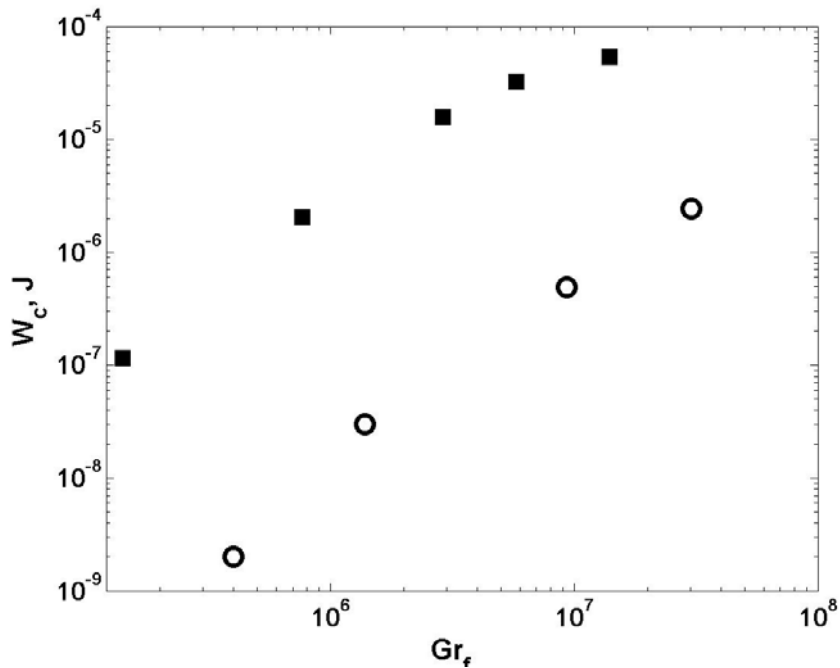


Рис. 8 – Зависимость кинетической энергии циклонического движения W_c от числа Грасгофа Gr_f ; квадраты соответствуют прямой циркуляции, круги – обратной.

Расчет полной кинетической энергии циклонического движения для обоих типов меридиональной циркуляции в зависимости от числа Грасгофа (рис. 8) показал, что прямая циркуляция приводит к заметно более интенсивному циклоническому движению, но, несмотря на это, зависимости энергии циклонического движения для обоих типов подобны.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект РФФИ 07-05-00060).

Литература

1. *Gierasch, P.J* (1975) Meridional Circulation and the Maintenance of the Venus Atmospheric Rotation. *J. Atmos. Science*, Vol. 32, pp. 1038.
2. *Read, P.L.* (1986) Super-rotation and diffusion of axial angular momentum: I. "Speed limits" for axisymmetric flow in a rotating cylindrical fluid annulus. *J.R. Met. Soc.*, Vol. 112, pp.231–252.

Laboratory modeling of meridional atmosphere circulation and super-rotation

Abstract. *The evolution of a large-scale azimuthal velocity field in a rotating cylindrical layer of fluid (radius 150 mm, depth 30 mm, free upper surface) with meridional convective circulation was studied experimentally. Two cases were considered: inward upper level circulation provided by a rim heater at the periphery and outward upper level circulation provided by a central heater. The heating rate is characterized by the Grashoff number defined through the heat flux. The detailed 3D structure of the mean large-scale velocity field is reconstructed using the PIV technique for large interval of Grashoff number values. It was shown that the energy of meridional circulation grows with the Grashoff number in the same way for both directions of circulation. Due to the action of the Coriolis force the meridional flow results in differential rotation. Meridional circulation leads to substantial variation of the integral angular momentum. Inward circulation results in the growth of the integral angular momentum and outward circulation causes it to decrease. At the same heating power, the increase of angular momentum at inward circulation is much stronger than its decrease at outward circulation.*

Keywords: *super-rotation, meridional circulation, differential rotation, angular momentum.*