

УДК 532.5.013.4:536.25

© 2003 г. А. А. ИВАНОВА, В. Г. КОЗЛОВ, В. В. РЫЛОВА

ТЕПЛОВАЯ КОНВЕКЦИЯ В ПЛОСКОМ СЛОЕ, ВРАЩАЮЩЕМСЯ ВОКРУГ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ОСИ

Экспериментально исследуется тепловая конвекция жидкости в плоском вертикальном слое с цилиндрической боковой границей, равномерно вращающемся вокруг оси симметрии, ориентированной горизонтально. Изучаются структура и граница возбуждения конвективных течений в зависимости от частоты вращения, разности температур границ слоя и его толщины, находятся определяющие безразмерные параметры. Показано, что осредненное по периоду действие силы тяжести вызывает конвекцию в виде неподвижных в системе отсчета полости ячеек, расположенных в гексагональном порядке.

Ключевые слова: вращение, тепловая конвекция, осциллирующие силовые поля, осредненные эффекты.

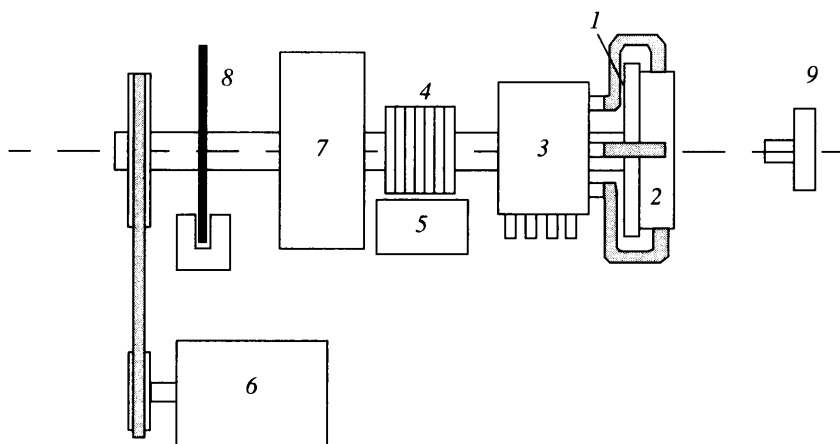
Тепловая конвекция в полости, вращающейся в поле силы тяжести, к настоящему времени достаточно подробно исследована для случаев, когда ось вращения направлена вертикально [1, 2]. При произвольном в том числе горизонтальном положении оси вращения конвекция изучена слабо. Можно указать лишь теоретические работы [3, 4], в которых вращение осуществлялось вокруг горизонтальной оси, находящейся в плоскости слоя жидкости со свободными границами.

В настоящей работе экспериментально исследуется тепловая конвекция жидкости в коротком горизонтальном цилиндре, равномерно вращающемся вокруг собственной оси. Диаметр цилиндра значительно превосходит его длину, так что полость имеет конфигурацию плоского слоя с цилиндрической боковой границей (теплоизолированной).

1. Постановка задачи. Отличительной чертой рассматриваемой задачи является то, что тепловая конвекция вызвана не действием центробежной силы, которая в условиях настоящего эксперимента пренебрежимо мала, а осредненным действием направленной по касательной к слою силы тяжести. В неинерциальной системе отсчета, связанной с полостью, вектор силы тяжести совершает равномерное вращение, в результате чего в слое возникают конвективные структуры, неподвижные в системе отсчета полости и вращающиеся вместе с ней.

Квазистационарные конвективные структуры, возникающие во вращающейся вокруг горизонтальной оси полости с неизотермической жидкостью, впервые обнаружены в [5]. Они имеют виброконвективную природу, а эффект аналогичен вибрационной тепловой конвекции, возбуждаемой вращающимся силовым полем, как, например, в полости, совершающей поляризованные по кругу поступательные вибрации [6].

В [6] осредненная тепловая конвекция определяется термовибрационным параметром $Ra_v \equiv (b\Omega\beta\Theta h)^2/2\nu\chi$, где b и $\Omega \equiv 2\pi f$ – амплитуда и круговая частота вибраций, h – толщина слоя, Θ – разность температур границ слоя, β , ν и χ – коэффициенты объемного расширения, кинематической вязкости и температуропроводности жидкости. Вибрационный параметр Ra_v является определяющим лишь в предельном случае высоких безразмерных частот $\omega \equiv \Omega h^2/\nu \gg 1$ (напомним, что ω характеризует соотношение размера полости h и толщины слоя Стокса $\delta = \sqrt{2\nu/\Omega}$).



Фиг. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – стол, 2 – кювета, 3 – гидравлический распределитель, 4 – многоканальный коллектор, предназначенный для вывода сигналов термодатчиков на измерительные приборы, 5 – измерительные приборы, 6 – двигатель постоянного тока, 7 – редуктор, 8 – цифровой тахометр, 9 – фотоаппарат

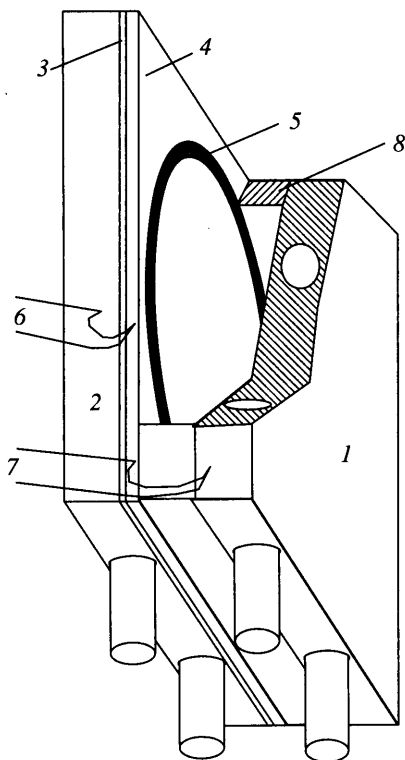
В системе отсчета полости, совершающей равномерное вращение, действие силы тяжести приводит к периодическим колебаниям неизотермической жидкости, что "включает" термовибрационный механизм [5]. В этом случае осредненное воздействие определяется модифицированным вибрационным параметром

$$R_v \equiv \frac{(g\beta\Theta h)^2}{2\nu\chi\Omega^2} \quad (1.1)$$

где роль вибрационного ускорения играет ускорение свободного падения g .

Аналогия этих задач не является полной. В системе отсчета вращающейся полости помимо силы тяжести, играющей роль осциллирующей силы, проявляются еще две силы – центробежная и Кориолиса. Если действие центробежной силы в ряде случаев может быть пренебрежимо малым, то влияние силы Кориолиса, определяемое параметром Тейлора $Ta = \omega^2$ [1, 2], возрастает с увеличением безразмерной частоты. Таким образом, осредненный вибрационный эффект от вращающегося поля и действие силы Кориолиса проявляются одновременно. При этом сила Кориолиса оказывает стабилизирующее влияние на развитие любых гидродинамических структур, кроме двумерных вихрей, ориентированных вдоль оси вращения, на которые она не действует никак.

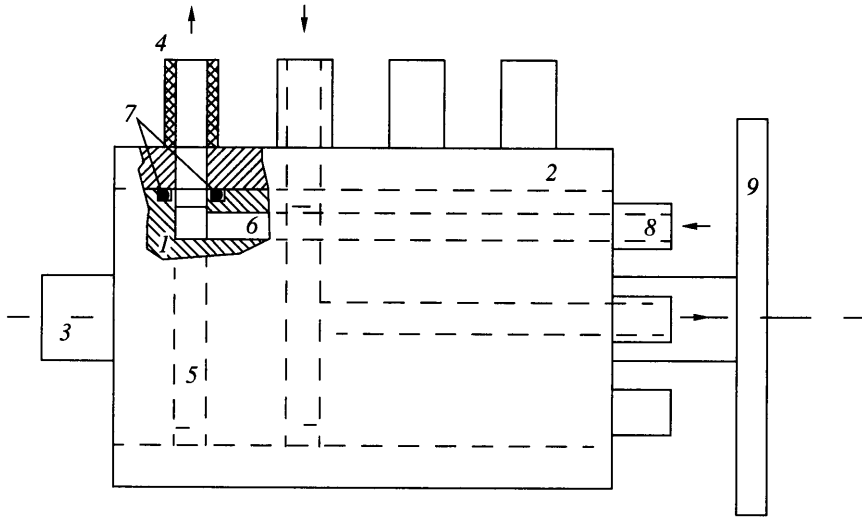
2. Описание установки и методики эксперимента. Экспериментальная установка состоит из закрепленного на горизонтальной оси столика 1 с кюветой 2 (фиг. 1); гидравлического распределителя 3, связывающего кювету с двумя струйными термостатами; многоканального коллектора 4, предназначенного для вывода сигналов термодатчиков на измерительные приборы 5. Вращение передается кювете от двигателя постоянного тока 6 через многоступенчатую клиноременную передачу и понижающий редуктор 7. Частота вращения изменяется в интервале значений $f = 0.01$ – 1.50 Гц ступенчато за счет изменения коэффициента передачи и плавно – за счет изменения напряжения питания двигателя. Частота измеряется при помощи цифрового тахометра 8 ТЦ-3М с точностью ± 0.001 Гц. Нестабильность частоты вращения в ходе отдельного опыта не превышает 3%.



Фиг. 2. Схема слоя: 1 и 2 – алюминиевые теплообменники, 3 – тепловое сопротивление, 4 – алюминиевая пластина, 5 – охранный кольцо, 6 и 7 – термопары, 8 – плексигласовая прокладка, задающая толщину слоя h

Плоский слой образован двумя алюминиевыми теплообменниками 1, 2 и плексигласовой прокладкой 8 (фиг. 2), задающей толщину слоя h ; диаметр боковой границы слоя $D = 14$ см. Один из теплообменников (расположенный слева на фигуре) оборудован датчиком теплового потока. Интегральный тепловой поток через слой определяется по перепаду температур между теплообменником 2 и алюминиевой пластиной 4, между которыми вклеена тонкая текстолитовая пластина 3, служащая тепловым сопротивлением. Толщина пластин 4 и 3 равняется соответственно 5 и 1 мм. Для исключения тепловых потерь через нерабочую часть кюветы и измерения теплового потока, идущего непосредственно через слой, в пластине 4 по периметру рабочей полости предусмотрено охранный кольцо – тонкая щель 5, заполненная эпоксидной смолой. Падение температуры на тепловом сопротивлении и разность температур границ слоя Θ измеряются при помощи медь-константановых термопар 6 и 7. Температура теплообменников поддерживается постоянной за счет циркуляции воды в их внутренних каналах.

Коллектор 4 (фиг. 1) состоит из укрепленного на вращающемся валу цилиндра с медными кольцевыми дорожками (они разделены перегородками из тефлона), вдоль которых скользят неподвижно закрепленные на корпусе установки медные контакты. Всего имеется восемь дорожек, четыре – для считывания показаний термопар, другие четыре – для электрического питания различных устройств и приборов, например осветителей, закрепленных непосредственно на вращающейся площадке.



Фиг. 3. Схема гидравлического распределителя: 1 (жестко закреплен на валу) и 2 (неподвижный) – фторопластовые цилиндры, 3 – вал, 4 – штуцеры в неподвижном цилиндре, 5 – кольцевые канавки во вращающемся цилиндре, 6 – каналы, 7 – кольцевые сальники, 8 – штуцеры, 9 – столики

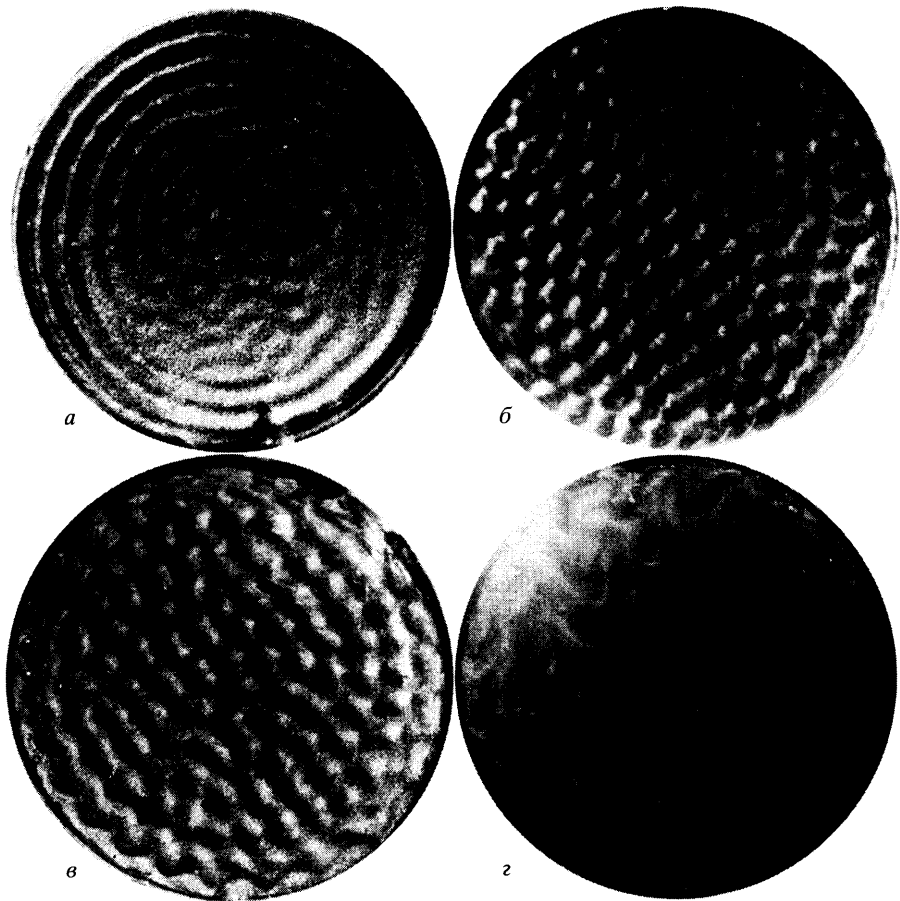
Гидравлический распределитель изготовлен из фторопластовых цилиндров 1 и 2 (фиг. 3). Внутренний цилиндр 1 жестко закреплен на валу 3 и вращается вместе с ним, внешний, оставаясь неподвижным, скользит по внутреннему. Во внутреннем цилиндре имеются четыре кольцевые канавки 5, к которым подходят каналы 6. Жидкость от термостатов, поступая по резиновым трубкам через штуцеры 4 в неподвижном внешнем цилиндре, по канавкам 5 попадает в каналы 6 внутреннего вращающегося цилиндра, и из штуцеров 8 через резиновые шланги поступает к кювете, установленной на столике 9. Дополнительное уплотнение подвижных гидравлических соединений осуществляется при помощи кольцевых резиновых сальников 7.

Рабочей жидкостью является дистиллированная вода. Особое внимание уделяется отсутствию в полости фазовых неоднородностей, как твердых частиц, так и воздушных пузырьков, которые при вращении вызывают сильное возмущение жидкости.

Методика эксперимента следующая. При помощи термостатов устанавливается температура теплообменников, кювета приводится во вращение с некоторой заданной частотой. После установления стационарного режима конвекции (это занимает около получаса) измеряется тепловой поток, т.е. перепад температур на прослойке, и разность температур границ слоя Θ . Разность температур изменялась в интервале значений $\Theta = 6\text{--}30\text{ К}$.

Как правило, опыты начинаются с достаточно высокой частоты вращения, когда жидкость в слое находится в состоянии квазиравновесия и тепловой поток близок к молекулярному. Тепловая конвекция за счет действия центробежной силы в условиях настоящего эксперимента пренебрежимо мала и не оказывает существенного влияния на теплоперенос. Граница смены режима конвекции определяется по критическому изменению закона теплопереноса.

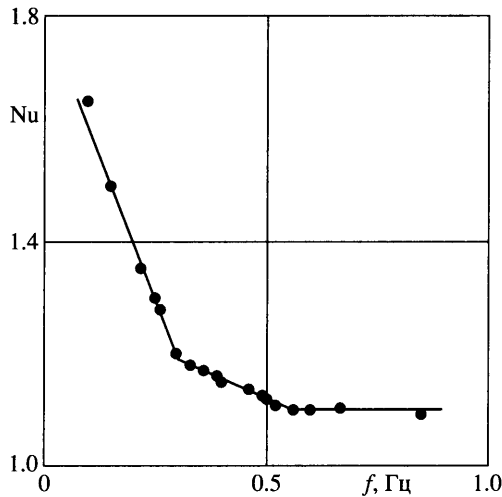
При проведении визуальных наблюдений и фото-регистрации структур конвективного течения один из металлических теплообменников заменяется прозрачным, образованным двумя стеклянными пластинами и зажатой между ними плексигласовой прокладкой, повторяющей по форме рабочую полость (толщина пластины 2 мм, про-



Фиг. 4. Фотографии конвективных структур для слоя этилового спирта (а) и воды (б-г); всюду толщина слоя $h = 0.65$ см; спирт $\Theta = 10$ К, $f = 0.5$ Гц; вода: $\Theta \sim 16$ К, $f = 0.5, 0.3$ и 0.2 Гц соответственно

кладки – 10 мм). В пространстве между стеклянными границами теплообменника циркулирует вода, подаваемая струйным термостатом. В качестве визуализатора течения используется алюминиевая пудра. Фото-регистрация проводится в свете лампы-вспышки (положение фотоаппарата 9 показано на фиг. 1). Последовательность экспериментов остается прежней.

3. Результаты исследований. При достаточно высокой частоте вращения в слое устанавливается состояние квазиравновесия: осредненное движение практически отсутствует, тепловой поток близок к молекулярному. Понижение частоты вращения приводит к пороговому развитию конвективного движения сначала в виде системы концентрических валов, и далее при понижении частоты на смену валам приходят гексагональные ячейки. Фотографии конвективных структур показаны на фиг. 4: структуры в процессе их перестройки, когда из концентрических валов они преобразуются в гексагональные ячейки (фиг. 4,а), и уже развитая ячейчатая конвекция (фиг. 4,б). Оба вида относятся к случаю условно высоких частот. При этом гексагональная ячейчатая структура устойчива и вращается вместе с полостью, ячейки не испытывают замет-



Фиг. 5. Зависимость теплового потока через слой от частоты вращения при $h = 0.65$ см, $\Theta = 15$ К, $f = 0.5$ Гц

ных изменений в течение периода. Дальнейшее понижение частоты вращения приводит к увеличению линейных размеров гексагональных образований (фиг. 4,в).

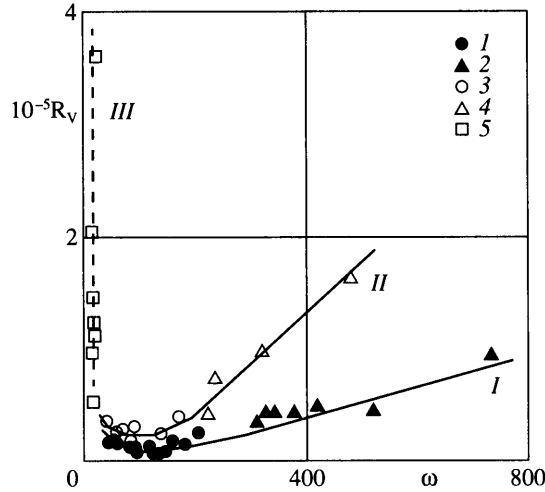
В области низких частот конвективные структуры в течение каждого периода претерпевают сильную эволюцию (в связанной с полостью системе координат). Они более напоминают подковы, постоянно ориентированные в поле силы тяжести концами кверху (фиг. 4,з). В конце концов ниже некоторой критической частоты пространственные структуры исчезают.

Граница возникновения валов, так же как и граница гексагональных ячеек, зависит от толщины слоя и разности температур Θ и может быть найдена по кривым теплопередачи $Nu(f)$, аналогичным кривой, показанной на фиг. 5. Число Нуссельта Nu определяется как отношение теплового потока через слой к молекулярному, который находится из дополнительных экспериментов с горизонтально расположенным слоем в отсутствие вращения и гравитационной конвекции (при подогреве сверху).

Результаты тепловых измерений и визуальных наблюдений позволяют сделать вывод, что границы возникновения и области существования различных конвективных структур характеризуются двумя безразмерными параметрами, безразмерной частотой вращения ω и модифицированным вибрационным числом Рэлея R_v (1.1).

На фиг. 6 кривыми I и II отмечены границы возбуждения конвективных валов и гексагональных ячеек. Кривые построены по результатам тепловых измерений для воды. Пороговые точки, полученные в опытах с толщиной слоя $h = 0.65$ и 1.02 см, хорошо согласуются между собой. Низкочастотная граница существования конвективных структур (линия III) построена по результатам визуальных наблюдений и скорее носит качественный характер.

Кривые I и II, ограничивающие область существования валов и ячеек, имеют выраженную V-образную форму. С понижением частоты размеры конвективных структур увеличиваются. Так, при $\omega < 50$ структуры испытывают значительные изменения в течение каждого периода, а при $\omega < 25$ исчезают вовсе. Слева от кривой III структуры не наблюдаются, однако тепловой поток в этой области значительно превосходит молекулярный. Последнее объясняется тем, что при столь низких частотах в течение каждого периода частицы жидкости совершают осцилляционные перемещения, сравнимые с размерами полости.



Фиг. 6. Карта виброконвективных режимов: *I* – граница возбуждения кольцевых валов в случае $h = 0.65$ см (*1*) и $h = 1.02$ см (*2*); *II* – граница возбуждения гексагональных ячеек для $h = 0.65$ см (*3*) и $h = 1.02$ см (*4*); *III* – низкочастотная граница конвективных структур, построенная по результатам визуальных наблюдений для $h = 0.65$ см (*5*)

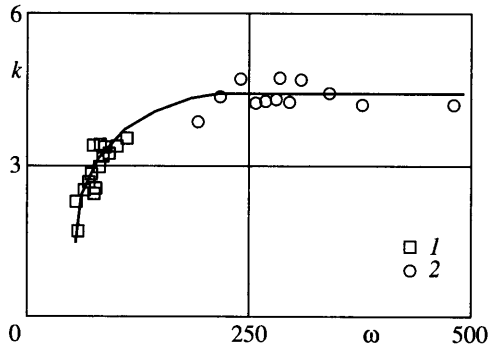
Из анализа фотоматериала следует, что при заданной частоте размер виброконвективных гексагональных ячеек с точностью до погрешности эксперимента не зависит от величины вибрационного параметра R_V и определяется безразмерной частотой ω . В области низких частот с повышением ω размер ячеек уменьшается и практически не изменяется при $\omega > 150$ (фиг. 7).

Здесь $k = 2\pi h/\lambda$ – безразмерное волновое число, λ – расстояние между центрами соседних гексагональных ячеек.

4. Обсуждение результатов. Рассмотрим конвективные процессы, происходящие в равномерно вращающемся вокруг горизонтальной оси плоском вертикальном слое, с позиции осредненной (вибрационной) тепловой конвекции. Устойчивость конвективного квазиравновесия и переход от одного типа движения к другому определяются двумя параметрами, вибрационным параметром R_V и безразмерной частотой ω . На плоскости этих параметров хорошо согласуются результаты, полученные в слоях разной толщины и при различных значениях средней температуры (фиг. 6). Тот факт, что R_V – один из определяющих параметров, следует из основной идеи вибрационной тепловой конвекции: в связанной с вращающейся полостью системе координат действие силы тяжести эквивалентно действию круговых поступательных вибраций полости. Вид параметра (1.1) соответствует теории вибрационной тепловой конвекции при круговых поступательных вибрациях [6].

Можно отметить аналогию конвективных структур с гексагональным квазистационарным рельефом, возбуждаемым на границе раздела несмешивающихся жидкостей при круговых вибрациях [7, 8].

По мере увеличения параметра R_V при постоянной частоте в области $\omega > 50$ наблюдается последовательность критических перестроек режима конвекции (фиг 6). Первая граница связана с возникновением кольцевых замкнутых валов сравнительно малой интенсивности, которые обладают азимутальной симметрией, т.е. не изменяют интенсивности и формы в течение периода. При увеличении R_V кольцевые валы сменяются гексагональными ячейками. Новый режим конвекции также является моно-



Фиг. 7. Зависимость волнового числа от безразмерной частоты для $h = 0.65$ см (1) и $h = 1.02$ см (2)

тонным: ячейки остаются неизменными в течение длительного времени. Обе границы сближаются при уменьшении частоты и не различаются в эксперименте при $\omega < 20$.

Не исключено, что такая последовательность связана с частичным влиянием относительно слабого радиального течения, вызванного центробежной конвекцией. На это указывает то, что развитие кольцевых валов начинается у внешней границы полости и их интенсивность понижается по мере приближения к оси. То, что гексагональные ячейки равномерно распределены по всей плоскости слоя, включая его центр, лишней раз подтверждает виброконвективную природу неустойчивости.

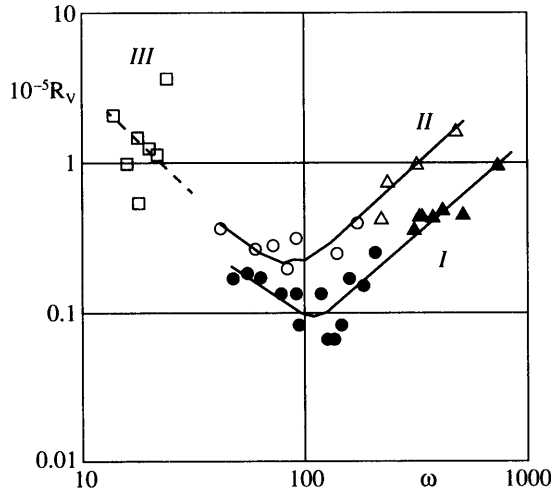
На плоскости параметров ω , R_V пороговые кривые имеют V-образную форму с минимумом в области $\omega \sim 100$. Остановимся на высокочастотной области, для которой характерен монотонный рост порога устойчивости с увеличением безразмерной частоты. Этот рост объясняется сильным стабилизирующим действием силы Кориолиса на трехмерные конвективные структуры, аналогично тому, как это происходит в задаче о гравитационной конвекции во вращающемся относительно вертикальной оси горизонтальном слое [1, 2].

Примечателен тот факт, что при $\omega > 150$ практически исчезает зависимость размера ячеек от частоты, в том числе в опытах с другими жидкостями (фиг. 4,а). Это может свидетельствовать о выходе на высокочастотную асимптотику.

Из логарифмической зависимости $R_V^*(\omega)$ (фиг. 8) видно, что пороговое значение вибрационного параметра в области $\omega > 150$ возрастает с увеличением частоты по закону, близкому к $R_V^* \sim \omega^{4/3}$. А это значит, что во вращающейся вокруг горизонтальной оси полости в условиях совместного действия термовибрационного механизма (R_V) и силы Кориолиса (ω) в высокочастотной области возбуждение пространственных виброконвективных структур характеризуется одним безразмерным комплексом – $R_V/\omega^{4/3}$.

Вид введенного в настоящей работе модифицированного вибрационного параметра R_V подтверждается результатами работы [3], в которой исследовалась устойчивость по отношению к плоским периодическим валам, когда их оси параллельны оси вращения. Сила Кориолиса на такие структуры не влияет. Хотя в качестве определяющих параметров в [3] используются гравитационное число Рэлея Ra и безразмерная частота ω , из анализа результатов следует, что в области высоких частот граница устойчивости определяется критическим значением их комбинации, а именно вибрационным параметром R_V .

Поскольку сила Кориолиса исключена из рассмотрения, зависимость от числа Тэйлора (безразмерной частоты) в пределе высоких частот отсутствует. С этой точки



Фиг. 8. Карта виброконвективных режимов (фиг. 6) в логарифмическом масштабе

зрения рассмотренная в [3] задача эквивалентна задаче о вибрационной конвекции в полости, совершающей поступательные круговые вибрации.

Из сказанного следует, что для теоретического описания осредненной конвекции во вращающейся вокруг горизонтальной оси полости в пределе высоких безразмерных частот применимы полученные методом осреднения уравнения вибрационной тепловой конвекции во вращающемся силовом поле (при поступательных круговых вибрациях) [6], но с учетом вызванных вращением полости центробежной силы и силы Кориолиса.

Интересен тот факт, что в классической задаче конвективной устойчивости равновесия (плоский горизонтальный слой, вращающийся вокруг вертикальной оси [1]) зависимость порога устойчивости от частоты вращения в пределе высоких частот $\omega > 150$ имеет вид $Ra^* \sim \omega^{4/3}$, идентичный найденному экспериментально в настоящей работе $R_V^* \sim \omega^{4/3}$. Таким образом, можно говорить об аналогии указанных задач, при этом термовибрационная массовая сила (вибрационный параметр R_V), подобна силе Архимеда, характеризуемой числом Рэлея Ra .

Обратимся к низкочастотной ветви границы устойчивости (фиг. 6). При $\omega < 50$ понижение частоты приводит к резкому возрастанию границы. Этот, хорошо известный в вибрационной конвекции факт, наблюдавшийся, например, в экспериментах [9], объясняется тем, что высокочастотный по своей природе виброконвективный механизм (связанный с невязкими колебаниями жидкости в осциллирующем силовом поле) в области низких безразмерных частот перестает работать. Последнее объясняется уменьшением интенсивности и изменением фазы колебаний жидкости в низкочастотном (вязком) пределе.

Заключение. Принципиален новый взгляд на динамику неоднородной по плотности жидкости в полости, вращающейся вокруг горизонтальной оси, взгляд с позиции осредненной вибрационной динамики. Сила тяжести здесь играет необычную роль. Вызывая колебания жидкости в системе отсчета полости, сила тяжести тем самым порождает осредненные вибрационные эффекты. Показано, что осредненное воздействие характеризуется двумя безразмерными параметрами: модифицированным вибрационным параметром $R_V \equiv (g\beta\Theta h)^2/2\nu\chi\Omega^2$ и безразмерной частотой $\omega \equiv \Omega h^2/\nu$, которая в случае высоких ча-

стот характеризует стабилизирующее действие силы Кориолиса. В области высоких частот граница устойчивости с частотой возрастает по закону $R_V^* \sim \omega^{4/3}$.

С методической точки зрения вращение полости вокруг горизонтальной оси позволяет экспериментально исследовать виброконвективные явления, вызванные круговыми вибрациями в отсутствие статического поля (моделирование условий невесомости), но при действии силы Кориолиса. В случае умеренных и низких частот, когда действие силы Кориолиса ослабевает, предложенный метод применим для лабораторного изучения низкочастотных параметрических колебаний в неоднородных по плотности гидродинамических системах, вызванных вращающимся силовым полем.

Работа частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (код проекта 00-01-00416).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. М.: Наука, 1972. 392 с.
2. Яворская И.М., Беллев Ю.Н. Конвективные течения во вращающихся слоях // Итоги науки и техники. Сер. Механика жидкости и газа. М.: ВИНТИ, 1984. Т. 17. С. 3–85.
3. Герценштейн С.Я., Рахманов А.И. Конвекция в плоском слое жидкости, вращающемся вокруг горизонтальной оси // Докл. АН СССР. 1983. Т. 269. № 3. С. 561–564.
4. Герценштейн С.Я., Рахманов А.И. Конвекция в осциллирующем поле сил и микрогравитация // Изв. РАН. МЖГ. 1994. № 5. С. 99–106.
5. Kozlov V.G., Rilova V.V. Vibrational convection excitement in cavity rotating in force field // Abstr. 8th Europ. Symp. on Materials and Fluid Sciences in Microgravity. Brussels, 1992. P. 86–88.
6. Козлов В.Г. О вибрационной конвекции в полости, совершающей пространственные маятниковые качания // Конвективные течения / Под ред. Жуховицкого Е.И. Пермь: Изд-е Перм. пед. ин-та, 1989. С. 19–27. = Kozlov V.G. Vibrational convection in a cavity undergoing spatial pendulum oscillations // Heat Transfer – Soviet Research. 1991. V. 23. № 7. P. 999–1008.
7. Ivanova A.A., Kozlov V.G., Legros J.C. Two liquids interface dynamics in cavity subject to translational vibration of circular polarisation // Proc. 1st Intern. Symp. on Microgravity Research and Applications in Physical Sciences and Biotechnology. Sorrento, Italy, 2000. ESA/ESTEC NL, 2001. P. 823–828.
8. Иванова А.А., Козлов В.Г., Ташикин С.И. Динамика границы раздела несмешивающихся жидкостей при поляризованных по кругу вибрациях (эксперимент) // Изв. РАН. МЖГ. 2001. № 6. С. 21–30.
9. Иванова А.А., Козлов В.Г. Экспериментальное исследование влияния крутильных колебаний на устойчивость конвективного движения в вертикальном цилиндрическом слое кругового сечения с перегородкой // Конвективные течения / Под ред. Жуховицкого Е.М. Пермь: Изд-е Перм. пед. ин-та, 1987. С. 38–43.