

УДК 532.517.3;536.25

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ ВРАЩЕНИЕ В СЛОЕ ЖИДКОСТИ С ЛОКАЛЬНЫМ НАГРЕВОМ

© 2011 г.

А.Н. Сухановский, В.Г. Баталов

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

san@icmm.ru

Поступила в редакцию 16.05.2011ю

Показано, что изменение направления конвективной циркуляции жидкости в плоскости, проходящей через ось вращения модели, влияет на процесс обмена моментом импульса. Конвективная циркуляция, направленная от периферии слоя к оси вращения в верхней части слоя приводит к увеличению интегрального момента импульса слоя. Циркуляция в обратном направлении приводит к уменьшению интегрального момента импульса слоя. Эффективность процессов обмена импульсом различна по величине для разных направлений циркуляции.

Ключевые слова: вращающийся слой, конвекция, дифференциальное вращение, угловой момент, супер-ротация.

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. Основная причина крупномасштабных движений в атмосфере – это наличие горизонтальных градиентов температуры, то есть они имеют конвективную природу. Анализ интегральных характеристик ДВ для атмосфер различных планет показал, что атмосфера в целом может опережать движение планеты, это так называемое явление суперротации. 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. 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 настоящей работе проводится экспериментальное исследование конвективного течения во вращающемся плоском цилиндрическом слое с применением современных измерительных методов.

Экспериментальная установка и методика измерений

Методом PIV измерялись поля скорости в жидкости во вращающемся прозрачном цилиндре диаметром 300 мм, изготовленном из оргстекла. Толщина слоя жидкости во всех экспериментах составляла 30 мм, поверхность была открытой. В качестве рабочей жидкости использовалось чистое трансформаторное масло. Угловая скорость вращения цилиндра была постоянной и равнялась 0.069 с^{-1} с точностью 0.002 с^{-1} . Вращение осуществлялось при помощи редуктора с коллекторным электродвигателем. Локализованный поток тепла осуществлялся при помощи электрических нагревателей. Один из нагревателей располагался заподлицо с дном в центральной зоне таким образом, что ось вращения системы проходила через его центр. Диаметр нагревателя составлял 105 мм. Второй в виде кольца шириной 20 мм располагался по периферии модели. В случае подогрева жидкости на периферии в модели устанавливалась прямая меридиональная ячейка с подъемным течением над нагревателем и опускным в центральной области модели. В случае подогрева жидкости в центре модели устанавливалась обратная меридиональная ячейка. Контролируемыми параметрами эксперимента, определявшими течение в слое, были скорость вращения куветы и мощность нагревателя, но для описа-

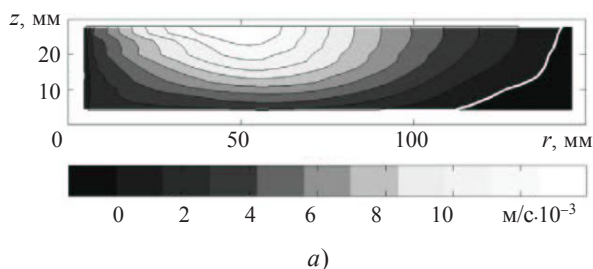
ния наблюдаемых режимов и обобщения результатов удобнее пользоваться безразмерными параметрами.

Для характеристики вращения использовалось число Экмана: $E = \nu/2\Omega h^2$. В качестве характеристики величины нагрева использовалось число Грассгофа, 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.

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.

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. Затем транспорт углового момента за счет меридиональной циркуляции и диффузия за счет вязкости приводит к стационарному режиму (рис. 1а).



направлено к центру, а над центральной частью формируется интенсивное подъемное течение. В верхней части слоя радиальное движение направлено к периферии. С ростом Gr_f циклоническое движение занимает центральную часть слоя, вытесняя антициклоническое движение на периферию (рис. 1б).

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.

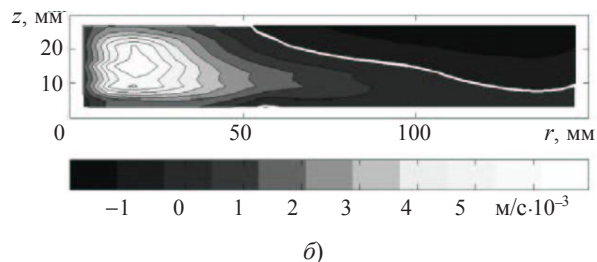


Рис. 1. Среднее азимутальное поле скорости для прямой меридиональной ячейки, $Gr_f = 1.4 \cdot 10^7$ (а) и для обратной меридиональной ячейки, $Gr_f = 3.1 \cdot 10^7$ (б). Белая изолиния на правом рисунке показывает границу между циклоническим и антициклоническим движением

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. Течение в нижней части

Показано, что величины глобальной суперротации и субротации монотонно увеличиваются с ростом числа Грассгофа. Однако величина глобальной суперротации растет быстрее и достигает больших значений при одинаковых числах Грассгофа. Различная эффективность суперротации и субротации в эксперименте вызвана прежде всего наличием твердой боковой границы.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант №10-05-00100а.

Список литературы

1. Gierasch P.J. // Atmos J. Science. Meridional circu-

lation and the maintenance of the venues atmospheric rotation. 1975. V. 32. P. 1038.

2. Read P.L. Super-rotation and diffusion of axial angular momentum: I. «Speed limits» for axisymmetric flow in a rotating cylindrical fluid annulus // J.R. Met.Soc. 1986. V. 112. P. 231–252.

DIFFERENTIAL ROTATION IN A FLUID LAYER WITH LOCAL HEATING

A.N. Sukhanovsky, V.G. Batalov

It is shown that the change of direction of convective circulation in central vertical cross-section affects the angular momentum exchange. Convective circulation, directed from the periphery to the axis of rotation in the upper layer, leads to the increase of integral angular momentum of the layer. Circulation in opposite direction leads to the decrease of the integral angular momentum of the layer. The efficiency of process of angular momentum exchange varies for different directions of circulation.

Keywords: rotating layer, convection, differential rotation, angular momentum, super-rotation.