

УДК 532.517.3.013.2

© 1998 г. А.А. МОНАХОВ

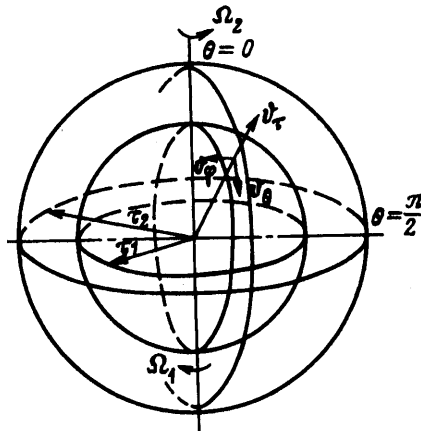
НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ВТОРИЧНЫЕ ТЕЧЕНИЯ В СФЕРИЧЕСКИХ СЛОЯХ

Представлены экспериментальные данные по исследованию смены вида вторичного режима на границе устойчивости основного течения в сферическом слое. Установлено, что в случае вращения сферических границ в одну сторону переход от основного течения на трехмерное вторичное течение происходит через нестационарный переходной режим.

Данные исследования являются продолжением работы [1], где в пространстве определяющих параметров представлена трехмерная граница устойчивости основного течения. Граница состоит из областей со своими характерными видами вторичных течений. Рассматривается схема смены вида вторичного течения при пересечении этих областей.

В сферической системе с координатами r , ϑ и φ (фиг. 1) основное течение [1] характеризуется тремя компонентами скорости: V_r , V_ϑ и V_φ , зависит от двух координат r , ϑ и определяется тремя параметрами подобия: $Re_1 = r_1^2 \Omega_1 / \nu$, $Re_2 = r_2^2 \Omega_2 / \nu$ – числами Рейнольдса, $\delta = (r_2 - r_1) / r_1$ – относительной толщиной сферического слоя. Здесь r_1 и r_2 – радиусы внутренней и внешней сфер, Ω_1 и Ω_2 – соответственно угловые скорости вращения сфер, ν – кинематическая вязкость жидкости. Движение жидкости задается вращением границ слоя. Основное течение состоит из дифференциального вращения вокруг оси и меридиональной циркуляции, обусловленной центробежной силой; частица жидкости движется по спиральной траектории. При малых числах Re вклад меридиональной циркуляции незначительный.

Работа проводилась на установке с размерами внешней сферической оболочки $r_2 = 150,08$ мм и относительной толщиной сферического слоя $\delta = 0,1096$. Значения чисел Re_1 и Re_2 изменялись в диапазоне от 0 до 10^6 за счет использования жидкостей с различными коэффициентами вязкости и изменения угловых скоростей вращения сферических границ. Для регистрации потери устойчивости основным течением



Фиг. 1. Область течения и система координат (τ следует читать как r)

применялись различные методы визуализации, измерения момента вращения M и лазерная анемометрия. Использовалась температурная стабилизация жидкости (силиконовое масло) и стабилизация угловой скорости вращения обеих сфер. Это давало возможность поддерживать значения числа Re на время проведения эксперимента с нестабильностью $\pm 0,05\%$. Более подробное описание экспериментальной установки дано в [2].

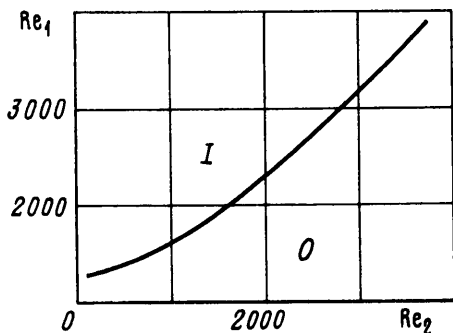
По экспериментальным данным [3], в сферическом слое $\delta = 0,1096$ при вращении только внутренней сферы на границе устойчивости в области экватора за счет центробежной неустойчивости образуются два кольцевых вихря аналогично течению между вращающимися цилиндрами. Переход от осесимметричного основного течения к вторичному осесимметричному течению происходит через нестационарный неосесимметричный режим ($Re^* = 1225$). Гистерезис образования и распада режима с двумя кольцами составляет $0,08\%$.

В расчетах [4] также было показано, что при отказе от условия экваториальной симметрии образование 2-кольцевого режима на границе устойчивости основного течения происходит без введения конечно-амплитудных возмущений. А переход от одного осесимметричного режима к осесимметричному вторичному течению происходит в виде нестационарного переходного режима в результате докритической бифуркации.

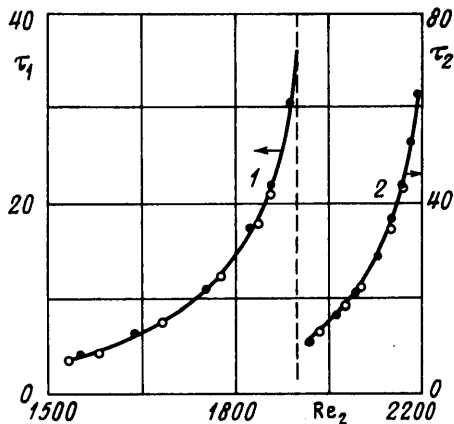
В сферическом слое при вращении обеих сферических границ механизм центробежной неустойчивости в отличие от течения между вращающимися цилиндрами действует в ограниченной области значений чисел Re_2 . Согласно ранее полученным экспериментальным данным, только в диапазоне чисел $-500 < Re_2 < 1320$ на границе устойчивости основного течения образуются два стационарных тейлоровских кольца [3, 7]. Вне этой области образуются неосесимметричные течения в виде спирали, замкнутой в области экватора (бегущие азимутальные волны). Положительные значения Re_2 характеризуют вращение сферических границ в одну сторону, отрицательные – в разные.

Режим бегущей азимутальной волны в дальнейшем получен и в расчетах [5] для сферического слоя $\delta = 0,11$ при вращении обеих сферических границ в одну сторону. Вследствие больших затрат машинного времени вычисления проводились при одном значении числа $Re_2 = 2050$ и скачкообразном увеличении значений Re_1 с 2492,9 до 2495. Полученная структура вторичного режима в виде бегущей азимутальной волны хорошо согласуется с нашими экспериментальными данными [3].

Экспериментальная граница устойчивости основного течения при вращении сферических границ в одну сторону представлена на фиг. 2. Область под кривой отмечена символом O и соответствует основному течению, символом I – вторичным режимам течения. Более точные экспериментальные исследования показали, что при числах $1940 > Re_2 > 1320$ на границе устойчивости первоначально образуется режим в виде спирали, который является переходным. Без изменения значений Re_1 и Re_2 через некоторый промежуток времени спирали замыкаются, образуя два стационарных тейлоровских кольца в области экватора. Точка перехода основного течения на вторичный режим определялась при фиксированном значении Re_2 и плавном увеличении значения Re_1 до значения $Re_1 = Re_1^*$. При уменьшении числа Re_1 этот режим перестраивается на основное течение, минуя нестационарную фазу. С увеличением Re_2 время существования переходного спирального режима τ_1 на границе устойчивости растет. Зависимость этого времени от Re_2 на границе устойчивости представлена на фиг. 3 кривой I , где $\tau_1 = rv/d^2$ и $d = r_2 - r_1$. Измерения проводились при двух значениях вязкости жидкости ($\nu_1 = 118$ сСт, $\nu_2 = 72$ сСт). При $\tau > \tau_1(Re_2)$ имеет место режим с кольцами, при $\tau < \tau_1(Re_2)$ – спиральный переходной режим. Кривая $\tau_1(Re_2)$ имеет асимптоту: для $Re_2 > 1940$ спиральный режим уже не перестраивается, это установившийся вторичный режим течения.



Фиг. 2. Граница устойчивости основного течения при вращении обеих сферических границ, $\delta = 0,1096$



Фиг. 3. Время существования переходных режимов: 1 – "спирали", 2 – "елочка"

По-видимому, при вращении сферических границ в одну сторону на границе устойчивости в диапазоне $1940 > Re_2 > 1320$ образование вторичного режима в виде двух тейлоровских колец в области экватора через переходной спиральный режим связано с развитием интенсивной меридиональной циркуляции и возрастанием действия силы Кориолиса на вторичное течение.

В области значений $2200 < Re_2 < 4290$ вторичное течение имеет форму периодических по φ координате возмущений с большим азимутальным числом n и напоминает по форме "елочку" [3]. Режим имеет фазовую скорость распространения в направлении вращения сферических границ и промежуточную между Ω_1 и Ω_2 . В начальной области границы устойчивости возмущения образуют с плоскостью экватора угол около 45° , однако по мере увеличения Re_2 возмущения становятся все более вертикальными.

Режим этот можно наблюдать и при числах $Re_2 < 2200$ в виде переходного, нестационарного режима. Здесь обнаружен аналогичный описанному механизму смены вида вторичного течения. В диапазоне значений $1970 < Re_2 < 2200$ на границе устойчивости без изменения значений Re_1 и Re_2 образовавшиеся возмущения в виде "елочки" группируются по φ -координате и режим перестраивается в спиральное вторичное течение, которое уже существует стационарно. По мере увеличения Re_2 время существования переходного режима "елочка" на границе устойчивости увеличивается и при числах $Re_2 > 2200$ режим становится установившимся. Зависимость времени существования переходного режима "елочка" на границе устойчивости $\tau_2 = \tau v/d^2$ от Re_2 представлена на фиг. 3 кривой 2 – эта зависимость измерялась также при двух значениях вязкости.

Таким образом механизм смены вида вторичного течения на границе устойчивости и проявление нестационарности можно объяснить возрастанием роли силы Кориолиса. Динамика возмущений здесь начинает подчиняться теореме Тейлора – Праудмена, согласно которой медленные установившиеся движения маловязкой жидкости во вращающихся системах не могут меняться в направлении оси вращения [6]. Поскольку такие движения в силу сферической геометрии запрещены, возмущения преодолевают эти ограничения через дробление азимутального масштаба и нестационарности (периодичности).

Заключение. На границе устойчивости при вращении сферических границ в одну сторону смена формы вторичного течения происходит через нестационарный режим. Время перехода увеличивается с ростом Re_2 .

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 96-01-01340).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Монахов А.А.* Граница устойчивости основного течения в сферических слоях // Изв. АН МЖГ. 1996. № 4. С. 66–70.
2. *Петров Г.И., Яворская И.М., Беляев Ю.Н. и др.* Моделирование динамических процессов в атмосферах планет: Препринт № 255. М.: ИКИ АН СССР, 1975. 38 с.
3. *Яворская И.М., Беляев Ю.Н., Монахов А.А.* Исследование устойчивости и вторичные течения во вращающихся сферических слоях при произвольных числах Россби // Докл. АН СССР. 1977. Т. 237. № 4. С. 804–807.
4. *Астафьева Н.М.* Численное моделирование несимметричного относительно плоскости экватора сферического течения Куэтта // Изв. АН СССР. МЖГ. 1985. № 3. С. 56–62.
5. *Зиканов О.Ю.* Численное моделирование неустойчивостей и вторичных режимов в сферическом течении Куэтта // Изв. АН МЖГ. 1995. № 1. С. 3–15.
6. *Гринспен Х.П.* Теория вращающихся жидкостей. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 304 с.
7. *Джозеф Д.* Устойчивость движений жидкости. М.: Мир, 1981. 638 с.

Москва

Поступила в редакцию
26.XI.1996