

УДК 532.516;536.2:532

## ОСРЕДНЕННАЯ ТЕПЛОВАЯ КОНВЕКЦИЯ ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ ГОРИЗОНТАЛЬНОМ ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ СЛОЕ

© 2011 г.

А.А. Иванова, А.А. Вяткин

Пермский государственный педагогический университет

a.a.vjatkin@mail.ru

Поступила в редакцию 16.05.2011

Экспериментально исследована осредненная тепловая конвекция жидкости в горизонтальном коаксиальном зазоре, вращающемся вокруг собственной оси. Обнаружено, что конвекция возбуждается как при нагреве внешней границы слоя, так и при нагреве внутренней границы, и определяется конвективными механизмами разной природы. Изучен порог возникновения тепловой конвекции, а также теплоперенос и структура течений в зависимости от скорости вращения и разности температур границ слоя.

*Ключевые слова:* тепловая конвекция, цилиндрический слой, вращение, эксперимент.

### Результаты эксперимента

Цилиндрический слой толщиной  $h = 7$  мм и длиной  $l = 230$  мм образован поверхностями коаксиальных цилиндров. Внутренней границей служит алюминиевый цилиндр диаметром  $d = 60$  мм. Снаружи рабочий слой ограничен плексигласовой трубой. Средний радиус слоя составляет  $R = 33.5$  мм. Рабочей жидкостью служит дистиллированная вода. Температура границ задается от термостатов. Внешний теплообменник имеет прозрачную рубашку. Измеряется разность температур границ слоя  $\Theta$  и перепад температур на тепловом сопротивлении  $\Delta T$ , характеризующий тепловой поток через слой. Положительному значению  $\Theta$  соответствует более высокая температура внешней границы слоя. Описание экспериментальной установки имеется в [1].

В случае когда более высокую температуру имеет внутренняя граница слоя ( $\Theta < 0$ ), при быстром вращении осредненная тепловая конвекция отсутствует. Это является результатом стабилизирующего действия центробежной силы инерции. При понижении скорости вращения квазиравновесное состояние пороговым образом сменяется конвективным движением. На рис. 1 показаны конвективные структуры: а) случай термовибрационной конвекции, б) случай центробежной конвекции. Появление двумерных валов (рис. 1а), вытянутых вдоль оси вращения, сопровождается кризисом теплопереноса. Длина волны структур  $\lambda$  значительно превосходит толщину слоя,  $\lambda/h = 10$ . Развитие конвекции сопровождается регулярными низко-

частотными колебаниями температуры в слое, вызванными азимутальным дрейфом валов.

При нагреве слоя снаружи,  $\Theta > 0$ , и быстром вращении развивается центробежная конвекция. Диаметр конвективных валов, вытянутых вдоль оси вращения, близок к толщине слоя (рис. 1б). Интенсивность центробежной тепловой конвекции снижается с уменьшением скорости вращения  $\Omega$  до некоторого критического значения, при котором валы исчезают. При дальнейшем понижении  $\Omega$  конвекция вновь возрождается, при этом возникают продольные валы большого размера, аналогичные ситуации  $\Theta < 0$  (рис. 1а).

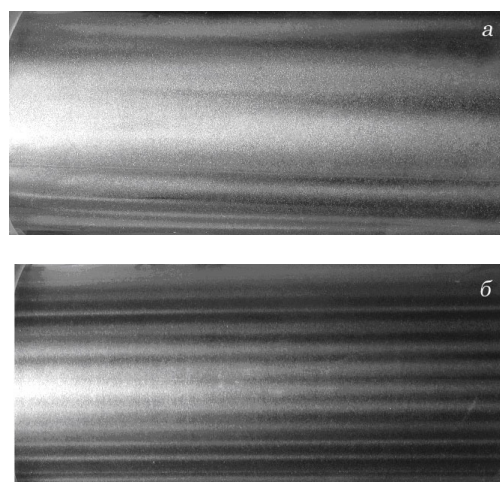


Рис. 1

При понижении скорости вращения обнаружены различные режимы конвекции. В случае  $\Theta < 0$  на фоне длинноволновых вихревых структур развивается система валов, ориентирован-

ных перпендикулярно оси вращения. Пространственный период поперечных структур сравним с толщиной слоя и в несколько раз меньше периода продольных валов. В некотором интервале значений  $\Omega$  длинноволновые продольные и коротковолновые поперечные структуры сосуществуют. С понижением скорости вращения поперечные валы усиливаются, продольные ослабевают. При очень медленном вращении наблюдается течение в виде трехмерных азимутальных структур, аналогичных валам гравитационной природы в неподвижном горизонтальном цилиндрическом слое малой толщины. Теплоперенос через слой с понижением  $\Omega$  монотонно возрастает.

В случае большой разности температур границ слоя при  $\Theta > 0$  понижение скорости вращения приводит к тому, что центробежный механизм сменяется термовибрационным, минуя фазу квазиравновесия. Смена доминирующих механизмов конвекции происходит скачком и сопровождается изменением пространственного периода продольных вихревых структур. С дальнейшим понижением  $\Omega$  порядок смены режимов не отличается от случая  $\Theta < 0$ .

### Обсуждение результатов

Осредненная конвекция определяется вибрационным параметром  $R_v = g\beta\Theta h / 2\nu\chi\Omega^2$  и центробежным числом Рэлея  $Ra = \Omega^2 R\beta\Theta h^3 / \nu\chi$  ( $\nu$  и  $\chi$  – коэффициенты кинематической вязкости и температуропроводности,  $\beta$  – коэффициент теплового расширения). На рис. 2а представлена граница устойчивости квазиравновесия. Область неустойчивости находится выше пороговой кривой. При отрицательных значениях  $Ra$  определяющим является термовибрационный механизм конвекции, центробежная сила инер-

ции играет стабилизирующую роль. В области положительных чисел Рэлея при  $Ra > 10^3$  наблюдается центробежная конвекция.

Исследование дрейфа конвективных структур термовибрационной природы показывает, что скорость азимутального движения системы вихрей увеличивается с понижением  $\Omega$ . Это приводит к уменьшению периода колебаний температуры  $\tau$  в слое.

На рис. 2б обобщены результаты измерений безразмерного периода колебаний температуры  $\tilde{\tau} \equiv \tau\Omega / 2\pi$  в надкритической области при нагреве слоя изнутри ( $\Theta < 0$ , точки 1–3) и снаружи ( $\Theta > 0$ , точки 4–6). Определяющую роль в скорости азимутального движения играет параметр  $\Gamma = g\beta\Theta / \Omega^2 R$ .

Штриховой линией отмечена теоретическая зависимость, имеющая вид  $\tilde{\tau} \approx 8/3L\Gamma^2$  (здесь  $L$  – азимутальное число структур). Последняя получена из соображений, что дрейф валов вызван дрейфом всего слоя жидкости. Такое движение жидкости имеет вибрационную природу и генерируется в пограничных слоях Стокса бегущей сдвиговой волной.

Расхождение экспериментальных и теоретических результатов в области больших  $\Gamma$  объясняется тем, что в расчете предполагается линейный профиль распределения температуры в слое, а это выполняется лишь до порога возбуждения конвекции и при малой надкритичности. При  $\Gamma > 1.5$  период колебаний принимает значение  $\tilde{\tau} = 1$ , то есть совпадает с периодом вращения полости.

*Работа выполнена при поддержке Рособразования (темплан № 0120.0600475).*

### Список литературы

1. Вяткин А.А., Иванова А.А., Козлов В.Г. // Изв. РАН. МЖГ. 2010. № 1. С. 12–21.

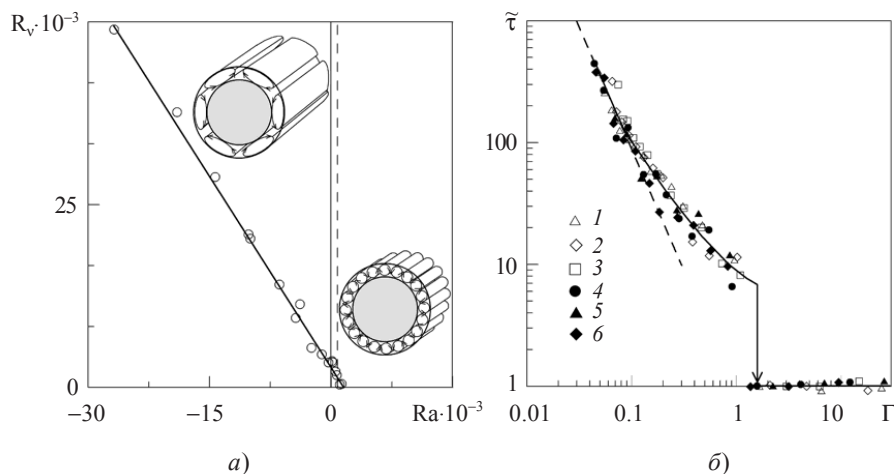


Рис. 2

**AVERAGED THERMAL CONVECTION IN A ROTATING HORIZONTAL ANNULUS***A.A. Ivanova, A.A. Vjatkin*

Thermal convection in a horizontal annulus rotating around its own axis is investigated experimentally. The threshold of the averaged convection excitation, the flow structure and heat transfer are studied. It is found that convection can be excited in the annulus with a heated inner boundary as well as a heated outer boundary, and is determined by convective mechanisms of different nature. The centrifugal thermal convection plays the governing role in quickly rotating layer with a heated outer boundary. The thermovibrational mechanism is responsible for the excitation of convection in a layer with a hot inner boundary.

*Keywords:* thermal convection, annulus, rotation, experiment.