

УДК 532.517.4:536.25

© 2003 г. Е. Н. ПОПОВА, П. Г. ФРИК

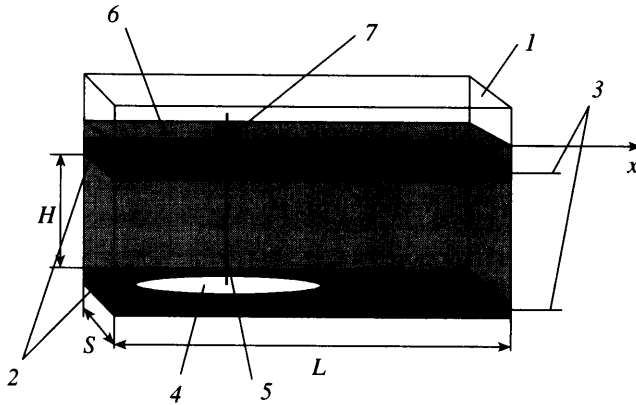
## КРУПНОМАСШТАБНЫЕ ТЕЧЕНИЯ В ТУРБУЛЕНТНОМ КОНВЕКТИВНОМ СЛОЕ С ПОГРУЖЕННЫМ В НЕГО ПОДВИЖНЫМ ТЕПЛОИЗОЛЯТОРОМ

Экспериментально исследованы крупномасштабные движения, возникающие на фоне развитой конвективной турбулентности в прямоугольной подогреваемой снизу кювете, в которой на фиксированной глубине свободно плавает горизонтальный диск. Установлено, что в полости могут возникать регулярные или хаотические колебания, а также возможны переходные режимы, характеризующиеся либо перебоями в движениях, либо вариациями частоты. Построена карта режимов на плоскости число Релея – относительная глубина затопления диска. Показано, что в режиме регулярных колебаний их частота линейным образом связана с числом Релея.

*Ключевые слова:* конвективные течения, турбулентность, крупномасштабные движения, эксперимент.

Астрофизические и геофизические течения имеют, как правило, конвективную природу, а характерные размеры природных систем таковы, что безразмерные параметры (числа Рейнольдса или Релея) имеют огромные значения, не оставляющие сомнений в том, что потоки турбулентны. Само понятие турбулентность ассоциируется с хаосом, разрушением изначально упорядоченных потоков и передачей энергии регулярных крупномасштабных течений в пульсации малых масштабов, обеспечивающих эффективную диссипацию кинетической энергии. Возникают, однако, и ситуации, когда энергия неупорядоченных мелкомасштабных движений под действием тех или иных физических механизмов преобразуется в энергию упорядоченных крупномасштабных движений.

В конвективных течениях процесс преобразования мелкомасштабных потоков в крупномасштабные может быть связан с тем или иным способом влияния на конвективные потоки тепла. Примером такого рода турбулентной конвективной системы может служить задача, описанная в [1], в которой экспериментально исследован подогреваемый снизу слой жидкости со свободной верхней границей. На поверхности жидкости находился поплавок, закрывающий около трети свободной поверхности. Установленный на краю кюветы поплавок существенно ухудшает теплоотдачу с поверхности и приводит к появлению в слое горизонтального градиента температуры, вызывающего формирование крупномасштабного вихря. Этот вихрь увлекает за собой поплавок и переносит его на другой край кюветы. Через некоторое время возникает вихрь противоположного знака, и поплавок начинает движение в обратном направлении. Таким образом в системе создаются регулярные колебания. В [1] предложена аналогия между рассмотренным течением и движением магмы и материков на Земле. Толщина коры в области материков значительно превышает толщину коры в районе океанов и является лучшим теплоизолятором. В результате под материками расплавленная магма преимущественно поднимается, а под океанами опускается. Как следствие на фоне развитой турбулентности возникает крупномасштабное горизонтальное течение, которое может вносить вклад в дрейф материков.

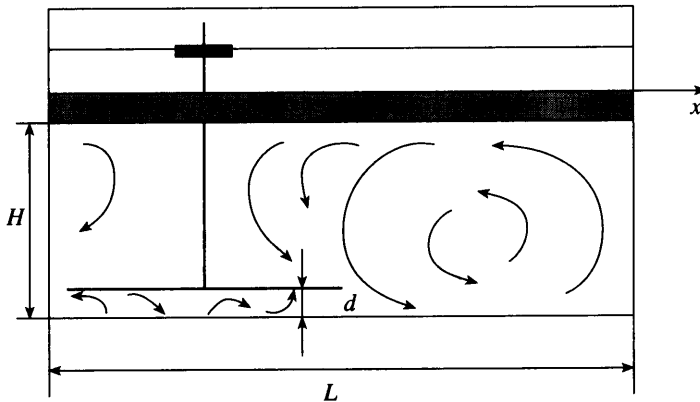


Фиг. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – кювета, 2 – медные теплообменники, 3 – термопары, 4 – диск, 5 – игла, 6 – щель, 7 – шайба

Представляет интерес и задача о возникновении макротечений на фоне развитой турбулентной конвекции в случае, когда воздействие на тепловой поток происходит не на границе слоя, а внутри, путем снижения эффективности вертикальных конвективных движений. В качестве примера природного явления, в котором может работать такого рода механизм, можно указать процессы переноса магнитного поля в конвективных оболочках звезд (например, Солнца). Магнитное поле Солнца имеет две компоненты: полоидальную и значительно более мощную – азимутальную – ее силовые линии образуют замкнутые кольца внутри конвективной оболочки Солнца. В начале солнечного цикла тороидальное поле сосредоточено в средних широтах, а затем движется по направлению к экватору. Имея в виду, что магнитное поле, с одной стороны, подавляет движения проводящей среды, а с другой стороны, увлекается движущейся проводящей средой, можно рассматривать этот жгут как плавающее в среде препятствие для конвективного теплопотока, которое может влиять на формирование крупномасштабных течений в направлении полюс-экватор.

Целью данной работы является экспериментальное исследование крупномасштабных течений, возникающих в турбулентном конвективном слое, внутри которого находится подвижный объект, препятствующий турбулентному конвективному теплопотоку.

**1. Экспериментальная установка.** Модель представляет собой параллелепипед длиной  $L = 18$ , шириной  $S = 10$  и высотой  $H = 8$  (см) (фиг. 1). Вертикальные стенки кюветы сделаны из оптического стекла, горизонтальные представляют собой медные теплообменники, температура которых поддерживается с помощью термостатов. Положение верхнего теплообменника определяет толщину конвективного слоя  $H$ , которая изменялась в интервале от 2 до 4 см. В качестве рабочей жидкости использовалась дистиллированная вода, уровень которой на 1.5 см выше верхней грани верхнего теплообменника. Поплавок представляет собой диск из плексигласа толщиной 0.1 см, который удерживается на заданной высоте  $d$  (фиг. 2) от нижнего теплообменника при помощи иглы, установленной в центре диска. Игла проходит сквозь щель в верхнем теплообменнике, а закрепленная на ней шайба остается на свободной поверхности воды за счет действия сил поверхностного натяжения. Положение шайбы на игле обеспечивает требуемый уровень погружения поплавка. Игла служит и индикатором положения поплавка в кювете. Течение в модели визуализируется теневым прибором ИАБ-451 и записывается на видеопленку.

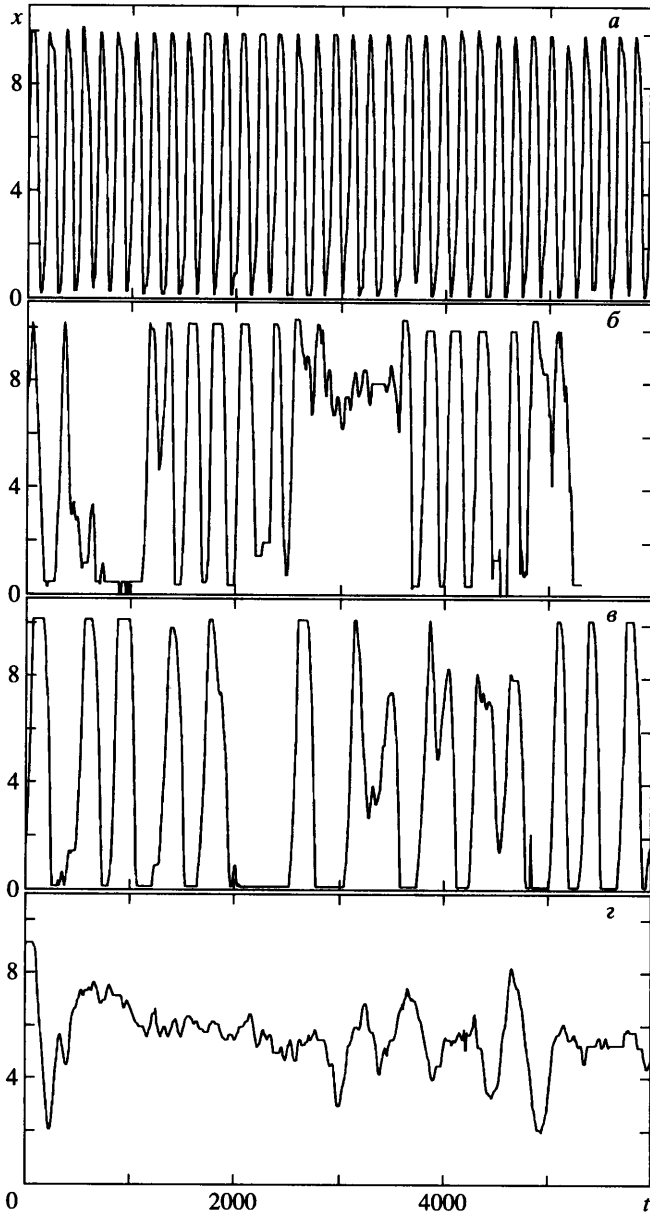


Фиг. 2. Схема формирования крупномасштабного вихря

**2. Крупномасштабные течения.** Механизм возникновения крупномасштабных колебаний принципиально не отличается от механизма, описанного в [1], где плавающий на поверхности поплавок снижал теплоотдачу с поверхности жидкости и приводил к появлению горизонтального градиента температуры. В рассматриваемом случае погруженный в жидкость поплавок препятствует всплыванию горячих термиком, возникающих у нагретой нижней поверхности. Это приводит к тому, что средняя температура над поплавком оказывается ниже, чем в остальной части полости и возникает горизонтальный градиент температуры. Наличие среднего горизонтального градиента температуры ведет к возникновению общей циркуляции жидкости, увлекающей за собой поплавок (фиг. 2). Если увлекаемый крупномасштабным вихрем поплавок достигает противоположной стенки кюветы и останавливается там, то процесс возобновляется в обратном направлении и цикл замыкается.

В данной задаче есть, однако, и принципиальное отличие, состоящее в том, что помимо числа Релея  $Ra = g\beta H^3 \Delta T (\nu\chi)^{-1}$  (здесь  $g$  – ускорение свободного падения,  $\beta$  – коэффициент объемного расширения жидкости,  $\nu$  – кинематическая вязкость,  $\chi$  – температуропроводность, а  $\Delta T$  – разность температуры между нижним и верхним теплообменниками), отвечающего за интенсивность конвекции в полости, появляется еще один управляющий параметр, определяемый положением поплавка (толщиной слоя жидкости  $d$  между поплавком и дном кюветы). Толщина  $d$  меняется от 0 до  $1/2$  (за единицу длины принята толщина всего слоя  $H$ ), так как ситуация симметрична относительно центральной плоскости. Можно ожидать, что при  $d \ll 1$  поведение системы будет подобно наблюдавшемуся в [1], а при  $d \rightarrow 1/2$  поплавок препятствует формированию общей циркуляции жидкости в полости.

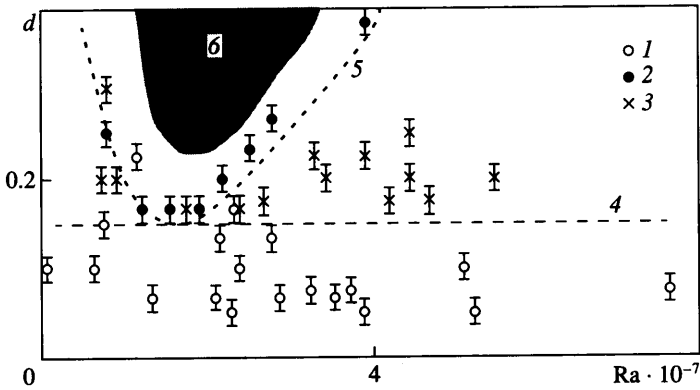
Эксперименты были выполнены для чисел Релея  $10^6 < Ra < 8 \cdot 10^7$  (толщина слоя  $H$  изменялась от 2 до 4 см, а перепад температуры между нижней и верхней плоскостями  $\Delta T$  – от 3 до 35°C) и подтвердили разнообразие возникающих в системе крупномасштабных течений. На фиг. 3 приведены примеры изменений положения поплавка со временем. При  $Ra = 5.21 \cdot 10^7$ ,  $d = 0.05$  (фиг. 3,а) имеют место хорошо выраженные периодические движения поплавка. На фиг. 3,б ( $Ra = 0.78 \cdot 10^7$ ,  $d = 0.3$ ) и фиг. 3, в ( $Ra = 1.74 \cdot 10^7$ ,  $d = 0.167$ ) даны примеры переходных режимов. Переходные режимы возникают двух типов. В первом случае (режимы типа I, фиг. 3,б) в периодическом движении возникают сбои, в течение которых поплавок останавливается (причем, остановки возникают как в крайнем положении, так и вблизи центра полости), во втором случае (режимы типа II, фиг. 3,в) долгих остановок не возникает, но значительно сильнее меняется частота ос-



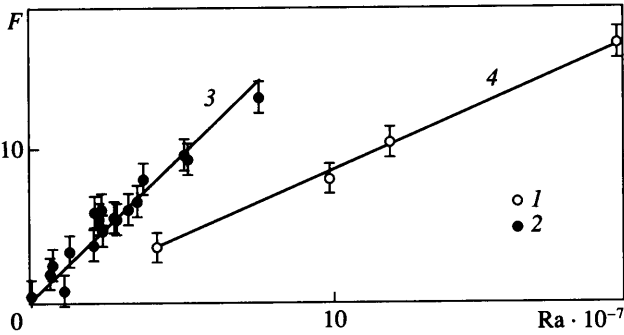
Фиг. 3. Примеры изменений во времени положения поплавка в полости:  
 а –  $Ra = 5.21 \cdot 10^7$ ,  $d = 0.05$ ; б –  $7.8 \cdot 10^6$ , 0.3; в –  $1.74 \cdot 10^7$ , 0.167; г –  $2.18 \cdot 10^7$ ,  
 0.167; ( $x$  в см., время в с)

новых колебаний и появляются слабые возвратные движения (зубчики). Некоторые циклы колебаний заканчиваются до касания поплавком стенки полости. Наконец, на фиг. 3,г ( $Ra = 2.17 \cdot 10^7$ ,  $d = 0.2$ ) представлен пример хаотического движения поплавка.

Все исследованные режимы представлены на плоскости ( $Ra$ ,  $d$ ), показанной на фиг. 4. Можно видеть, что все регулярные периодические режимы (1) лежат ниже уровня



Фиг. 4. Карта режимов течений: 1 – регулярные колебания; 2 – хаотические; 3 – переходные режимы; 4 – граница области регулярных колебаний; 5 – граница между переходными и хаотическими режимами; б – область отсутствия крупномасштабных течений



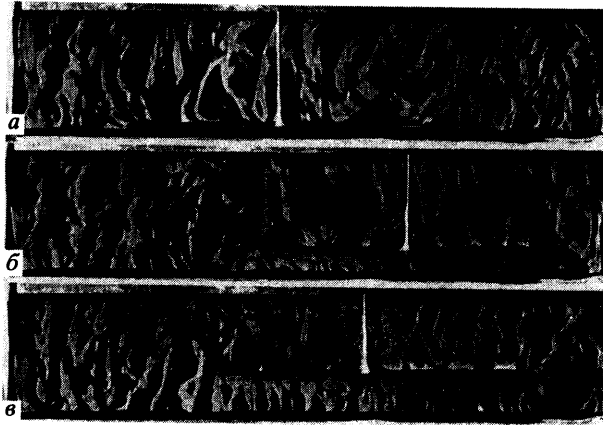
Фиг. 5. Зависимость частоты колебаний от числа Рейля: 1 – результаты измерений; 2 – данные [1] для движений поплавка, плавающего на свободной поверхности; 3, 4 – линейные аппроксимации данных

$d \approx 0.15$ . Граница раздела 5 переходных (2) и хаотических (3) режимов выражена менее четко. В верхней части диаграммы находится область б, в которой движения поплавка не возникают вовсе.

**3. Регулярные колебания.** Как указывалось выше, они устойчиво возникают при  $d < 0.15$ , хотя фрагменты регулярных колебательных режимов наблюдаются и при больших значениях  $d$ . Изучение зависимости частоты возникающих крупномасштабных колебаний от параметров задачи показало, что безразмерная частота однозначно определяется числом Рейля. На фиг. 5 показана безразмерная частота возникающих периодических колебаний  $F$  (за единицу времени взята величина  $H^2/\nu$ ) в зависимости от числа Рейля. При этом наряду с данными, полученными для регулярных колебательных режимов, приведены и значения частот, характеризующих интервалы с выраженной периодичностью в переходных режимах.

Таким образом, несмотря на то, что сама возможность возникновения регулярных колебаний в значительной мере определяется положением поплавка в турбулентном потоке, частота колебаний не зависит от его положения – если колебания возникают, то безразмерная частота пропорциональна значению числа Рейля

$$F = cRa$$



Фиг. 6. Теневые фотографии течения для  $Ra = 3.9 \cdot 10^7$ ,  $H = 4$  см и различного положения диска:  $a - d = 0.2$ ;  $b - 0.9$ ;  $v - 1.5$  см

где  $c = 1.9 \cdot 10^{-7}$ . На той же фиг. 5 приведены для сравнения и пересчитанные данные для безразмерной частоты колебаний поплавка, лежащего на поверхности слоя со свободной границей, приведенные в [1] (точки 2). Эти значения лежат на прямой 4, наклон которой ( $c = 0.86 \cdot 10^{-7}$ ) существенно отличается от полученного в рассматриваемом случае. Отличие, по-видимому, в первую очередь связано с тем, что течение развивается в слое со свободной поверхностью, а также различиями в геометрических параметрах задач (форма и размер поплавка, длина полости).

Для размерной частоты (в Гц) получается

$$f = \frac{c\nu Ra}{H^2} = \frac{cg\beta H\Delta T}{\chi}$$

**5. Переходные и хаотические режимы.** Эти режимы устанавливаются при увеличении слоя жидкости под поплавком ( $d > 0.15$ ), но граница между ними сильно зависит и от степени нагрева (числа Релея). Область переходных режимов практически исчезает при  $Ra \approx 1.5 \cdot 10^7$ , быстро расширяясь как при больших, так и при меньших числах Релея. При этом переходные режимы первого и второго типа не разделяются на плоскости ( $d, Ra$ ).

Существенное влияние на крупномасштабное движение могут оказывать и течения, возникающие в слое жидкости под поплавком (горизонтальный подогреваемый снизу слой с термостатированной нижней и теплоизолированной верхней границами). На фиг. 6 показаны примеры теневых картин течений в исследуемой полости (интенсивность света в теневой картине пропорциональна градиенту показателя преломления, т.е. температуры). Выбраны случаи, иллюстрирующие перестройку течения в слое под поплавком. Все три фотографии относятся к случаю  $Ra = 3.9 \cdot 10^7$ ,  $H = 4$  см. На фиг. 6,а  $d = 0.2$  см и заметного течения в слое нет (по-видимому, там реализуется ламинарное течение Куэтта). На фиг. 6,б ( $d = 0.9$  см) дан пример режима, когда в слое под поплавком устанавливается валиковая конвекция (наличие медленного сдвигового течения за счет движения верхней границы ориентирует валы перпендикулярно направлению движения, т.е. по направлению наблюдения). Последняя фотография (фиг. 6,в,  $d = 1.5$  см) относится к случаю, когда под поплавком также устанавливается турбулентная конвекция.

Режим колебаний	$Ra_d \cdot 10^{-3}$
Регулярные	0.32–33
Переходные I	29–106
Переходные II	112–350
Хаотические	28–260

Конвекция в слое под поплавком определяется соответствующим числом Релея  $Ra_d$ , определенным по толщине этого слоя  $d$  и перепаду температуры между дном полости и нижней плоскостью поплавка  $\Delta T_d$ . Значение разности температур  $\Delta T_d$  прямому изменению, к сожалению, не поддается. Для приближенной оценки числа  $Ra_d$  можно воспользоваться тем фактом, что в турбулентном конвективном слое основной перепад температуры приходится на тонкие пограничные слои, а в ядре устанавливается слабый градиент обратного знака, соответствующий устойчивой стратификации температуры [2]. Считая, что поплавок находится выше этого пограничного слоя, можно положить, что перепад температуры в слое под поплавком составляет приблизительно половину от приложенного ко всему слою жидкости. Таким образом,  $Ra_d = g\beta d^3 \Delta T (2\nu\chi)^{-1}$ . В таблице приведены границы значений числа  $Ra_d$ , при которых наблюдались движения различных типов. Можно видеть, что однозначной связи между значением числа  $Ra_d$  и характером возникающих движений не существует. Так, при  $Ra_d \approx 3 \cdot 10^4$  могут устанавливаться регулярные, хаотические и переходные режимы. Однако введенный параметр  $Ra_d$  позволяет провести границу между переходными режимами двух типов: режимы первого типа возникают при  $Ra_d < 1.1 \cdot 10^4$ , а второго типа при  $Ra_d > 1.1 \cdot 10^4$ .

**Заключение.** Экспериментально показано, что наличие в турбулентном конвективном слое плавающего изолятора тепла может приводить к формированию крупномасштабных колебаний. Если изолятор плавает вблизи границы (расстояние от него до горизонтальной границы составляет менее 15% от толщины слоя), то наблюдаются регулярные колебания, частота которых линейным образом связана с числом Релея. При отдалении изолятора от горизонтальных границ в системе могут наблюдаться переходные режимы, характеризуемые изменением частоты и (или) временными остановками колебаний, а также хаотические режимы. Построена карта режимов на плоскости число Релея – относительная глубина затопления диска. Показано, что существует область параметров, в которой крупномасштабные движения не возникают вовсе.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ-Урал 01-01-96482) и Фонда поддержки гражданских исследований США (CRDF-PE-009-0).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Zhang J., Libchaber A.* Periodic boundary motion in thermal turbulence // *Phys. Rev. Letters.* 2000. V. 84. № 19. P. 4361-4364.
2. *Зимин В.Д., Фрик П.Г.* Турбулентная конвекция. М.: Наука, 1988. 173 с.

Пермь  
Институт механики сплошных сред УрО РАН  
E-mail: frick@icmm.ru

Поступила в редакцию  
11.II.2003