Письма в ЖЭТФ, том 93, вып. 6, с. 363 – 367 © 2011 г. 25 марта

Инверсии крупномасштабной циркуляции при турбулентной конвекции в прямоугольных полостях

А. Ю. Васильев, П. Г. Фрик[1)]

Пермский государственный университет, 614000, Пермь, Россия

Институт механики сплошных сред Уральского отд. РАН, 614013, Пермь, Россия

Поступила в редакцию 1 февраля 2011 г.

Экспериментально исследовано поведение крупномасштабной циркуляции, возникающей на фоне турбулентной конвекции Релея–Бенара в прямоугольных полостях различной геометрии (от тонкого слоя до кубической полости). Показано, что режимы крупномасштабной циркуляции со спонтанными инверсиями, разделенными длительными периодами квазистационарной циркуляции, возникают как в ограниченном диапазоне значений числа Релея, так и в ограниченном диапазоне аспектного соотношения, определяющего отношение толщины полости к стороне в плоскости циркуляции. В толстом слое устанавливается режим без инверсий, а в тонком слое возникает режим, характеризуемый многочисленными сменами направления циркуляции, не разделенными интервалами с устойчивым направлением крупномасштабного течения. Изучены спектры колебаний амплитуды крупномасштабной циркуляции. Показано, что в кубической полости в спектре колебаний появляется доминирующая частота.

1. Введение. Спонтанные перебросы потока происходят в различных гидродинамических системах, включая крупномасштабные потоки в океанах, атмосфере, конвективных оболочках звезд или в жидком ядре Земли, где смена направления движения может приводить и к инверсии магнитного поля. Именно исследованиями инверсий магнитного поля Земли и попытками построения простых моделей гидромагнитного динамо, которые приводили бы к спонтанным сменам крупномасштабного поля, и был в значительной мере стимулирован интерес к проблеме инверсий (перебросов) в гидродинамических системах в конце прошлого века. Новый всплеск интереса к этой задаче возник после обнаружения режимов со случайными инверсиями генерируемого поля во французском динамо-эксперименте на основе течения Кармана между противовращающимися дисками [1]. Эти работы привели к новым попыткам обнаружения спонтанных перебросов крупномасштабной циркуляции в чисто конвективных течениях (см., например, обзор [2]).

Детально инверсии крупномасштабной циркуляции (КМЦ) при конвекции Релея–Бенара исследованы в полостях цилиндрической геометрии [3 – 5]. Подробный анализ статистических характеристик инверсий был проведен на основе экспериментов по конвекции жидкого геллия в цилиндре с геометрическим параметром $\Gamma = 1$ (отношением высоты цилиндра к его диаметру) [3]. Опыты были выполнены для чисел Релея $10^8 < \mathrm{Ra} < 10^{13}$ и показали, что при $\mathrm{Ra} \gtrsim 10^{11}$ направления вращения становятся равновероятными, а плотность распределения вероятности для интервала времени между инверсиями τ имеет пик при $\tau = 30$ с (что приблизительно равно времени оборота крупномасштабного вихря) и спадает с ростом τ по закону τ^{-1}. В работе [4] в экспериментах с водой ($\Gamma = 1$; $10^8 < \mathrm{Ra} < 10^{11}$) была исследована азимутальная динамика КМЦ и было показано, что смена направления циркуляции может происходить двумя способами: "переориентацией" и "с приостановкой". В первом случае смена направления происходит без заметного уменьшения интенсивности циркуляции, а вероятность поворота на заданный угол падает по степенному закону с ростом значения угла поворота. Во втором случае перед инверсией происходит значительное снижение интенсивности циркуляции (приостановка), после которого циркуляция возобновляется в произвольном направлении (равновероятном для любого значения угла). В работе [5] изучалась роль геометрического параметра и было показано, что в низком цилиндре ($\Gamma = 0.5$) степенной закон для вероятности поворота на различные углы сменяется экспоненциальным, а в высоком ($\Gamma = 2.3$) все вариации направления циркуляции и вовсе ограничены достаточно узким сектором.

Прямоугольная геометрия полости снимает вырождение задачи по углу (в задаче геодинамо вырождение снимается вращением). Эксперименты в квазидвумерном турбулентном потоке (квадратная полость со стороной $D = 0.248$ м и толщиной $d \approx D/4$)

[1)]e-mail: frick@icmm.ru

показали, что инверсии возникают только в ограниченном диапазоне значений числа Релея, а численные эксперименты для двумерной турбулентной конвекции в квадратной области позволили показать, что перебросы возникают только в определенном диапазоне чисел Прандтля и Релея [6]. Интересно отметить, что полученная картина инверсий крупномасштабного течения в *турбулентной* двумерной конвекции [6] фактически воспроизводит картину перебросов, полученную для надкритической конвекции в ячейке Хеле-Шоу еще 30 лет назад [7]. В проблеме инверсий крупномасштабной циркуляции на фоне турбулентной конвекции остается много открытых проблем. В частности, не ясна роль геометрии полости, не исследован механизм переброса, не закрыт вопрос о существовании выделенных частот во временных спектрах низших пространственных мод [8] и т.д.

В данной работе экспериментально исследовано поведение крупномасштабной циркуляции в турбулентной конвекции Релея–Бенара в слоях различной геометрии (от тонкого слоя до кубической полости). Показано, что режимы крупномасштабной циркуляции с инверсиями возникают не только в ограниченном диапазоне значений числа Релея, но и в ограниченном диапазоне аспектного соотношения, определяющего отношение толщины полости к стороне квадратной полости в плоскости циркуляции. Изучены спектры колебаний амплитуды крупномасштабной циркуляции.

2. Экспериментальная установка. Экспериментальная установка представляет собой кубическую полость со стороной $D = 250$ мм, горизонтальные стенки которой представляют собой массивные медные теплообменники, а вертикальные стенки изготовлены из плексигласа толщиной 25 мм. В двух противоположных стенках полости имеется система вертикальных пазов, в которые устанавливаются плексигласовые перегородки, выделяющие в центральной части куба прямоугольную область толщиной d (рис.1). В экспериментах толщина d принимала значения 25, 50, 125 и 250 мм. Весь куб заполнялся дистиллированной водой, а движение жидкости исследовалось в центральном сечении внутренней полости с помощью системы цифровых трассерных измерений скорости (PIV). Перепад температуры на горизонтальных теплообменниках ΔT варьировался от 10 до 30 °C.

Режим конвективного течения в полости для фиксированного числа Прандтля определяется двумя параметрами: числом Релея Ra и аспектным соотношением Г:

$$\mathrm{Ra} = \frac{g\beta D^3 \Delta T}{\nu\chi}, \qquad \Gamma = \frac{d}{D},$$

где g – ускорение свободного падения, β – коэффициент теплового расширения, ν – кинематическая вязкость и χ – температуропроводность жидкости. В

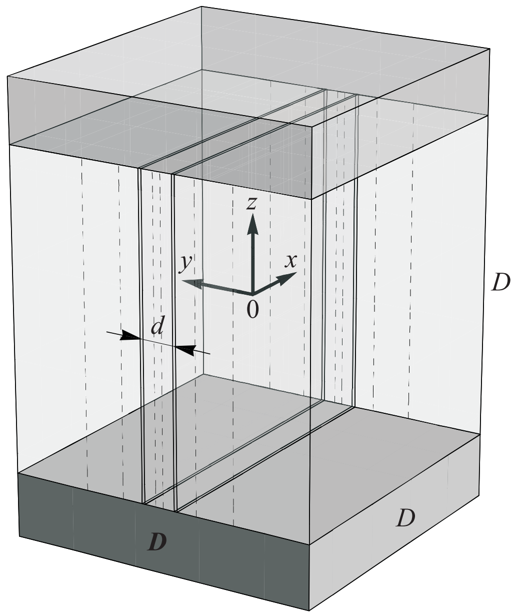

Рис.1. Схема экспериментальной модели и система координат

экспериментах эти параметры варьировались в диапазоне $2{\cdot}10^9 < \mathrm{Ra} < 7{\cdot}10^9$, $0.1 \le \Gamma \le 1$. Длительность отдельного эксперимента достигала 24 ч.

Двумерное поле скорости в центральном сечении полости $(x0z)$ регистрировалось каждую секунду и использовалось для вычисления компоненты завихренности $\omega_y(x,z)$. Завихренность раскладывалась в ряд Фурье $\omega_y(x,z) = \sum_{n,m} B_{nm}(t)\cos(\pi nx/D)\cos(\pi mz/D)$ и в дальнейшем исследовались вариации во времени амплитуд низших мод. Интенсивность крупномасштабной циркуляции характеризуется амплитудой $B_{11}(t)$, смена знака которой соответствует инверсии крупномасштабной циркуляции.

3. Результаты. Поведение амплитуды крупномасштабной циркуляции исследовалось для полостей с аспектным соотношением $\Gamma = 0.1$, 0.2, 0.5 и 1.0 с наложенной вертикальной разностью температуры $\Delta T = 10, 20, 30$ °C. Установлено, что во всех случаях на фоне развитой турбулентной конвекции возникает крупномасштабная циркуляция, для которой можно выделить три различных режима поведения, примеры которых показаны на рис.2.

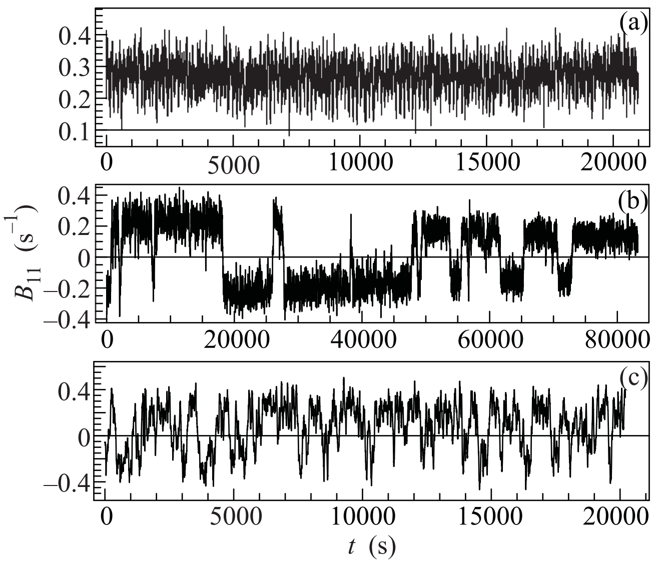

Рис.2. Примеры изменений амплитуды крупномасштабной циркуляции со временем: $\Gamma = 1.0$, $\mathrm{Ra} = 4.4 \cdot 10^9$ (a); $\Gamma = 0.2$, $\mathrm{Ra} = 4.4 \cdot 10^9$ (b); $\Gamma = 0.1$, $\mathrm{Ra} = 6.6 \cdot 10^9$ (c)

Первый режим характеризуется выраженной КМЦ с неизменным знаком (направлением циркуляции). В примере, показанном на рис.2a, амплитуда КМЦ колеблется вокруг статистически устойчивого среднего значения $\overline{B_{11}} = 0.27\,\mathrm{c}^{-1}$ с вариациями амплитуды циркуляции в интервале $0.1 < B_{11} < 0.4\,\mathrm{c}^{-1}$. Направление циркуляции остается неизменным в течение всего эксперимента – в данном примере это 6 ч, что соответствует приблизительно времени 400 оборотов крупномасштабного вихря (среднее время оборота крупномасштабного вихря $\tau_D = 4\pi/\overline{B_{11}}$).

Пример второго режима показан на рис.2b. В этом случае КМЦ характеризуется наличием интервалов времени с различным направлением циркуляции. В пределах одного интервала КМЦ ведет себя так же, как и в первом случае, то есть ее амплитуда осциллирует вокруг среднего значения и не меняет знака. Длительность отдельных интервалов носит случайный характер, а переход от одного направления циркуляции к другому происходит резко (за время, сравнимое с временем оборота крупномасштабного вихря, равного в этом случае 60 с). Именно такие резкие смены направления циркуляции и определяются как *инверсии*. В представленном примере за время эксперимента (24 ч) было зарегистрировано 11 инверсий. При этом длительность отдельных интервалов с неизменным направлением циркуляции варьировалась от 10 мин до 5.5 ч.

Третий режим, пример которого показан на рис.2c, будем называть *смешанным*. Он характеризуется многочисленными сменами направления КМЦ, которые, однако, не разделяются интервалами с квазиустойчивой циркуляцией в одном направлении.

На рис.3 на плоскости параметров $\Gamma - \mathrm{Ra}$ все выполненные эксперименты отмечены значками, соот-

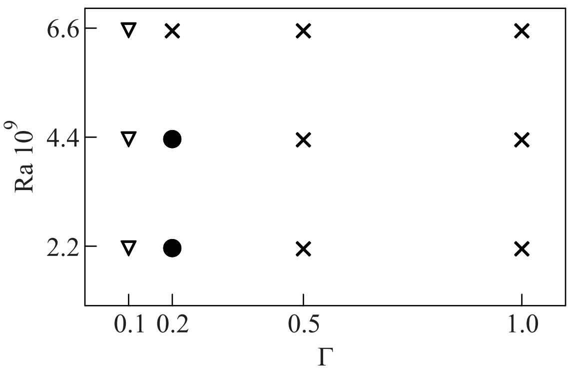

Рис.3. Наблюдаемые режимы крупномасштабной циркуляции на плоскости параметров $\Gamma - \mathrm{Ra}$: 1 – режим с осцилляциями без инверсий (крестики); 2 – режим с инверсиями (кружки); 3 – смешанный режим (треугольники)

ветствующими наблюдавшимся режимам циркуляции. Из рисунка следует, что режим с инверсиями возникает в ограниченном диапазоне значений как аспектного соотношения, так и числа Релея. Видно, что для $\Gamma \geq 0.5$ всегда наблюдался режим без инверсий. Наиболее ярко циркуляция со спонтанными инверсиями возникала при $\Gamma = 0.2$ и умеренных значениях числа Релея. Увеличение числа Релея подавляет инверсии и приводит к установлению первого режима. Уменьшение аспектного соотношения Γ (уменьшение толщины полости) приводит к реализации третьего, смешанного, режима циркуляции.

Интересно проследить за изменением спектрального состава колебаний скорости КМЦ при различных режимах циркуляции. В спектре мощности во всех случаях можно выделить два интервала, граница между которыми определяется частотой вращения крупномасштабного вихря $\nu_D = 1/\tau_D$. На высоких частотах, $\nu > \nu_D$, энергия пульсаций быстро падает, следуя степенному закону вида $E(\nu) \sim \nu^{-\alpha}$ с показателем $\alpha \approx 3$. При усилении нагрева (росте числа Релея) растет скорость КМЦ, то есть уменьшается время τ_D, и этот степенной интервал отодвигается в область более высоких частот (рис.4). На рис.4a показаны спектры, полученные в полости с $\Gamma = 0.5$ при различных числах Релея. В полости такой геомет-

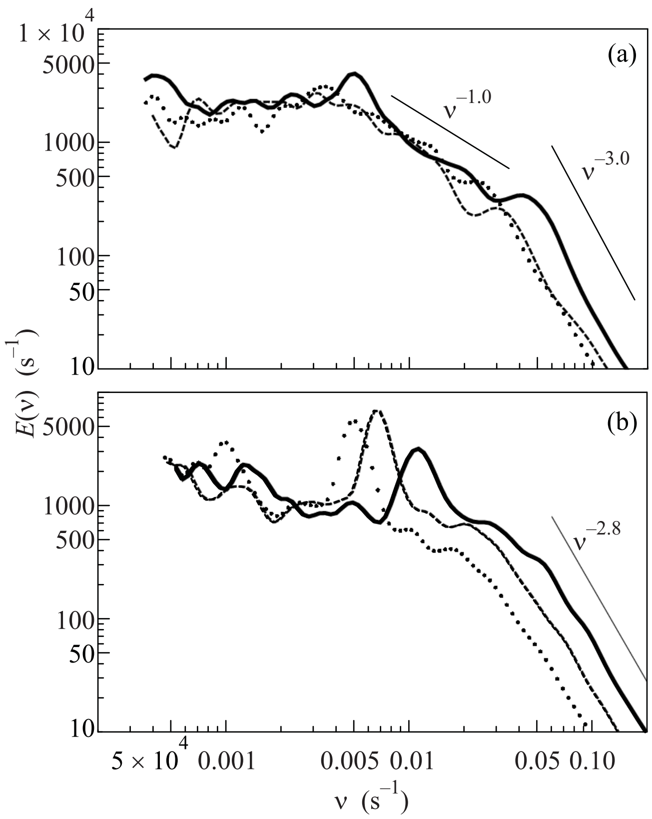

Рис.4. Спектры мощности пульсаций КМЦ для режима без инверсий: (a) – $\Gamma = 0.5$; (b) – $\Gamma = 1.0$. Сплошная линия – $\mathrm{Ra} = 6.6\cdot10^9$; штриховая – $\mathrm{Ra} = 4.4\cdot10^9$; пунктир – $\mathrm{Ra} = 2.2\cdot10^9$

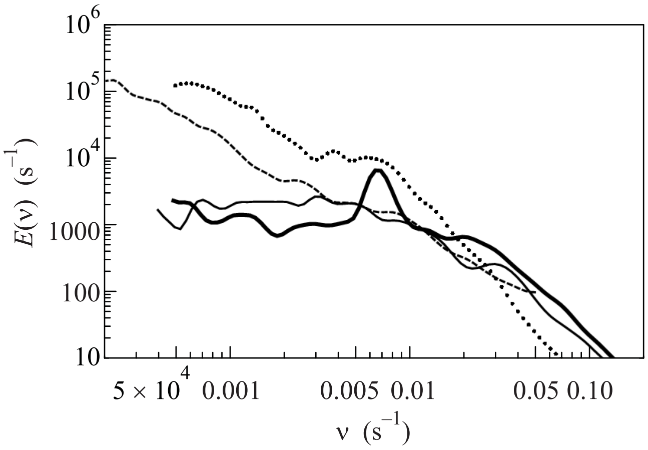

Рис.5. Спектры мощности пульсаций КМЦ для полостей различной геометрии и фиксированного числа Релея $\mathrm{Ra} = 4.4\cdot10^9$: жирная линия – $\Gamma = 1.0$; тонкая линия – $\Gamma = 0.5$; штриховая – $\Gamma = 0.2$ и пунктир – $\Gamma = 0.1$

рии при всех рассмотренных числах Релея наблюдалась циркуляция без инверсий (режим 1). В низкочастотной части спектра выделяется плоский участок ($E(\nu) \sim \mathrm{const}$ для $\nu < 0.005$), справа от которого спектральная мощность спадает приблизительно как $E(\nu) \sim \nu^{-1}$. Можно отметить, что энергия колебаний на низких частотах практически не зависит от интенсивности нагрева.

На рис.4b показаны спектры, полученные в кубической полости ($\Gamma = 1.0$). В этом случае также наблюдался только режим циркуляции без инверсий, однако структура спектров существенно иная. В спектре появляется выделенный пик, что говорит о наличии доминирующей частоты колебаний, которая растет с ростом числа Релея.

Изменение структуры спектра мощности с изменением аспектного соотношения Γ иллюстрирует рис.5, на котором показаны спектры мощности для фиксированного значения числа Релея $\mathrm{Ra} = 4.4\cdot10^9$ и различных значений Γ. Для толстой полости ($\Gamma = 1$ и $\Gamma = 0.5$) соответствующие кривые взяты из рис.4 и показывают, что в режиме без инверсий присутствует выраженное плато в низкочастотной части спектра, а в случае кубической полости спектр отличается наличием выраженного пика. При циркуляции с инверсиями ($\Gamma = 0.2$, режим 2) энергия низкочастотных колебаний значительно возрастает, и практически весь интервал частот $\nu < \nu_D$ характеризуется монотонно спадающей спектральной плотностью энергии. В тонкой щели ($\Gamma = 0.1$) устанавливается режим 3 и энергия колебаний возрастает почти на порядок (в сравнении с режимом 2) во всем низкочастотном интервале спектра.

4. Выводы. Выполненные экспериментальные исследования крупномасштабной циркуляции жидкости при турбулентной конвекции Релея–Бенара в прямоугольных областях различной геометрии показали, что в зависимости от значений числа Релея и аспектного соотношения могут реализоваться три различных режима КМЦ. Первый режим характеризуется устойчивой циркуляцией, интенсивность которой демонстрирует стохастические колебания, но направление циркуляции остается неизменным. Второй режим – режим с инверсиями, для которого характерно чередование интервалов с КМЦ в том или ином направлении. Длительность этих интервалов случайна, а в пределах каждого интервала КМЦ ведет себя подобно режиму 1. Третий, смешанный режим характеризуется многочисленными сменами направления КМЦ, которые не разделяются интервалами с квазиустойчивой циркуляцией в одном направлении.

Ранее, в работе [6] было обнаружено, что режим с инверсиями чувствителен к определяющим параметрам и реализуется только в ограниченном диапазоне как числа Релея, так и числа Прандтля. Было показано, что инверсии пропадают как при малых числах

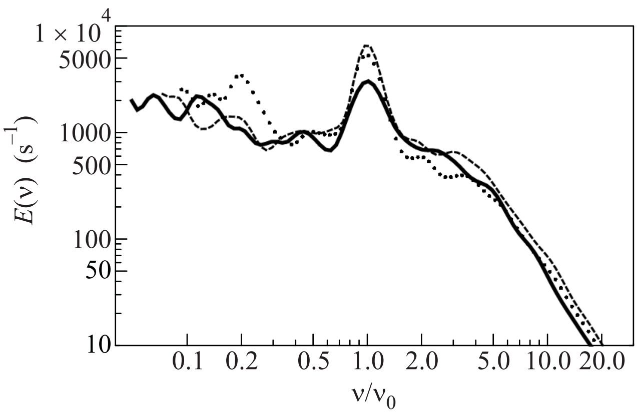

Рис.6. Спектры мощности пульсаций КМЦ для кубической полости, представленные в частотах, приведенных к частоте максимума ν_0. Обозначения те же, что и на рис.4

Прандтля (Pr <1) , так и при больших (Pr >10). В данной работе выявлена высокая чувствительность характера КМЦ к поперечному размеру полости (толщине слоя с квадратным в плоскости циркуляции сечением). Показано, что при $\Gamma \geq 0.5$ инверсии не наблюдаются, а в тонком слое ($\Gamma = 0.1$) режим с инверсиями сменяется смешанным режимом циркуляции.

Исследование спектров колебаний КМЦ показало, что в случае кубической полости ($\Gamma = 1$) появляется доминирующая частота колебаний ν_0. Эта частота растет с числом Релея, но однозначно связана с частотой вращения крупномасштабного вихря. На рис.6 спектры колебаний КМЦ в кубической полости показаны относительно частот, приведенных к частоте ν_0. На частотах $\nu > \nu_0$ спектры практически совпадают, демонстрируя быстрое (степенное) спадание на частотах $\nu > \nu_D$, причем $\nu_D/\nu_0 \approx 3$.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и администрации Пермского края (проект РФФИ-Урал-11-01-96000).

1. F. Ravelet, M. Berhanu, R. Monchaux et al., Phys. Rev. Lett. **101**, 074502 (2008).
2. D. Lohse and K.-Q. Xia, Annu. Rev. Fluid Mech. **42**, 335 (2010).
3. K. R. Sreenivasan, A. Bershadskii, and J. J.G. Niemela, Phys. Rev. E **65**, 056306 (2002).
4. E. Brown and G.Ahlers, J. Fluid Mech. **568**, 351 (2006).
5. H. D. Xi and K.-Q. Xia, Phys. Rev. E **78**, 036326 (2008).
6. K. Sugiyama, R. Ni, R. J. A. M. Stevens et al., Phys. Rev. Lett. **105**, 034503 (2010).
7. Д. В. Любимов, Г. Ф. Путин, и В. И. Чернатынский, Доклады АН СССР **235**, 554 (1977).
8. В. Д. Зимин, П. Г. Фрик, *Турбулентная конвекция*, М.: Наука, 1988.