

ВЗАИМНЫЕ КОРРЕЛЯЦИИ И СПЕКТРЫ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ ЗА ЛОКАЛЬНЫМ ПРЕПЯТСТВИЕМ

А. А. ВОСКОВОЙНИК, А. В. ВОСКОВОЙНИК, В. А. ВОСКОВОЙНИК

*Институт гидромеханики НАН Украины
ул. Желябова, 8/4, 03680, Киев-180, ГСП, Украина
тел. (044) 456-65-83; e-mail: andrey_vsk@ukr.net*

Представлены результаты экспериментальных исследований пристеночных пульсаций давления позади кольцевых препятствий на продольно обтекаемом протяженном цилиндре. Пространственно-временные корреляции пульсаций давления в области ближнего следа препятствия убывают быстрее, чем в ненарушенном турбулентном пограничном слое на гибком цилиндре и плоской пластине. Наклон угла фазового спектра возрастает, из-за воздействия препятствия на поле пульсаций пристеночного давления. С ростом разделения между датчиками наклон фазового угла растет, а область его линейного изменения сдвигается в низкочастотный диапазон. Препятствия тормозят давление образующие вихревые системы, особенно мелкомасштабные высокочастотные вихри. Конвективная групповая и фазовая скорости псевдозвуковых пульсаций давления уменьшаются за кольцевым препятствием на протяженном цилиндре.

ВВЕДЕНИЕ

При обтекании тел, особенно при высоких числах Рейнольдса, в пограничных слоях образуются повышенные уровни пульсаций скорости и давлений. Пульсационные поля возбуждают обтекаемую поверхность, создавая вибрационные колебания последней, и порождают гидродинамический шум, который имеет акустическую и псевдозвуковую природу. Наличие неоднородностей на обтекаемой поверхности в виде локальных выемок и препятствий формирует сложные вихревые движения как вблизи неоднородностей, так и в пограничном слое позади препятствий. Эти вихревые потоки увеличивают энергию пульсационных составляющих скорости и давления а, следовательно, усиливают гидродинамический шум пограничного слоя. В спектральных характеристиках пульсаций скорости и давления появляются дискретные подъемы уровней на частотах, которые соответствуют частотам вращения когерентных вихревых структур или их спаривания, частотам выброса или отрыва, частотам ударного взаимодействия вихревых систем с обтекаемой поверхностью. Эти характерные особенности обтекания тел с локальными неоднородностями зависят от режима обтекания, скорости набегающего потока, формы и размера препятствий и ряда других параметров. Вибрация обтекаемой поверхности и гидродинамический шум зависят не только от энергии поля пульсаций скорости и давления, но и от пространственно-временных и фазовых характеристик пульсационных полей [1, 2]. Данная работа посвящена экспериментальному исследованию поля пульсаций пристеночного давления за кольцевым препятствием на продольно обтекаемом цилиндре. Цель работы- изучить пространственно-временные характеристики поля пульсаций давления позади препятствия и определить степень влияния на них скорости обтекания и диаметра препятствия.

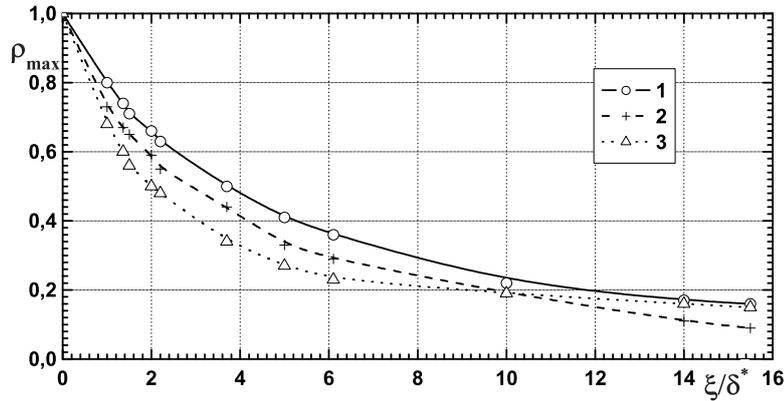


Рис. 1. Максимальные значения коэффициента пространственно-временной корреляции

1 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальные исследования проводились на полигоне Института гидромеханики НАН Украины в гидродинамическом канале длиной около 4000 м, шириной порядка 50 м и глубиной (4...5) м. Исследования проводились методом буксировки гидроакустической антенны диаметром $29 \cdot 10^{-3}$ м на глубине 1.2 м от поверхности воды. Антенна, представляющая собой протяженный воздухозаполненный полихлорвиниловый цилиндр длиной 20 м, была закреплена через хорошо обтекаемый нож на малозумном катамаране. На внешней поверхности гибкой протяженной продольно обтекаемой антенны располагались кольцевые препятствия различных диаметров ($1.5 \cdot 10^{-3}$ м; $3 \cdot 10^{-3}$ м; и $6 \cdot 10^{-3}$ м), которые обтекались поперечным потоком. Заподлицо с обтекаемой поверхностью антенны устанавливались миниатюрные пьезокерамические датчики пульсаций давления, эффективный диаметр которых составлял $1.6 \cdot 10^{-3}$ м. Датчики пульсаций давления располагались вдоль образующей измерительной секции антенны на различных расстояниях друг от друга и кольцевого препятствия.

Экспериментальные исследования взаимных корреляционных и спектральных характеристик пристеночных пульсаций давления проводились для скорости буксировки антенны 3 м/с и 5 м/с. Для исследуемых режимов обтекания числа Рейнольдса, определяемые по скорости набегающего потока и по длине антенны, составляли $Re_x = xU_\infty/\nu = (1.5 \cdot 10^7 \dots 4.7 \cdot 10^7)$, а по радиусу антенны $Re_a = aU_\infty/\nu = (4.3 \cdot 10^4 \dots 7.2 \cdot 10^4)$. Для этих условий обтекания безразмерный диаметр препятствия, нормированный внешними переменными ($d^* = d/\delta^*$) варьировался от 0.2 до 1.2, а безразмерный по внутренним переменным ($d^+ = du_\tau/\nu$) изменялся от 162 до 974. Расстояние между датчиками пульсаций давления $\xi^* = \xi/\delta^* = (1.3 \dots 29)$ и $\xi^+ = \xi u_\tau/\nu = (1 \cdot 10^3 \dots 2 \cdot 10^4)$.

Погрешность измерений осредненных и интегральных характеристик поля пульсаций давления не превышала 10 % при доверительном интервале 0.95 или 2σ . Спектральные характеристики регистрировались с погрешностью не более 2 дБ, относительно $2 \cdot 10^{-5}$ Па для частотного диапазона от 0.2 Гц до 1250 Гц.

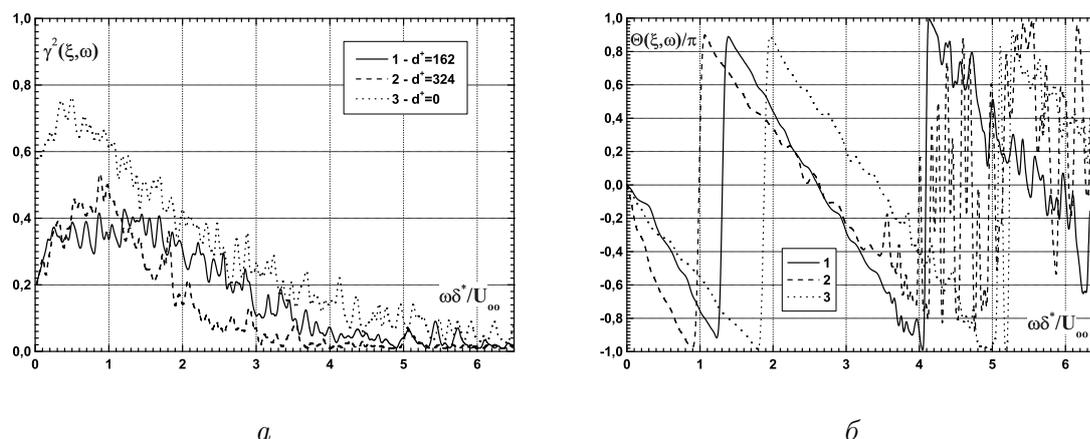


Рис. 2. Взаимная спектральная плотность пульсаций пристеночного давления:
 а – функция когерентности, б – фазовый спектр

2 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Совместные статистические характеристики пульсаций давления для датчиков, разнесенных по обтекаемой поверхности, дают представление и количественные оценки поля пульсаций давления, как в пространстве, так и во времени. Степень вырождения максимальных значений коэффициента пространственно-временной корреляции проиллюстрирована на рис. 1. На этом рисунке кривая 1 соответствует данным [3] для плоской гладкой пластины, кривая 2 - данные [4] для гибкого продольно обтекаемого цилиндра $\delta/a = 3.0$ и кривая 3 - измерения для антенны с кольцевым препятствием $d^+ = 324$. Приведенные результаты получены для сопоставимых чисел Рейнольдса и частотных диапазонов, в которых определены пространственно-временные корреляции, так для кривой 1 - $Re_x = 5 \cdot 10^6$ и $0.41 < \omega^* = \omega \delta^* / U_\infty < 6.8$; для кривой 2 - $Re_x = 2.1 \cdot 10^7$ и $0.29 < \omega^* < 6.1$, а для кривой 3 - $Re_x = 2 \cdot 10^7$ и $0.21 < \omega^* < 5.9$. Взаимная продольная корреляция для обтекаемой поверхности с поперечной кривизной вырождается значительно быстрее, чем на плоской пластине. При наличии поперечно обтекаемого кольцевого препятствия на поверхности антенны, максимальные значения коэффициента пространственно-временной корреляции убывают быстрее на малых разделениях между датчиками пульсаций давления и медленнее на больших разделениях. Следовательно, при введении препятствия в пристеночную область развитого турбулентного пограничного слоя на осесимметрично обтекаемом цилиндре происходит снижение значения максимума коэффициента взаимной корреляции в ближнем следе препятствия.

Взаимная спектральная плотность в показательной форме состоит из модуля и фазы взаимной спектральной плотности. Нормированный произведением среднеквадратичных значений пульсаций давления в точках измерений квадрат модуля взаимного спектра в виде функции когерентности ($\gamma^2(\xi, \omega) = |P_{12}(\xi, \omega)|^2 / [P_1(0, \omega)P_2(0, \omega)]$), а также фазовый спектр ($\Theta(\xi, \omega)$) показаны на рис. 2а и на рис. 2б для $U_\infty = 3.0$ м/с; $Re_x = 2 \cdot 10^7$ и $\xi/\delta^* = 1.48$. Здесь кривая 1 соответствует данным, измеренным в ближнем следе препятствия диаметром $d^+ = 162$, кривая 2 - для $d^+ = 324$ и кривая 3 - для условий ненарушенного препятствием пограничного слоя на гибкой антенне. Верхний

по потоку датчик находився за препятствиями на удалении $x^+ = 648$ или $x/d=4$, а также $x^+ = 648$ или $x/d=2$, соответственно. Функция когерентности для всех трех кривых имеет максимум, который соответствует наиболее коррелированным давлению образующим вихревым системам, конвектирующим между датчиками. Максимум функции обычной когерентности для ненарушенного пограничного слоя $\gamma_{max}^2 = 0.78$ имеет место при частоте $f=(45..50)$ Гц или $\omega^*=(0.65..0.70)$ (см. кривую 3). За препятствием $d^+ = 162$ максимум когерентности $\gamma_{max}^2 = 0.44$ наблюдается при $f=(90..110)$ Гц или $\omega^*=(1.28..1.56)$, а за препятствием $d^+ = 324$ - $\gamma_{max}^2 = 0.50$ при $f=(65..85)$ Гц или $\omega^*=(0.92..1.21)$. Некоррелированность исследуемых сигналов наблюдается в ненарушенном пограничном слое при частотах выше 400 Гц ($\omega^*>5.68$). В ближнем следе за препятствием $d^+ = 162$ когерентность отсутствует при $f>340$ Гц или $\omega^*>4.83$, а за кольцевым препятствием $d^+ = 324$, соответственно, при $f>240$ Гц или $\omega^*>3.41$. С увеличением диаметра препятствия, не превышающего толщины логарифмической области пограничного слоя, коррелированность давлению образующих вихревых систем перемещается в низкочастотную область в ближнем следе за препятствием, а максимальное значение когерентности при этом возрастает, смещаясь также в область низких частот.

Фаза функции взаимной спектральной мощности пульсаций пристеночного давления (рис. 2б) имеет один и тот же знак угла наклона для всех трех кривых, показывающий перенос по направлению потока коррелированных давлению образующих вихревых систем, между измерительными точками с разделением $\xi/\delta^* = 1.48$. Разброс фазового угла для пары датчиков, находящихся в ближнем следе препятствия, наблюдается в том же частотном диапазоне, где отсутствует когерентность исследуемых сигналов. Наклон фазового угла, характеризующий фазовую конвективную скорость давлению образующих вихрей, для всех трех кривых различен. Наименьший наклон имеет место для ненарушенного пограничного слоя. Это указывает на то, что средняя фазовая конвективная скорость, определяемая из выражения $\bar{U}_{cp} = -2\pi f\xi/\Theta(\xi, \omega)$, имеет наибольшее значение в ненарушенном пограничном слое.

В ненарушенном турбулентном пограничном слое на продольно обтекаемом цилиндре с увеличением разделения между датчиками пульсаций давления максимальные значения функции обычной когерентности смещаются в низкочастотную область. Это указывает на то, что при увеличении ξ наиболее коррелированными остаются крупномасштабные низкочастотные вихревые системы. Мелкомасштабные высокочастотные вихри при больших разделениях между датчиками теряют свою индивидуальность и, соответственно, функция когерентности на высоких частотах убывает. При введении препятствий во внутреннюю область пограничного слоя, частота, при которой наблюдается максимум функции когерентности для фиксированного диаметра препятствия и скорости обтекания, является инвариантной разделению между датчиками пульсаций давления. С ростом скорости обтекания, частота, на которой имеет место максимум функции когерентности, возрастает для фиксированного диаметра препятствия. С увеличением диаметра препятствия при фиксированной скорости обтекания частота, при которой регистрируется максимум функции обычной когерентности, убывает, вне зависимости от разделений между датчиками пульсаций давления. Частота, при которой наблюдается максимум $\gamma^2(\xi, \omega)$, соответствует частоте отрыва вихревых систем с поперечно обтекаемого кольцевого препятствия на антенне и для нее число Струхала $Sh = fd/U \simeq 0.1$; где U - местная скорость на высоте препятствия.

Наряду с фазовой конвективной скоростью широкое применение получила сред-

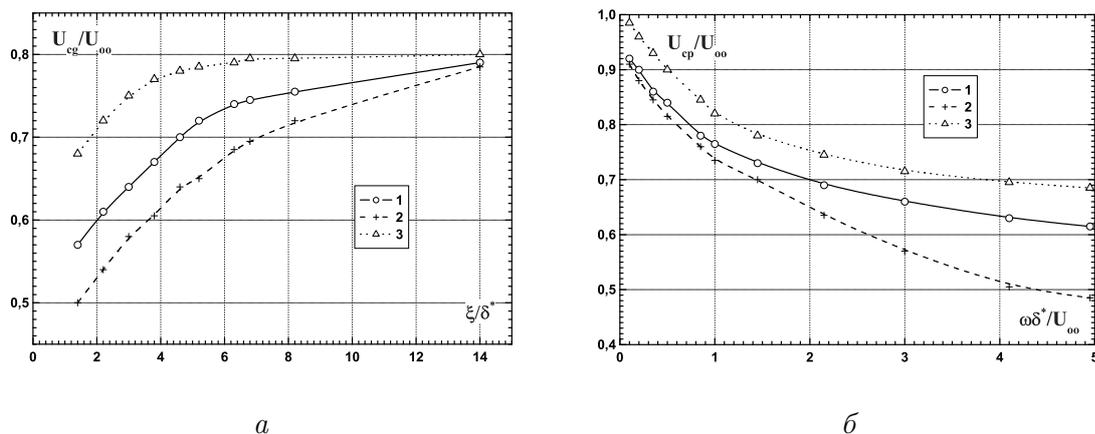


Рис. 3. Конвективные скорости давление образующих вихревых структур

няя групповая скорость переноса, которая определяется из пространственно временной корреляции. Эта скорость вычисляется из выражения $\bar{U}_{cg} = \xi/\tau_m$. Зависимости безразмерной средней групповой скорости (\bar{U}_{cg}/U_{∞}) от разделения между датчиками пульсаций пристеночного давления (ξ/δ^*) и средней фазовой конвективной скорости (\bar{U}_{cp}/U_{∞}) от безразмерной частоты $\omega^* = \omega\delta^*/U_{\infty}$ представлены на рис. 3а и рис. 3б. Здесь кривая 1 получена из измерений за препятствием $d^+ = 162$, кривая 2 – за препятствием $d^+ = 324$ и кривая 3 – для ненарушенного пограничного слоя. Средняя групповая скорость переноса с увеличением разделения между датчиками пульсаций пристеночного давления возрастает. Это обусловлено тем, что с увеличением разделения между датчиками мелкомасштабные низкоскоростные вихревые структуры не вносят свой вклад в функцию взаимной корреляции, из-за своего вырождения или распада. Поэтому коррелированными остаются все более крупные высокоскоростные вихревые системы, которые располагаются дальше от обтекаемой поверхности, где местная скорость выше. В пользу этого говорит и тот факт, что коэффициент пространственно-временной корреляции убывает с ростом разделения. При этом уменьшается интенсивность коррелированных вихревых систем, а максимальные значения функции взаимной корреляции становятся более пологими. При помещении препятствий в логарифмическую область турбулентного пограничного слоя на цилиндре уменьшается средняя групповая скорость переноса, особенно на малых разделениях между датчиками пульсаций давления. С увеличением диаметра препятствия возрастает разница между скоростями переноса в нарушенном и ненарушенном пограничных слоях. Препятствия в пристеночной области пограничного слоя на цилиндре тормозят коррелированные вихревые структуры пограничного слоя, в большей степени мелкомасштабные, находящиеся вблизи обтекаемой поверхности. Скорость торможения растет с увеличением диаметра препятствия.

При увеличении частоты средняя фазовая конвективная скорость (рис. 3б) убывает, от значения близкого к скорости набегающего потока для инфранизких частот до значений, соответствующих $0.68U_{\infty}$; $0.61U_{\infty}$ и $0.48U_{\infty}$ для ненарушенного пограничного слоя и препятствий $d^+ = 162$ и $d^+ = 324$. Введение препятствия в пограничный слой приводит к уменьшению фазовой конвективной скорости во всем частотном диапазоне, где функция когерентности имеет значения отличные от нуля. Наибольшее па-

дение этой скорости обнаружено в высокочастотной области. Кольцевое препятствие на антенне тормозит давление образующие когерентные вихревые системы, практически, всех масштабов, которые присутствуют в пограничном слое. Особенно подвержены торможению высокочастотные мелкомасштабные вихри, которые формируют пристеночную область турбулентного пограничного слоя на продольно обтекаемом цилиндре.

ВЫВОДЫ

1. Обнаружено, что коррелированность давления образующих вихревых структур с увеличением разделения между датчиками пульсаций давления в следе за кольцевым препятствием уменьшается быстрее, чем в пограничном слое без препятствия.

2. Установлено, что функция обычной когерентности, с введением локального препятствия в пристеночную область пограничного слоя на цилиндре, убывает как по амплитуде, так и по частоте, а ее максимальное значение с ростом диаметра препятствия смещается в область низких частот. Наклон фазового угла взаимной спектральной плотности пульсаций давления увеличивается с разделения между датчиками.

3. Зафиксировано, что средняя групповая скорость переноса коррелированных вихревых структур с увеличением разделения между датчиками пульсаций давления возрастает, а с ростом диаметра препятствия - убывает, особенно на малых разделениях между датчиками в ближнем следе препятствия.

4. Обнаружено, что введение препятствия в пограничный слой на цилиндре приводит к уменьшению средней фазовой конвективной скорости в области действия препятствия, особенно, в высокочастотном диапазоне и это падение скорости увеличивается с ростом диаметра локального препятствия. Кольцевые препятствия на поверхности продольно обтекаемого гибкого цилиндра тормозят давление образующие когерентные вихревые структуры, главным образом, высокочастотные низкоскоростные мелкомасштабные вихри, которые формируют пристеночную область пограничного слоя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lee I., Sung H. J. Multiple-arrayed pressure measurement for investigation of the unsteady flow structure of a reattaching shear layer // J. Fluid Mech.– 2002.– **463**.– P. 377–402.
2. Efimtsov B. M., Golubev A. Yu., Kuznetsov V. B., Rizzi S. A., Andersson A. O., Rackl R. G., Angrianov E. V. Effect of transducer flushness on measured surface pressure fluctuations in flight // AIAA Pap. 2005-0800.– 2005.– N 800.– P. 1–16.
3. Willmarth W. W., Wooldridge C. E. Measurements of the fluctuating pressure at the wall beneath a thick turbulent boundary layer // J. Fluid Mech.– 1962.– **14**.– P. 187–210.
4. Voskoboynick V. A., Grinchenko V. T., Makarenkov A. P. Correlation Characteristics of a Wall Pressure Fluctuation Field in a Turbulent Boundary Layer Induced by a Longitudinal Flow along a Flexible Extended Cylinder // Intern. J. Fluid Mechanics Res.– 2003.– **30**, N 6.– P. 644–650.