

АНАЛИЗ СВОЙСТВ НЕОДНОРОДНОЙ ВО ВРЕМЕНИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ВО ВРАЩАЮЩИХСЯ СФЕРИЧЕСКИХ СЛОЯХ

Д. Ю. Жиленко, О.Э. Кривоносова

Институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова

E-mail: jlenko@imec.msu.ru

Аннотация. Рассматриваются результаты экспериментального исследования турбулентных течений вязкой несжимаемой жидкости в сферическом слое при встречном вращении границ. Переход течения от исходного периодического состояния к турбулентному происходит под влиянием модуляции угловой скорости вращения внутренней сферы. Угловая скорость вращения внешней сферы остается постоянной. При измерениях скорости течения лазерным анемометром обнаружены два вида перемежаемости: "хаос-хаос" и "цикл-хаос-хаос". В первом случае наблюдается произвольное чередование во времени участков со слабой и сильной турбулентностью, во втором – к указанным выше участкам добавляется ламинарное периодическое течение. Представлен метод определения границ различных участков и отличий в интенсивности турбулентности на этих участках.

1. Введение

Неравномерность скорости вращения жидкости является одним из хорошо известных способов инициирования перехода течений к турбулентности [1]. Один из частных случаев неравномерного вращения - периодическое изменение скорости вращения внутренней сферы - используется в данной работе для формирования турбулентности, и может рассматриваться как воздействие внешней по отношению к течению периодической силы. Наличие внешней силы, в свою очередь, может приводить как к синхронизации течения (захвату частоты и/или фазы) [2], так и к принципиально различным состояниям турбулентности [3]. Переход к турбулентности часто сопровождается перемежаемостью, при которой интенсивность турбулентности изменяется в пространстве и/или во времени. В [4] применительно к плоскому течению Куэтта, вызванному встречным движением параллельных плоскостей, рассчитаны неоднородные по пространству и времени турбулентные течения, отличающиеся волновым числом и структурой вероятностной функции распределения. В известных к настоящему времени экспериментальных данных достоверных

сведений о неоднородной по пространству/времени турбулентности нет. Кроме хорошо изученной перемежаемости типа "цикл-хаос" обнаружены только модулированные с постоянной частотой турбулентные течения [5, 6]. Настоящая работа продолжает начатые в [7] исследования, и ее цель состоит в том, чтобы при контролируемых граничных условиях изучить возможности формирования неоднородных во времени турбулентных течений и их свойства.

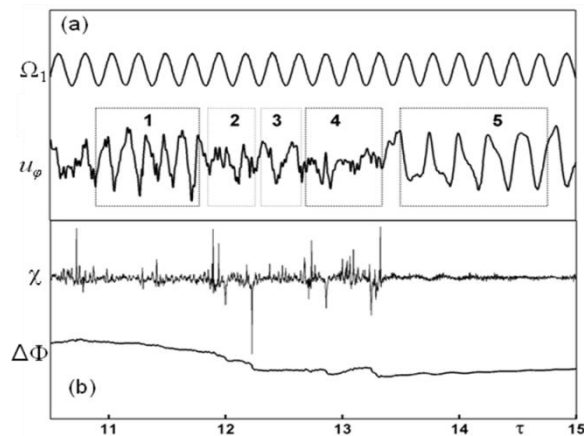
2. Эксперимент

Экспериментальная установка представляет две независимо вращающиеся коаксиальные прозрачные сферы с радиусами $r_1 = 75\text{мм}$ и $r_2 = 150\text{мм}$. Зазор заполнен силиконовым маслом с вязкостью $50 \cdot 10^{-6} \text{м}^2/\text{с}$ при 22°C . Для визуализации в масло добавлено небольшое количество алюминиевой пудры. Обе сферы помещены в термостат, также заполненный силиконовым маслом, температура в слое поддерживается постоянной с точностью до $\pm 0.05^\circ\text{C}$. Лазерным Доплеровским анемометром измерялась азимутальная компонента скорости вблизи внешней сферы. Синхронная запись измеряемой азимутальной скорости и скорости вращения внутренней сферы длилась не менее 3582с, что составляет 1140-1170 оборотов внешней сферы. Исследуется переход течения от исходного периодического к турбулентному, инициируемый увеличением амплитуды модуляции внутренней сферы. Исходное периодическое течение устанавливается в случае встречного вращения границ при $Re_1 = \Omega_1 r_1^2 / \nu = 412.5 \pm 0.5$, $Re_2 = \Omega_2 r_2^2 / \nu = -900 \pm 1$. Здесь r_1, r_2 радиусы, а Ω_1, Ω_2 угловые скорости внутренней (индекс 1) и внешней (индекс 2) сфер, ν - кинематическая вязкость жидкости в зазоре. Скорость внутренней сферы меняется по закону $\Omega_1(t) = \Omega_{10}(1 + A \sin(2\pi ft + \varphi_1))$, где A и f амплитуда и частота модуляции, Ω_{10} - среднее значение скорости вращения внутренней сферы, начальное значение фазы φ_1 произвольно. Результаты далее представлены в зависимости от модифицированного числа Рейнольдса $Re_m = (A Re_1) (\delta / r_1)$, где $\delta = (2\nu/2\pi f)^{1/2}$.

3. Результаты

На фиг.1,а в зависимости от безразмерного времени $\tau = t(\nu/r_1^2)$ показан фрагмент записи скорости течения. Наблюдается как

ламинарный сигнал (участок 5), так и турбулентный, с изменяющимися во времени свойствами (участки 1 – 4). На участках 1 и 3 зависимость скорости от времени близка к периодической, с периодом, равным периоду модуляции - это слабая турбулентность. На участках 2 и 4 периодичность не просматривается – это сильная турбулентность. Для доказательства того, что в рассматриваемом случае наблюдается перемежаемость "цикл-хаос-хаос", необходимо показать, что свойства слабой и сильной турбулентности отличаются, а участки с разными свойствами чередуются во времени произвольным образом. Для анализа свойств наблюдаемых сигналов мы выбрали метод, основанный на определении мгновенной фазы и частоты аperiodического сигнала [8]. Согласно этому методу, мгновенное значение фазы $\Psi(t)$ произвольного вещественного сигнала $x(t)$ определяется как $\Psi(t) = \arctg(y(t)/x(t))$, где $y(t)$ ортогональное дополнение к $x(t)$ и вычисляется как преобразование Гильберта исходного сигнала $x(t)$.

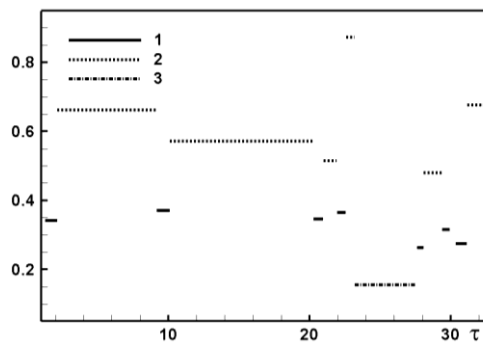


Фигура 1. а - скорость вращения внутренней сферы Ω_1 (верхняя кривая), скорость течения u_φ (нижняя кривая), $Re_m = 7.4$; б - разность мгновенных частот χ (верхняя кривая), и фаз $\Delta\Phi$ (нижняя кривая).

Таким образом, были вычислены мгновенные фазы как для измеренной азимутальной компоненты скорости - $\Phi_0(t)$, так и для модулированной скорости вращения внутренней сферы - $\Phi_1(t)$; их

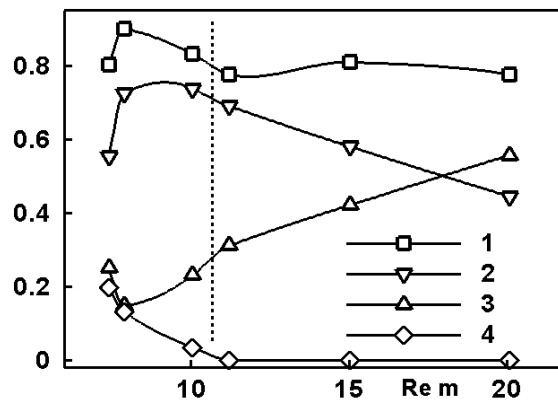
разность $\Delta\Phi(t) = \Phi_1(t) - \Phi_0(t)$ и разность мгновенных частот $\chi(t) = \partial(\Delta\Phi(t))/\partial t$ (фиг.1,b). По поведению величин разности фаз и частот можно сделать два вывода. Первый заключается в том, что слабая и сильная турбулентность отличаются уровнем синхронизации между колебаниями скорости вращения внутренней сферы и скоростью течения. Для слабой турбулентности синхронизация сильнее, что подтверждается захватом фазы и частоты: при сильной синхронизации $\Delta\Phi$ монотонно снижается (участок 1) или остается постоянной (участок 3). При отсутствии синхронизации $\Delta\Phi$ растет (участок 5). При слабой синхронизации $\Delta\Phi$ меняется произвольным образом (участки 2 и 4). Второй вывод состоит в том, что границы различных участков можно определять по величинам $\Delta\Phi$ и χ . Сочетание монотонного роста $\Delta\Phi$ и минимального уровня флуктуаций χ определяет ламинарные участки, участкам слабой турбулентности соответствует сочетание не возрастания $\Delta\Phi$ и среднего уровня флуктуаций χ . Сильная турбулентность определяется наибольшим уровнем флуктуаций и нерегулярным изменением $\Delta\Phi$.

Области возможных значений среднеквадратичных отклонений χ для каждого режима течения не пересекаются между собой и занимают разные диапазоны (фиг. 2). Наибольшие среднеквадратичные отклонения χ наблюдаются на участках сильной турбулентности, наименьшие - на ламинарных участках.



Фигура 2. Среднеквадратичное отклонение χ в зависимости от безразмерного времени τ при $Re_m = 7.88$, 1 – слабая турбулентность, 2 – сильная турбулентность, 3 – ламинарное течение.

Рассмотренный выше метод можно использовать для определения интегральных свойств течений с перемежаемостью. На фиг.3 представлены среднеквадратичное отклонение χ , вычисленное по всей выборке, а также относительная продолжительность каждого вида течения в рассматриваемой выборке в зависимости от модифицированного числа Рейнольдса Re_m . Точки слева от вертикальной линии относятся к перемежаемости "цикл-хаос-хаос", а справа - к перемежаемости "хаос-хаос" (ламинарные участки отсутствуют).



Фигура 3. 1 - rms χ (произвольные единицы) и относительная продолжительность сильной турбулентности (2), слабой турбулентности (3) и ламинарного течения (4) в зависимости от модифицированного числа Рейнольдса Re_m .

В области перемежаемости "цикл-хаос-хаос" заметны локальные экстремумы на зависимости временной продолжительности слабой и сильной турбулентности от Re_m (кривые 2 и 3), тогда как справа эти же зависимости линейны. Объяснить наблюдаемые отличия можно следующим образом. На ламинарных участках синхронизация отсутствует, и поэтому увеличивается разность фаз между вынуждающей силой и течением (фиг. 1,b). Увеличение Re_m (амплитуды модуляции) усиливает синхронизацию, что ведет к уменьшению разности фаз. Соревнование этих противоборствующих процессов и обеспечивает наличие экстремумов в левой части. Справа от вертикальной прямой, в отсутствие ламинарных участков только

один фактор - амплитуда модуляции - влияет на продолжительность каждого из видов турбулентности. Чем выше амплитуда, тем выше уровень синхронизации, тем больше относительная продолжительность слабой турбулентности и ниже - сильной турбулентности, что и наблюдается в правой части фигуры 3.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 14-08-00204.

Литература

1. D. Coles. // J. Fluid Mech. 1965, pt.3, p. 385.
2. A. Pikovsky, M. Rosenblum, J. Kurths Synchronization. A universal concept in nonlinear sciences. Berlin: Cambridge University Press, 2001.
3. С.Н. Гордиенко, С.С. Моисеев // ЖЭТФ, 1999, т. 116, 5(11), С. 1630.
4. L.S. Tuckerman, D. Barkley // Phys. Fluids. 2011, v.23, 041301.
5. A. Prigent, G. Gregoire, H. Chate, O. Dauchot and W. Saarloos // Phys. Rev. Lett. 2002. 89, 014501.
6. D. Zimmerman, S. Triana and D. Lathrop // Phys. Fluids. 2011. 23. 065104.
7. Жиленко Д.Ю., Кривоносова О.Э.// Изв. РАН. МЖГ. 2013. №4. С.45.
8. В. С. Анищенко и др. Нелинейные эффекты в хаотических и стохастических системах. Ижевск. 2003.