

03

Формирование турбулентных течений в сферическом слое при переменной скорости вращения внешней сферы

© Д.Ю. Жиленко, О.Э. Кривоносова

Институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва
E-mail: jilenko@imec.msu.ru

Поступило в Редакцию 20 декабря 2011 г.

Экспериментально изучены переходы к турбулентным режимам течения вязкой несжимаемой жидкости в сферическом слое при периодическом изменении угловой скорости вращения внешней сферы и постоянной скорости вращения внутренней сферы. Рассматривается периодическое течение, формирующееся при вращении сферических границ с постоянными скоростями во встречном направлении. Изучено влияние амплитуды и частоты модуляции скорости вращения внешней сферы на переход от рассматриваемого течения к хаосу. На основании визуализации и измерений скорости течения лазерным доплеровским анемометром показана возможность формирования турбулентных течений с пространственно-временной перемежаемостью.

Для крупномасштабных геофизических течений характерным является присутствие сферической геометрии и вращения, в том числе и нестационарного. Влияние вращения на течение со сферической геометрией может быть учтено в модельном сферическом течении Куэтта, представляющем собой течение вязкой несжимаемой жидкости под действием вращения концентрически расположенных сфер вокруг общей оси. При стационарной скорости вращения сфер параметры подобия течения следующие: числа Рейнольдса $Re_k = \Omega_k r_k^2 \nu$, определяемые для внутренней ($k = 1$) и внешней ($k = 2$) сфер, и относительная толщина слоя жидкости $\sigma = (r_2 - r_1)/r_1$. Здесь r_k , Ω_k ($k = 1, 2$) — радиус и угловая скорость вращения соответствующей сферы, ν — кинематическая вязкость жидкости в слое.

Переходы к стохастичности в сферических слоях наиболее полно изучены в случае квазистатического возрастания числа Re_1 (присутствие участков с $\partial/\partial t(Re_1) = 0$) и постоянного числа Re_2 . Так, для

рассматриваемого в данной работе слоя относительной толщины $\sigma = 1$, формирование турбулентных течений при вышеуказанных условиях исследовано как экспериментально, так и численно [1–3]. Установлено, что к формированию турбулентных течений может приводить и периодическое изменение угловой скорости вращения одной из сферических границ, но подробно такие ламинарно-турбулентные переходы еще не изучены. Влияние периодического изменения угловой скорости вращения на изменение течения в сферическом слое исследовалось для переменной скорости как внутренней сферы [4], так и внешней [5]. В первом случае в качестве начального выбиралось состояние покоя ($Re_1 = Re_2 = 0$), во втором случае — твердотельное вращение ($Re_1 = Re_2$), изучались изменения в пространственных структурах течений с ростом амплитуды модуляции. Выводы о формировании турбулентных режимов были сделаны на основании визуализации течений. Таким образом, при отсутствии измерений остается открытым вопрос о виде ламинарно-турбулентных переходов при периодическом изменении скорости вращения одной из границ.

В данной работе переход к турбулентности изучен в случае встречного вращения сферических границ. В качестве начального состояния рассматривается ранее подробно изученное в [6] периодическое течение, которое образуется вследствие синхронизации частот предшествующего ему при меньших числах Re_1 трехчастотного режима течения. Цель данной работы состоит в экспериментальном определении пределов существования этого течения в присутствии модуляции скорости вращения внешней сферы и неизменной скорости вращения внутренней, а также в определении вида ламинарно-турбулентного перехода при увеличении амплитуды модуляции.

Эксперименты проведены в сферическом слое с радиусами внутренней и внешней сфер 0.075 и 0.15 м соответственно. Слой наполнялся силиконовым маслом с вязкостью $\nu \approx 510^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ с небольшим добавлением алюминиевой пудры для визуализации течения. Для стабилизации температуры в слое внешняя сфера помещалась в термостат, также заполненный силиконовым маслом. Температура измерялась датчиком, расположенным на экваторе внешней сферы, и поддерживалась постоянной, с точностью не менее $\pm 0.05^\circ\text{C}$. Измерения азимутальной скорости течения проводились лазерным анемометром в точке, удаленной от плоскости экватора на расстояние 0.078 м и от оси вращения на 0.105 м. Скорость вращения внутренней сферы поддерживалась постоянной.

Скорость вращения внешней сферы $\Omega_2(t) = \Omega_{20}(1 + A_2 \sin(2\pi f_2 t + \varphi_2))$ изменялась с задаваемой системой управления амплитудой A_2 и частотой f_2 со средней погрешностью не более 0.2% от заданных значений. Эксперименты проводились следующим образом: при неизменной скорости вращения внешней сферы, соответствующей $Re_2 = -900$, скорость внутренней сферы квазистатически увеличивалась вплоть до $Re_1 = 413$ и затем оставалась постоянной. Через 15 min после установления периодического режима с синхронизацией амплитуду модуляции скорости вращения внешней сферы A_2 начинали увеличивать от нуля до заданного значения при постоянной частоте модуляции f_2 . Увеличение амплитуды проводилось квазистатически, с обязательным присутствием участков $\partial/\partial t(A_2) = 0$. Величина частоты модуляции находилась в диапазоне $0.005 \text{ Hz} < f_2 < 0.05 \text{ Hz}$, величина амплитуды A_2 не превышала 0.2. Зависимости азимутальной скорости от времени получены для частот модуляции 0.01 и 0.02 Hz.

Выбранные в эксперименте параметры подобия ($Re_1 = 413$ и $Re_2 = -900$) расположены вблизи бифуркационной границы, разделяющей области существования периодического режима с синхронизацией и трехчастотного режима течения. Граница установлена экспериментально в [7] при квазистатическом увеличении числа Re_1 и в плоскости (Re_1, Re_2) расположена таким образом что при квазистатическом (пошаговом) увеличении скорости вращения внешней сферы из точки с координатами $(Re_1 = 413, Re_2 = -900)$ происходит переход в область существования трехчастотного режима. При квазистатическом уменьшении скорости вращения внешней сферы происходит удаление от бифуркационной границы еще глубже в область существования синхронизации, при этом фазовая скорость распространения вихрей увеличивается. Поэтому при модуляции скорости внешней сферы, начиная с определенной амплитуды, происходит процесс периодического пересечения бифуркационной границы.

Влияние модуляции рассмотрим на примере изменений в спектре измеряемой в эксперименте азимутальной компоненты скорости и в структуре течения. При отсутствии модуляции в спектре (рис. 1, кривая 1) присутствует одна частота $f_1 = 0.031 \text{ Hz}$ и ее высшие гармоники ($2f_1, 3f_1$ и т.д.). Пространственная структура течения при этом экваторосимметрична и состоит из трех вихрей в верхней и нижней полусферах, распространяющихся в азимутальном направлении. При ненулевой амплитуде модуляции в спектре появляется второй пик,

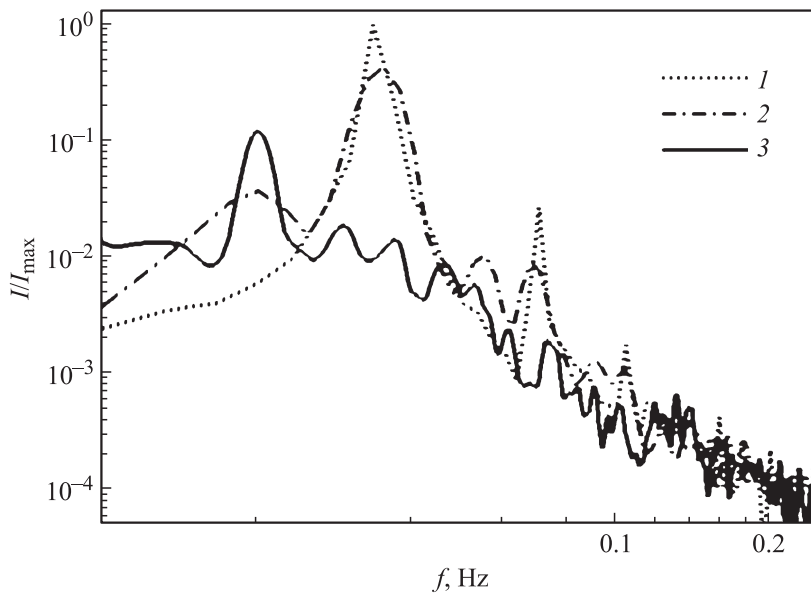


Рис. 1. Спектры пульсаций азимутальной компоненты скорости при частоте модуляции скорости вращения внешней сферы $f_2 = 0.02$ Hz: 1 — $A_2 = 0$, 2 — $A_2 = 0.0305$, 3 — $A_2 = 0.0768$.

соответствующий частоте колебаний скорости вращения внешней сферы $f_2 = 0.02$ Hz (рис. 1, кривая 2). Пространственная структура течения при этом сохраняется, однако фазовая скорость распространения вихрей в азимутальном направлении становится неравномерной. При дальнейшем увеличении амплитуды на частоте f_1 модуляции величина пика на частоте f_2 растет, а пика на частоте f_1 уменьшается, а затем пик пропадает, при этом уровень спектра при низких частотах ($f \leq f_1$) возрастает почти в 10 раз (рис. 1, кривая 3). При этом наблюдаются потеря течением симметрии относительно плоскости экватора и разрушение первоначальной пространственной структуры. Таким образом, начиная с определенной величины амплитуды модуляции скорости вращения внешней сферы, начинает формироваться хаотический режим течения. Необходимо отметить, что при постоянных скоростях вращения сфер в этой области параметров подобия хаотический режим не наблюдался,

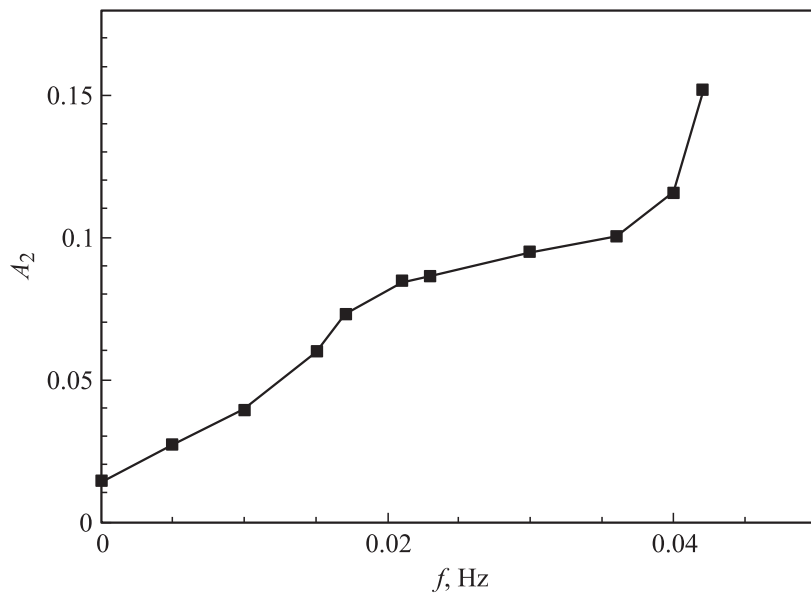


Рис. 2. Зависимость критической величины амплитуды модуляции A_2 от частоты модуляции f_2 .

а начал формироваться при существенно более высоких числах $Re_1 > 450$ [3,7].

На рис. 2 показана зависимость критической величины амплитуды модуляции, при которой происходит разрушение периодического режима течения, от частоты модуляции. В качестве критической величины использовалось то минимальное значение амплитуды модуляции, превышение которого не сопровождалось последующим (в течение 5–10 min) долговременным восстановлением первоначального режима течения. На нулевой частоте условно показана граница существования периодического течения при квазистатическом изменении скорости вращения внешней сферы. При частоте модуляции свыше 0.04 Hz величина критической амплитуды модуляции начинает резко увеличиваться, и касательная к зависимости амплитуды от частоты приближается к вертикали.

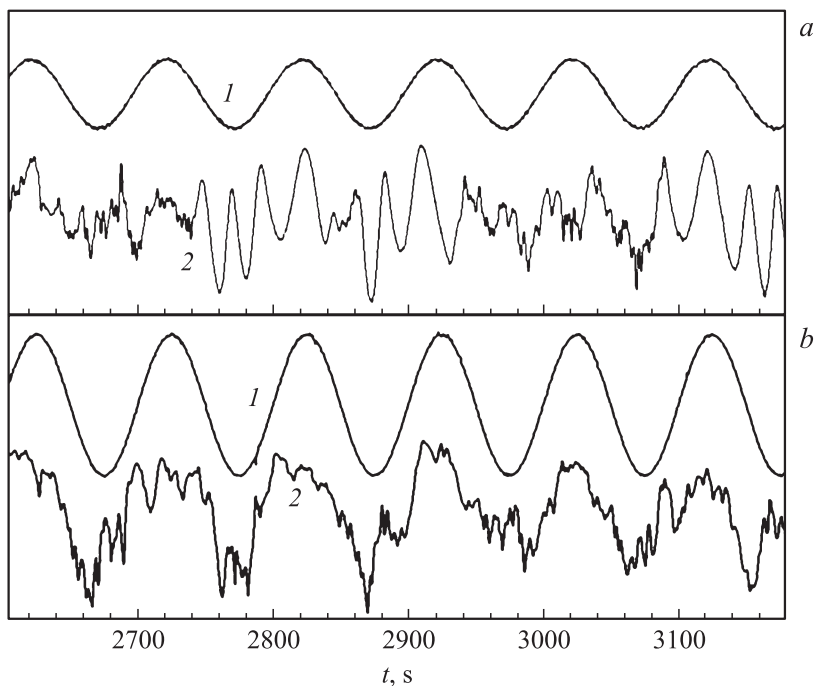


Рис. 3. Зависимость от времени скорости вращения внешней сферы (1) и азимутальной компоненты скорости (2) при частоте модуляции $f_2 = 0.01$ Hz и амплитуде модуляции: *a* — $A_2 = 0.0526$, *b* — $A_2 = 0.108$.

Рассмотрим более подробно особенности течения при амплитудах модуляции выше критических. В зависимости измеряемой в эксперименте азимутальной скорости течения от времени (рис. 3, *a*) заметным является чередование во времени хаотических и регулярных участков, которое наблюдается во всем исследованном диапазоне изменения A_2 . Регулярные участки начинаются, как правило, в фазе снижения скорости вращения внешней сферы, т. е. при переходе в область существования синхронизации, и характеризуются изменяющейся во времени частотой вихрей. Такое же чередование во времени хаотического и регулярного режимов течения наблюдается и в пространственной структуре течения. Причем изменение структуры течения происходит во всем сферическом

слое одновременно, а не в его отдельных областях. Пространственная структура регулярного режима течения полностью соответствует структуре первоначального периодического течения. Такое явление при формировании хаоса принято называть перемежаемостью, которая представляет собой один из классических сценариев развития турбулентности в замкнутых течениях [8] и наблюдалась ранее только при стационарных граничных условиях, в том числе и в сферических слоях [9]. С увеличением амплитуды модуляции (рис. 3, *b*) становится заметной корреляция между величинами угловой скорости вращения и измеряемой в течении скоростью, а общая продолжительность регулярных участков снижается.

Таким образом, воздействие периодического изменения угловой скорости вращения внешней сферы на течение с синхронизацией приводит к переходу к стохастичности через перемежаемость. Возможность перехода к хаосу через перемежаемость в объектах с синхронизацией показана в теории динамических систем: в случае синхронизации периодических автоколебаний и периодического внешнего воздействия переход происходит при увеличении амплитуды внешнего воздействия [10]. По аналогии можно рассматривать периодическое изменение скорости вращения внешней сферы как внешнее воздействие по отношению к режиму с синхронизацией. С другой стороны, наблюдаемое в данной работе формирование турбулентных течений при увеличении амплитуды модуляции может рассматриваться как часть перехода от взаимной синхронизации к вынужденной, обусловленной увеличивающимся внешним воздействием. Это позволяет предположить, что вне зависимости от исходного состояния степень хаотизации формируемых турбулентных течений может снижаться с увеличением амплитуды внешних воздействий, что может оказаться важным для климатических и геофизических исследований.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект 11-08-00009.

Список литературы

- [1] *Беляев Ю.Н.* // ПМФТ. 1995. № 1. С. 64–72.
- [2] *Жиленко Д.Ю., Кривоносова О.Э., Никитин Н.В.* // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. В. 24. С. 15–21.

- [3] Жиленко Д.Ю., Кривоносова О.Э. // ЖТФ. 2010. Т. 80. В. 4. С. 16–23.
- [4] Hollerbach R. et al. // Phys. fluids. 2002. V. 14. N 12. P. 4192–4205.
- [5] Noir J. et al. // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 2009. V. 173. P. 141–152.
- [6] Жиленко Д.Ю., Кривоносова О.Э., Никитин Н.В. // Изв. РАН. МЖГ. 2007. № 6. С. 22–33.
- [7] Герценштейн С.Я., Жиленко Д.Ю., Кривоносова О.Э. // Изв. РАН. МЖГ. 2001. № 2. С. 56–63.
- [8] Berge P., Pomeau Y., Vidal C. L'ordre Dans Le Chaos. Hermann. Paris, 1988.
- [9] Герценштейн С.Я., Жиленко Д.Ю., Кривоносова О.Э. // Докл. РАН. 2003. Т. 390. № 4. С. 478–483.
- [10] *Synchronization. A universal concept in nonlinear sciences* / A. Pikovsky, M. Rosenblum and J. Kurths. Berlin: Cambridge University Press, 2001.