

УДК 532.527.013.4

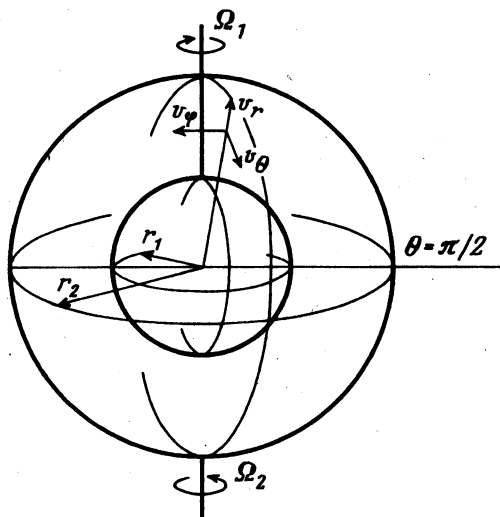
© 1999 г. С.Я. ГЕРЦЕНШТЕЙН, Д.Ю. ЖИЛЕНКО, О.Э. КРИВОНОСОВА,
А.А. МОНАХОВ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И УСТОЙЧИВОСТИ ТЕЧЕНИЯ В ТОЛСТОМ СФЕРИЧЕСКОМ СЛОЕ МЕЖДУ РАЗНОВАРАЩАЮЩИМИСЯ СФЕРАМИ

Проведено экспериментальное исследование структуры основного течения и его устойчивости в слое относительной толщины $\delta = (r_2 - r_1)/r_1 = 1,006$ между двумя концентрическими сферами (r_1, r_2 – радиусы внутренней и внешней сфер), соосно вращающимися относительно вертикальной оси с различными угловыми скоростями Ω_1 и Ω_2 . В диапазоне параметров $0 < \text{Re}_1 = \Omega_1 r_1^2 / \nu < 1000$ и $-1200 < \text{Re}_2 = \Omega_2 r_2^2 / \nu < 800$ (ν – кинематическая вязкость жидкости в слое) получена граница устойчивости основного течения. Исследованы различные сценарии потери устойчивости, связанные с изменением структуры меридиональной циркуляции основного течения.

Проведено экспериментальное исследование устойчивости основного течения в слое между концентрическими сферическими поверхностями, вращающимися с различными угловыми скоростями относительно вертикальной оси. Основное течение в сферическом течении Куэтта состоит из дифференциального вращения и сложного меридионального движения и его структура определяется числами Рейнольдса, построенными по параметрам внутренней Re_1 и внешней Re_2 сфер, и относительной толщиной слоя δ . Основное течение симметрично относительно плоскости экватора и оси вращения сфер, имеет три компоненты скорости u_r, u_θ, u_φ и зависит от двух координат r и θ (фиг. 1).

В работах [1–4] приведены результаты экспериментального исследования сферического течения Куэтта в слоях разной толщины δ от 0,0163 до 1,006. Было установлено, что по виду вторичного течения при вращении только внутренней сферы слой делится на тонкие, с образованием вихрей типа Тейлора, и толстые, с образованием трехмерного периодического (по времени и по координате φ) течения. Для слоев $\delta \leq 0,54$ получены границы устойчивости основного течения и области существования вторичных режимов в широком диапазоне определяющих параметров. Слой $\delta = 1,006$ исследовался при вращении только внутренней сферы. Этот слой относится к толстым слоям, основное течение неустойчиво относительно трехмерных периодических возмущений [4]. Вторичный режим на пределе устойчивости представляет собой периодическое по долготе волновое течение, состоящее из равного числа вихрей в каждой полусфере. Вся картина течения распространяется в азимутальном направлении с фазовой скоростью, слабо зависящей от числа Re_1 и "отстающей" от скорости вращения внутренней сферы. В [4] было измерено, а впоследствии в [5] уточнено критическое число Рейнольдса, соответствующее потере устойчивости основным течением, в слое $\delta = 1,006$, ($\text{Re}_c = 460 \pm 2$). Для случая вращения обеих границ слоя структура основного и вторичного течений и граница устойчивости не исследовались.



Фиг. 1. Геометрия сферического слоя

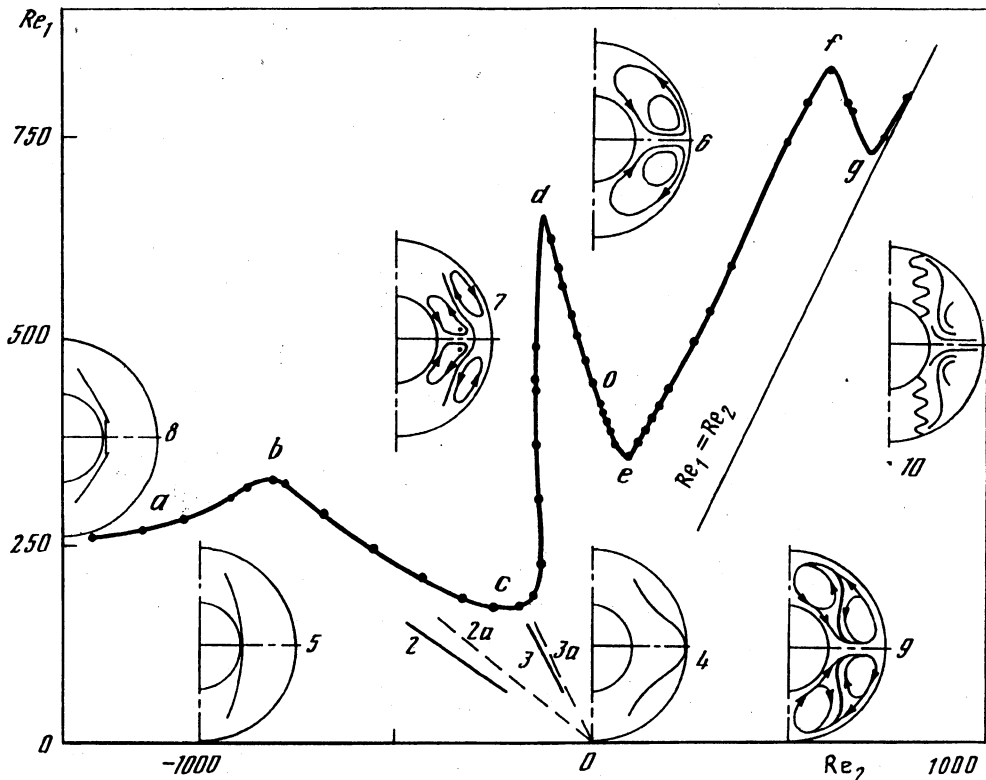
Течение жидкости в толстом слое рассматривалось также и теоретически [6–8]. В работе [7] получено хорошее согласие с экспериментом [4, 5] как в определении границы устойчивости основного течения, так и в форме вторичного течения. Показано, в частности, что переход к вторичному режиму, так же как и в экспериментах [4, 5], является безгистерезисным.

В данной работе для слоя $\delta = 1,006$ при вращении обеих сфер представлены результаты экспериментального исследования структуры основного течения и границ его устойчивости. Исследования проводились в диапазоне параметров: $0 < Re_1 < 1000$, $-1200 < Re_2 < 800$ (отрицательные значения Re_2 соответствуют вращению сфер в противоположные стороны). Результаты получены на установке "Шар" [1] Института механики МГУ. Радиус внешней сферы $r_1 = 150$ мм. Скорости вращения сфер и температура в слое поддерживались постоянными с погрешностями: вращение внутренней сферы – 0,03%, вращение внешней сферы – 1,2%, температура в слое – 0,03%. Подробное описание установки давно в [1].

Для исследования структуры течения и определения границы устойчивости использовалась визуализация течения в меридиональной плоскости. Для этого в жидкость добавлялось небольшое количество (менее 0,002%) алюминиевой пудры. Освещение жидкости с добавленной в нее пудрой щелевым источником света, расположенным параллельно оси вращения сфер, позволяло наблюдать и регистрировать с помощью фото- и видеоаппаратуры структуру течения в меридиональной плоскости.

Для определения момента потери устойчивости основным течением при фиксированном значении числа Re_2 значение Re_1 увеличивалось квазистатически за счет увеличения скорости вращения сферы с шагом $\Delta Re_1 / Re_1 < 0,2\%$ (на некоторых участках при фиксированном значении Re_1 квазистатически с таким же шагом изменялось число Re_2), далее режим течения выдерживался не менее 20 мин (некоторые режимы выдерживались 1 ч). Момент потери устойчивости определялся визуально, по появлению периодичности в структуре течения. Аналогично, но с квазистатическим уменьшением соответствующего числа Рейнольдса, определялся переход от вторичного течения к основному. Значения чисел Рейнольдса определялись по измерениям скорости вращения сфер.

Визуализация основного течения, в меридиональной плоскости показала, что при вращении обеих сферических границ даже небольшие изменения чисел Рейнольдса могут приводить к существенному изменению структуры меридионального течения.



Фиг. 2. Границы устойчивости и структура течения. 1 – граница устойчивости основного течения, эксперимент; 2, 3 – границы существования двухвихревой меридиональной циркуляции вблизи экватора, эксперимент; 2а, 3а – расчетные границы области существования двухвихревой меридиональной циркуляции [6]; 4–10 – схематическое изображение структуры течения в меридиональной плоскости

Так, в случае противоположного вращения границ слоя при $Re_1 > 50$ и $-Re_2 > 10$ экспериментально установлено существование трех разновидностей меридиональной циркуляции основного течения. В этой области меридиональное течение в каждой из полусфер (верхней и нижней) всегда является двухвихревым, подтверждением чему служит наличие в меридиональной плоскости линии раздела между внутренней и внешней циркуляциями. Однако в зависимости от соотношения чисел Re_1 и Re_2 положение этой линии раздела сильно изменяется, особенно в приэкваториальной области.

Приведенные на фиг. 2 кривые 2 и 3 соответствуют экспериментально полученным границам существования двухвихревой циркуляции вблизи экватора. В области, ограниченной слева кривой 3, линия раздела циркуляций всегда приближена к внешней границе сферического слоя (схема 4, фиг. 2), а в области, ограниченной справа кривой 2, линия раздела циркуляций приближена к внутренней границе сферического слоя (схема 5 на фиг. 2). Между кривыми 2 и 3 находится область двухвихревой меридиональной циркуляции, линия раздела которой на всем своем протяжении удалена от обеих границ сферического слоя. Внутренняя и внешняя циркуляции во всей рассматриваемой области имеют противоположное направление. Далее будет показано, что вид меридиональной циркуляции основного течения существенным образом определяет сценарий перехода к неустойчивости и структуру вторичного течения. Пред-



Фиг. 3. Вторичное течение на участке $d-e$

ставленные для сравнения кривые $2a$ и $3a$ получены аналитически (например, в [6]). Они ограничивают расчетную область существования двухвихревой меридиональной циркуляции [6].

На фиг. 2 приведена граница устойчивости основного течения (кривая 1), полученная в данной работе. Во всем исследованном диапазоне параметров Re_1 и Re_2 кривая является безгистерезисной в пределах точности эксперимента. Там же схематически изображен вид основного (схемы 6–9) и вторичного (схема 10) течений при различных значениях определяющих параметров.

В точке O наступление неустойчивости сказывается первоначально в появлении квазисинусоидального волнового возмущения, распространяющегося в азимутальном направлении [2]. Стационарная осесимметричная меридиональная циркуляция преобразуется в периодические по φ подковообразные вихри, причем последние смещены на полпериода относительно друг друга в верхней и нижней полусферах [2, 4]. В данной работе структура течения наблюдалась в меридиональной плоскости. На схеме 6 фиг. 2 показана структура основного течения на пределе устойчивости: граница раздела течения в верхней и нижней полусферах, совпадающая с плоскостью экватора, и стационарная меридиональная циркуляция, симметричная относительно экватора. При потере устойчивости наблюдается колебание границы раздела с амплитудой, увеличивающейся по мере приближения к внешней границе слоя.

Установлено, что при небольших числах Re_2 ($|Re_2| < 100$, кривая $d-e$) сценарий потери устойчивости основным течением и вид вторичного течения (фиг. 3) качественно



Фиг. 4. Основное течение на пределе устойчивости на участке $c-b$

аналогичны наблюдаемым при $Re_2 = 0$ (точка O). Имеются различия в структуре основного течения при $Re_2 < 0$, вызванные вращением внешней сферы: это образование в приполярной области слабого вихря меридиональной циркуляции и вытеснение внутреннего вихря меридиональной циркуляции в приэкваториальную область. Отмечено не наблюдавшееся ранее существенное возрастание предела устойчивости основного течения на участке $d-O$.

Участок $d-c$ границы устойчивости практически вертикален. Он соответствует значению Re_2 предполагаемого пересечения границы устойчивости основного течения l и кривой 3 . Для определения потери устойчивости течением на этом участке при $Re_1 = \text{const}$ квазистатически изменялось значение Re_2 . Обнаружено, что вторичное течение и переход к нему здесь также качественно подобны наблюдаемым в точке O . Однако частота колебаний границы раздела течений в верхней и нижней полусферах падает до значений не более $0,1\Omega_2$, а максимальная амплитуда колебаний этой границы раздела возрастает до $\delta/2$.

На участке $c-b$ переходу к неустойчивости предшествует смещение центров внутренних циркуляций обеих полусфер по направлению к экватору и к внешней сфере (схема 7, фиг. 2). Для линии раздела меридиональных циркуляций характерно вытягивание ее центральной (приэкваториальной) части в сторону внешней сферы (см. фиг. 4). Потеря устойчивости первоначально проявляется в экваториальной области в виде колебаний линии раздела в меридиональной плоскости и сопровождается разрушением внутренней меридиональной циркуляции.

Дальнейшее увеличение $|Re_2|$ соответствует области, ограниченной справа кривой 2 (участок $b-a$). Здесь основное течение (схема 8, фиг. 2) теряет устойчивость в приполярной области, возможно, вследствие потери устойчивости экмановским слоем, как и для течения в тонких слоях [1-3]. Развивается вторичное течение в виде спиралей, распространяющихся от полюса к экватору с образованием видимых разрывов линии раздела меридиональных циркуляций.

При вращении сферических границ слоя в одну сторону ($Re_2 > 0$) формируется меридиональное течение с достаточно сложной структурой. Так, при $\Omega_1 > \Omega_2$ и $Re_2 > 100$ (участок $e-f$) в меридиональной плоскости начинает хорошо просматриваться вытянутый вдоль оси вращения и симметричный относительно экватора сдвиговый слой S-образной формы, разделяющий две меридиональные циркуляции (схема 9, фиг. 2). Направления вращения в этих циркуляциях совпадают, и они в свою очередь включены в общую циркуляцию того же направления. В сферическом зазоре S-образный сдвиговый слой образует симметричную относительно оси вращения поверхность.

Неустойчивость течения в этом случае сопровождается разрушением внешней из циркуляций и образованием ряда периодических вихрей, вытянутых вдоль оси вращения и распространяющихся в азимутальном направлении. При этом сдвиговая поверхность деформируется (становится волнообразной по азимутальному углу), в меридиональной плоскости это приводит к периодическому движению S-образного сдвигового слоя в направлении, перпендикулярном оси вращения. Граница раздела течений в верхней и нижней полусферах, совпадающая с экватором, остается неподвижной, т.е. вторичное течение симметрично относительно плоскости экватора.

Дальнейшее увеличение скорости вращения внешней сферы (участок $f-g$) приближает границу устойчивости основного течения к прямой $Re_1 = Re_2$. Структура основного течения на этом участке в общих чертах сохраняется, однако как сценарий потери устойчивости, так и вид вторичного течения изменяются. Возможно, что эти изменения обусловлены изменением соотношения интенсивностей меридиональных циркуляций. В отличие от участка $e-f$ в этой области сначала наблюдается волнообразное возмущение, распространяющееся вдоль S-образного сдвигового слоя. Вторичное течение в каждой из полусфер состоит из ряда периодических вихрей, на которые распадается внешняя меридиональная циркуляция, сложного периодического движения S-образного сдвигового слоя и азимутального движения винтообразной поверхности, вытянутой вдоль оси вращения и ограничивающей область под (или над) внутренней сферой (схема 10 на фиг. 2). Фазовая скорость распространения периодических вихрей в азимутальном направлении больше скорости вращения винтообразной поверхности, вдоль которой отслеживается движение по направлению к полюсу. Вторичное течение остается симметричным относительно плоскости экватора.

Заключение. Получена граница устойчивости основного течения в толстом сферическом слое ($\delta = 1,006$) в плоскости параметров Re_1, Re_2 . Переход к неустойчивости во всем диапазоне определяющих параметров является безгистерезисным в пределах точности эксперимента. Обнаружено, что изломы на полученной кривой соответствуют смене сценариев потери устойчивости, которые в свою очередь связаны с изменением структуры основного течения. При вращении сфер в разные стороны ($-100 < Re_2 < 0$) установлено резкое возрастание предела устойчивости основного течения. При $600 < Re_2 < 700$ обнаружен новый вид вторичного течения с образованием винтообразной поверхности, вытянутой вдоль оси вращения, с диаметром, приблизительно равным диаметру внутренней сферы.

Авторы выражают признательность Н.М. Астафьевой за плодотворное обсуждение представленных результатов и В.И. Рогатину за помощь в работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Яворская И.М., Беляев Ю.Н., Монахов А.А. Экспериментальное изучение сферического течения Куэтта // Докл. АН СССР. 1975. Т. 221. № 5. С. 1059–1062.

3. *Монахов А.А.* Граница устойчивости основного течения в сферических слоях // Изв. РАН. МЖГ. 1996. № 4. С. 66–70.
4. *Беляев Ю.Н., Монахов А.А., Яворская И.М.* Устойчивость сферического течения Куэтта в толстых слоях при вращении внутренней сферы // Изв. АН СССР. МЖГ. 1978. № 2. С. 9–15.
5. *Беляев Ю.Н., Монахов А.А., Щербаков С.А., Яворская И.М.* Неединственность последовательности переходов к турбулентности во вращающихся слоях // Докл. АН СССР. 1984. Т. 279. № 1. С. 51–54.
6. *Яворская И.М., Астафьева Н.М.* Течения вязкой жидкости в сферических слоях: Обзор № 10. М.: ИКИ АН СССР, 1974. 42 с.
7. *Dumas G.* The spherical Couette flow and its large-gap stability by spectral simulation // Presented at CED94 (CED Society of Canada). Toronto, 1994.
8. *Астафьева Н.М.* Анализ устойчивости течений во вращающихся сферических слоях (линейная теория) // Изв. РАН. МЖГ. 1997. № 6. С. 63–73.

Москва

Поступила в редакцию
23.III.1998