



Подавление турбулентности неравномерным во времени вращением¹

Жиленко Д.Ю., Кривоносова О.Э.

НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва

Экспериментально исследуется возможность подавления турбулентности в сферическом течении Куэтта — течении вязкой несжимаемой жидкости, формирующимся под действием вращения концентрически расположенных сферических границ вокруг общей оси. Сферический слой сформирован двумя оптически прозрачными коаксиальными сферами, с радиусами внутренней и внешней сфер $r_1 = 0.075$ и $r_2 = 0.15$ м соответственно. Слой наполнялся силиконовым маслом, с вязкостью $\nu \approx 5.10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ при температуре 22°C . Измерения азимутальной компоненты скорости течения u_φ лазерным анемометром проводились вблизи внешней сферы: на расстоянии 0.078 м от плоскости экватора и 0.105 м от оси вращения. Температура в слое поддерживалась постоянной с точностью не менее $\pm 0.05^\circ\text{C}$. Скорость вращения внутренней сферы Ω_{10} поддерживалась постоянной, скорость вращения внешней сферы $\Omega_2(t)$ изменялась: $\Omega_2(t) = \Omega_{20}(1 + A \sin(2\pi f t + \varphi))$, где A — амплитуда модуляции, f — частота модуляции, средняя погрешность рассматриваемых величин

не превышала 0.05% от заданных значений.

Сначала при встречном вращении границ в отсутствие модуляции ($A = 0$) формировалось исходное турбулентное течение. Рассматривались три режима течения. ИТ I: $Re_2 = \Omega_{20} r_2^2 / \nu = -900$, $Re_1 = \Omega_{10} r_1^2 / \nu = 434$; ИТ II: $Re_2 = -700$, $Re_1 = 382$; ИТ III: $Re_2 = -700$, $Re_1 = 377$. Особенностью этих режимов является то, что при уменьшении числа Re_1 и постоянном Re_2 происходит переход к ламинарному, симметричному относительно экватора периодическому режиму течения с тремя вихрями, распространяющимися в азимутальном направлении, и этот переход происходит с гистерезисом. При переходе от описанного ламинарного течения к турбулентности при возрастании числа Re_1 ($Re_2 = \text{const}$) в течении наблюдаются распределенные случайным образом фрагменты пространственных структур характерные для ламинарного режима. Течения ИТ I и ИТ II получены путем повышения Re_1 ($Re_2 = \text{const}$). Течение ИТ III находится внутри области гистерезиса и получалось из ИТ II путем уменьшения Re_1 ($Re_2 = \text{const}$). После установления каждого из перечисленных выше исходных турбулентных течений при выбранной величине f амплитуду A увеличивали от нуля до заданного значения (но не более 20% от Ω_{20}).

Увеличение A во всех рассмотренных случаях может приводить к подавлению турбулентно-

¹Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 23-29-00051.

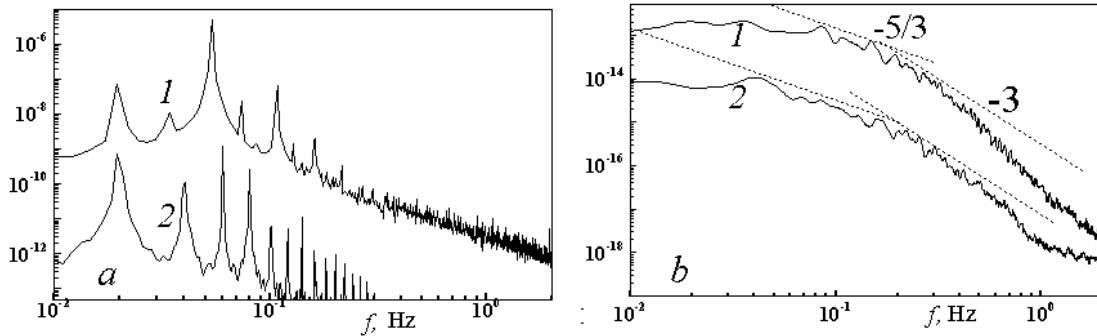


Рис. 1. Спектры u_φ^2 ламинарного (а) и турбулентного (б) течений при $f = 0.02 \text{ Hz}$. Кривые 1 – ИТ III, $A = 0.02$; кривые 2 – ИТ II, $A = 0.15$

сти, которая сменяется ламинарным течением. В спектре ламинарных течений (Рис. 1, а) присутствуют пики на частоте модуляции $f = 0.02 \text{ Hz}$, пики на собственных частотах $f = 0.06 \text{ Hz}$ при ИТ II и $f = 0.053 \text{ Hz}$ при ИТ III, и их комбинации. Уменьшение A при ИТ I и ИТ II приводит к восстановлению турбулентности. В этом случае при подавлении турбулентности и ее восстановлении наблюдается гистерезис. При ИТ III с уменьшением A ламинарное течение остается. Спектры турбулентных течений, показанные на Рис. 1, б, соответствуют спектрам двумерной турбулентности, поскольку на меньших частотах можно выделить участок с постоянным углом наклона, близким к величине $-5/3$, а на больших частотах – к величине -3 .

На Рис. 2 приведены фрагменты зависимости от времени $\Omega_2(t)$ и $u_\varphi(t)$: а, б – разрушение турбулентности и переход к ламинарному течению после увеличения A , с – восстановление турбулентности после уменьшения A . Также на Рис. 2, а, б приведены зависимости от времени амплитуд на частоте модуляции и на собственных частотах ламинарных режимов. Амплитуды $A_f(t)$ рассчитаны тем же, что и в [1], методом, основанным на использовании преобразования Гильберта (НТ): $A_f(t) = |u_f(t) + iHT(u_f(t))|$, где $u_f(t)$ для каждой из частот определяется исходя из $u_\varphi(t)$ с помощью процедуры фильтрации в полосе частот $f \pm \Delta f$, $\Delta f = 0.005 \text{ Hz}$. Характерное время роста амплитуды от локального минимума, предшествующего

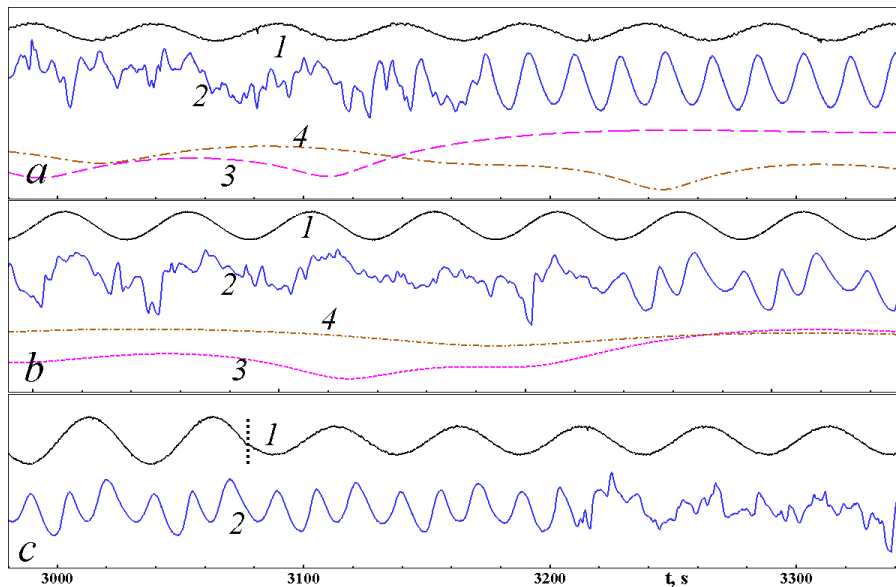


Рис. 2. Зависимость от времени сглаженного сигнала $\Omega_2(t)$ (1), u_φ (2), амплитуды на частоте когерентных структур (3), амплитуды на частоте модуляции $f = 0.02 \text{ Hz}$ (4). а – ИТ III, $A = 0.02$; б – ИТ II, $A = 0.15$; с – ИТ II, переход от $A = 0.1$ к $A = 0.059$ (момент изменения A показан вертикальной пунктирной линией).

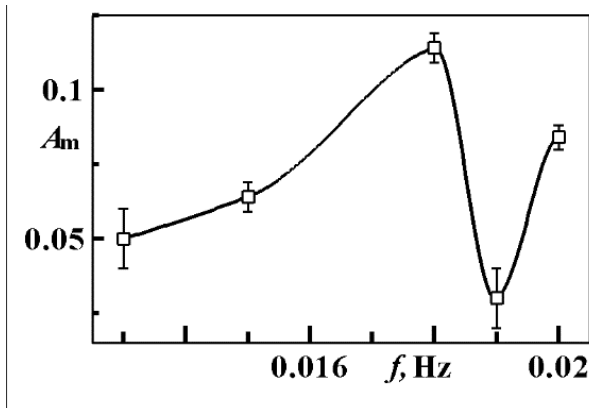


Рис. 3. Зависимость амплитуды модуляции A_m , соответствующей подавлению турбулентности, от частоты модуляции f для ИТ III. Вертикальные линии соответствуют величине шага ступенчатого изменения A , при котором происходило подавление турбулентности.

стадии окончательного возрастания, до момента разрушения турбулентности составляет примерно один период колебаний (Рис. 2, а, б). При ИТ III модуляция практически не оказывает влияния на форму ламинарной части сигнала (Рис. 2, а), и в этой части $A_{0.053}(t) \gg A_{0.02}(t)$, где $A_{0.053}(t)$ и $A_{0.02}(t)$ — рассчитанные величины амплитуд на частотах $f = 0.053 \text{ Hz}$ и $f = 0.02 \text{ Hz}$ соответственно. В случае ИТ II амплитуды близки, и видна сильная амплитудная модуляция ламинарной части сигнала (Рис. 2, б).

Интересно отметить, что разрушение турбулентности при возрастании A происходит в момент времени, близкий к минимуму $\Omega_2(t)$ (Рис. 2, а, б). Восстановление турбулентности после уменьшения A происходит при прохождении максимума $\Omega_2(t)$ (Рис. 2, с). Получается, что подавление турбулентности происходит в той области параметров, которая более удалена от границы формирования турбулентности, где уровень стохастичности при стационарном вращении более интенсивен. И на-

оборот, восстановление турбулентности наблюдается при попадании в область параметров, близкую к границе формирования турбулентности, где уровень стохастичности при стационарном вращении ниже.

Величина амплитуды модуляции A_m , соответствующая подавлению турбулентности, зависит от частоты модуляции f , и эта зависимость существенно нелинейная (Рис. 3). В диапазоне изменения f от 0.01 до 0.018 Hz A_m увеличивается по мере роста частоты. Это может объясняться более быстрым пространственным затуханием в радиальном направлении более высоких частот. В диапазоне изменения f от 0.018 до 0.02 Hz наблюдается локальный минимум величины A_m . Частота, соответствующая локальному минимуму, оказывается близкой к $1/3$ от собственной частоты ламинарных режимов. Поскольку в ламинарном сигнале три вихря, указанная частота соответствует частоте прохождения одного вихря. Поэтому можно сделать вывод, что турбулентность наиболее восприимчива к возмущениям, частота которых соответствует частоте прохождения одного вихря предшествующего турбулентности периодического течения.

Таким образом, модуляция скорости внешней сферы на частоте, не превышающей частоты прохождения одного вихря в предшествующем турбулентности ламинарном течении, может привести к подавлению турбулентности. Как возрастание амплитуды сигнала на частоте когерентных структур, так и разрушение турбулентности происходят в моменты времени вблизи минимума скорости внешней сферы. Восстановление турбулентности при снижении амплитуды модуляции происходит в моменты времени, близкие к максимуму скорости внешней сферы, и при меньших величинах амплитуд модуляции, чем при ее подавлении.

Список литературы

- [1] Жиленко Д.Ю., Кривоносова О.Э. Подавление турбулентности в течениях с вращением // Письма в журнал технической физики. 2019. Т. 45. № 17. С. 20.