

УДК 551.511

КОНВЕКТИВНЫЙ МЕХАНИЗМ ВОЗНИКНОВЕНИЯ СТРУЙНОГО ТЕЧЕНИЯ**В. В. Алексеев, А. С. Князьков***(кафедра физики моря и вод суши)*

Струйные течения в атмосфере и океане непосредственно влияют на динамический и температурный режим среды. Причины их возникновения и устойчивости до конца еще не ясны. Все более возрастающее количество фактов, полученных из наблюдений за этими течениями, позволяет судить об общности их структур.

Объяснить механизмы формирования струйных течений — это значит и понять причины процессов перераспределения переносимого ими тепла, что имеет значение для прогноза погоды и климата. В этом аспекте существенно большее значение имеют струйные течения в атмосфере.

Ньютон и Пальмен [1] выделяют две главные системы струйных течений в атмосфере, имеющие некоторые общие черты, но различающиеся по их связи с общей циркуляцией атмосферы. Одна из этих систем — субтропическое струйное течение, связанное с полярной границей циркуляции Хэдли. Вторая система — это полярное струйное течение, связанное с фронтальными зонами внетропических широт.

Различия в формировании порождают и различия в поведении. Полярное струйное течение неустойчиво во времени и размыто в пространстве, в то время как субтропическое струйное течение, находящееся на границе между массами тропического воздуха и воздуха умеренных широт, характеризуется большими скоростями и большей устойчивостью как в отношении направления ветра, так и по географическому положению. И хотя его нельзя рассматривать как однородное течение вокруг всего земного шара (для него скорее типично сосредоточение сильных ветров в струйных полосах, чередующихся с участками более слабых ветров), структура его достаточно устойчива во времени.

В данной работе экспериментально исследуется возможность конвективного механизма возникновения субтропического струйного течения.

Установка, которая использовалась в работе (рис. 1), представляет собой вращающееся наполненное жидкостью цилиндрическое кольцо шириной 4 см, причем радиус внешнего цилиндра $R_2=21,7$ см, а внутреннего — $R_1=17,7$ см. Стенки кольца изготовлены из плексигласа. Дно кольцевого канала медное, что создает возможность эффективной теплопередачи от холодильника. В качестве холодильника использовалось пенопластовое кольцо с углублением для льда, который в условиях термостата имеет температуру $T=0^\circ\text{C}$. За время эксперимента (1,5—2 ч) лед не успевает полностью растаять и температура на нижней границе жидкости остается практически постоянной и равной $T_n=5^\circ\text{C}$. Холодильник и кольцевой канал крепились на платформе, приводимой во вращение мотором с угловой скоростью 2200 об/мин и системой редукиции. Быстрое вращение мотора дает возможность сгладить пульсации сетевого напряжения. Стабильность подаваемого напряжения и сила тока в обмотке мотора контролировались по стрелочным приборам. Система редукиции позволяет понизить скорость

вращения платформы и дает возможность изменять ее в пределах $1/50 \div 1/6 \text{ с}^{-1}$.

Двухъячеевая циркуляция (рис. 2, а) возникает за счет разности температур, создаваемой охлажденным дном кюветы и свободной поверхностью. Разность температур верхней и нижней границ жидкости $\Delta T = T_{\text{в}} - T_{\text{н}}$ не изменяется при различных режимах вращения. В качестве рабочей жидкости использовалась дистиллированная вода.

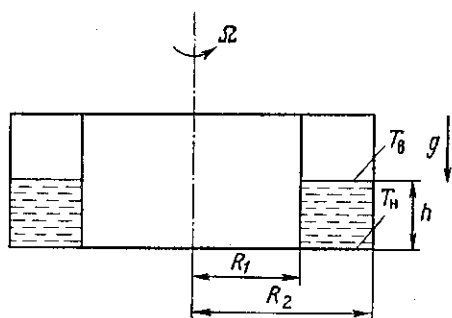


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

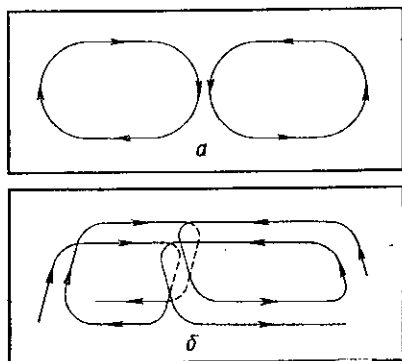


Рис. 2. Схематическое изображение конвективных ячеек: а — симметричное расположение в отсутствие вращения, б — наклон и поворот ячеек при наличии равномерного вращения

В отсутствие вращения расположение ячеек симметричное, хотя и неустойчивое, так как образовано встречными потоками. При этом $v_{\varphi} = 0$. Некоторые отклонения от этого условия, возможно, вызваны недостаточной юстировкой системы. При нарушении симметрии в расположении ячеек возникает направленный к центру перенос импульса. Гипотетические течения подобного вида рассмотрены Старром [2].

В настоящей работе возмущающим фактором является вращение. Действие его двоякое: центробежная сила ($-\Omega^2 R$) создает асимметрию в расположении ячеек, увеличивая правую ячейку и уменьшая левую (рис. 2, б). В результате же действия силы Кориолиса возникает компонента скорости $v_{\varphi} \neq 0$. Таким образом создается наклон ячеек в противоположные стороны. Траектории движения отдельных частиц уже не замкнутые. В силу асимметрии ячеек перенос импульса в центральную часть канала неодинаков. Это приводит к формированию вторичного течения, распространяющегося в сторону, противоположную вращению. При изменении угловой скорости вращения наблюдается изменение скорости вторичного течения.

Большинство экспериментов проводилось для глубины жидкости $h = 1 \text{ см}$. А так как охлаждение жидкости, ее физические свойства оставались постоянными, то единственным фактором, влиявшим на вид течения, оставалась угловая скорость вращения.

Наблюдения за движением жидкости проводились фотографическим методом. В качестве визуализатора использовались частицы молотого перца. Прослеживалось движение отдельных частиц визуализатора и строились траектории их движения: $R(t)$, $\varphi(t)$, $R(\varphi)$. Можно получить оценки средних скоростей $\Delta R/\Delta t$ и $\Delta \varphi/\Delta t$ и, используя их, рассчитать характерные безразмерные параметры задачи. Стоит отме-

тить, что, хотя лабораторные системы определяются довольно большим числом безразмерных параметров, для геометрически подобных систем и при заданных физических свойствах жидкости общий характер конвективного движения зависит лишь от чисел Россби и Тейлора [3]:

$$Ro = \frac{U}{2\Omega R_2}, \quad Ta = \frac{4\Omega^2 R_2^4}{\nu^2},$$

где U — средняя линейная скорость жидкости. Кроме того, в условиях эксперимента фиксируется разность температур и глубина слоя жидкости. Все остальные параметры в динамических уравнениях Буссинеска выражаются при этих условиях через числа Ro и Ta :

$$Re = Ro\sqrt{Ta}, \quad Gr = \frac{g\beta\Delta TR_2^3}{\nu^2} Ro^{-2} Ta^{-1}.$$

Эксперименты показали, что средние угловые скорости больше радиальных на порядок. Это дает возможность использовать для оценок Ro величину $\Delta\varphi/\Delta t$. Если, кроме того, произвести спектральный анализ

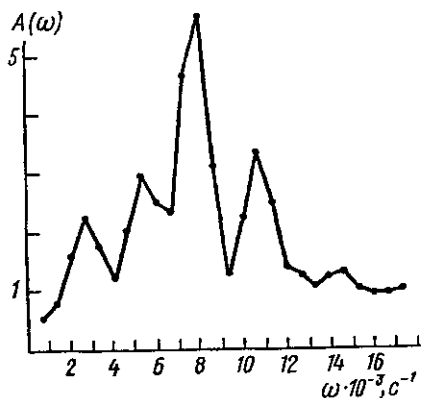


Рис. 3. Нормированная спектральная функция $A(\omega)$ при угловой скорости вращения $\Omega=1/11$ с⁻¹

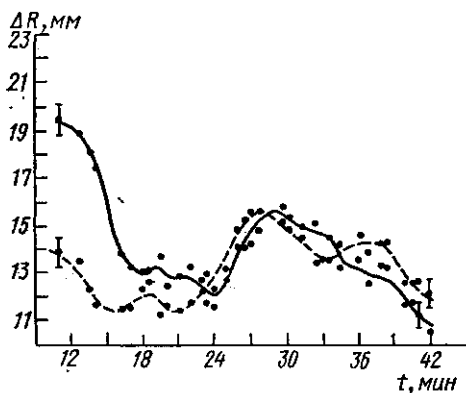


Рис. 4. Траектории движения двух частиц в канале при $\Omega=1/11$ с⁻¹ (сплошная и штриховая линии)

величины $\Delta\varphi/\Delta t$ за время эксперимента, то оказывается, что в спектре колебаний можно выделить доминирующие моды (рис. 3).

На рис. 4 изображено изменение во времени расположения двух частиц с близкими угловыми координатами ($\varphi_1=4^\circ$, $\varphi_2=3,5^\circ$, где φ — отсчет по лимбу) относительно стенок сосуда при угловой скорости вращения $\Omega=1/11$ с⁻¹. Частицы описывают похожие траектории относительно стенок сосуда, перемещаясь в центральную зону, где и остаются. Это свидетельствует в пользу устойчивости образовавшегося струйного течения. Изменение среднего значения ΔR , по-видимому, связано с изменением величины R_1 , так как установка не гарантирует точной осесимметричности ($R_1=17,7\pm 0,5$ см). Частицы совершают в этом случае полный оборот приблизительно к 30-й минуте, после чего траектория движения повторяется.

Особенностью задачи является то, что моделируется динамический режим, соответствующий атмосфере, а не термический, как в большинстве экспериментов по моделированию атмосферной циркуляции. Обзор таких экспериментов приводится в работах [4, 5]. Для них характерно наличие горизонтального разогрева жидкости. Это также приво-

дит к образованию струйных течений, но полученные значения v_0 невелики и укладываются в рамки геострофического приближения.

В нашем же случае величины скоростей существенно больше (хотя уже само использование поверхностной визуализации занижает число Ro , т. е. величину v_0 [5]). Это приводит к необходимости отказаться от геострофичности при описании подобной системы. Ошибки в измерениях величины $\Delta\varphi/\Delta t$ составляют 0,2 см/мин. Их величина определяется в контрольной серии измерений при $\Omega=0$, и их наличие можно объяснить, по-видимому, идеализацией симметрии ячеек.

Если использовать предположение Лоренца [6] о том, что роль эффективного коэффициента вязкости для атмосферы играет коэффициент турбулентной вязкости, который по крайней мере в 10^5 раз превосходит соответствующий молекулярный коэффициент, то число Тейлора для атмосферы будет порядка 10^7 . Кроме того, в области возникновения струйного течения в атмосфере число $Ro \sim 0,87$ (к этой области геострофическое приближение неприменимо). Таким образом, по безразмерным параметрам Ta и Ro используемая модель подобна земной атмосфере. Но в силу того, что смоделирована динамика процесса без учета его характерных особенностей (вид ячеек, поле температур), полной аналогии нет. Ячейки все-таки близки по форме (в реальной атмосфере различие в ячейках Хэдли и Ферреля более существенно), подобие в геометрических размерах не достигнуто (в атмосфере вертикальный размер гораздо меньше горизонтального). Например, в серии экспериментов с $h=0,5$ см для $\Omega=1/20$ с $^{-1}$ получается уже $v_0 \approx 2,1$ см/мин, т. е. величина v_0 сильно возрастает.

Таким образом, экспериментально удалось показать, что конвективные процессы могут быть ответственными за формирование струйных течений. Возможно, это справедливо и не только в случае субтропического струйного течения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Пальмен Э., Ньютон Ч. Циркуляционные системы атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1973. [2] Старр В. Физика явлений с отрицательной вязкостью. М.: Мир, 1971. [3] Fowles W. W., Hide R. J. Atmos. Sci., 1965, 22, p. 541. [4] Hide R., Mason P. J. Adv. in Phys., 1975, 24, p. 47. [5] Должанский В. Ф., Голлицы Г. С. Изв. АН СССР. ФАО, 1977, 13, с. 795. [6] Лоренц Е. Н. Природа и теория общей циркуляции атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1970.

Поступила в редакцию
26.10.83

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ, 1984, т. 25, № 3

УДК 539.186.22

РЕЗОНАНСНАЯ ФОТОИОНИЗАЦИЯ ГЕЛИЯ В ОБЛАСТИ МЕЖДУ ВТОРЫМ И ТРЕТЬИМ ПОРОГАМИ

С. М. Бурков, С. И. Страхова

(НИИЯФ)

Введение. Обоснование Купером, Фано и Пратсом [1] так называемой (\pm)-классификации квазистационарных состояний продемонстрировало необходимость использования при анализе резонансных явлений в гелии методов, учитывающих взаимодействие кулоновских конфигураций.

Для обсуждения на качественном уровне основных закономерностей и особенностей фотовозбуждения квазистационарных состояний