

## **ВЗАИМНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПУЛЬСАЦИЙ ПСЕВДОЗВУКОВОГО ДАВЛЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ПРОДОЛЬНО ОБТЕКАЕМОГО ЦИЛИНДРА**

**В. А. ВОСКОБОЙНИК, А. П. МАКАРЕНКОВ, В. В. СМОЛЯР**

*Институт гидромеханики НАН Украины,  
8/4 Желябова ул., 03680 Киев, Украина  
(E-mail: vlad.vsk@gmail.com)*

Представлены результаты экспериментальных исследований взаимных корреляций и спектров пульсаций пристеночного давления на поверхности продольно обтекаемого гибкого цилиндра. Обнаружено, что корреляции на цилиндре ниже, чем на пластине. Крупномасштабные когерентные вихревые структуры переносятся быстрее и вырождаются медленнее, чем мелкомасштабные вихри.

### **ВВЕДЕНИЕ**

При обтекании гибких протяженных антенн, которые используются в сейсморазведке для поиска полезных ископаемых под поверхностью морского дна, формируются турбулентные пограничные слои. Для работы гидроакустических приемников, находящихся под эластичной цилиндрической оболочкой антенны, шум пограничного слоя является помехой. Гидродинамический шум турбулентного пограничного слоя, источниками которого являются когерентные вихревые структуры, взаимодействующие между собой и с обтекаемой поверхностью, имеет звуковую и псевдозвуковую составляющие [1, 2]. В отличие от звука, обладающего волновой природой и распространяющегося в окружающую среду со скоростью звука, псевдозвуковые пульсации давления конвектируют со скоростью близкой к скорости течения. Псевдозвук, рожденный нелинейным взаимодействием вихревых структур пограничного слоя, не подчиняется принципу суперпозиции. Давление псевдозвука не зависит от среднего давления окружающей среды и убывает обратно пропорционально квадрату расстояния от источника.

Пульсации пристеночного давления интегрально отражают существование пульсаций полей скоростей, характер и интенсивность поля пульсаций давления на обтекаемой поверхности во многом определяется движением когерентных вихревых структур в пограничном слое. Псевдозвуковые давления локализованы внутри турбулентного потока, в то время как звуковые давления распространяются на большие расстояния за пределами области занятой турбулентным течением. Изучение физики турбулентных пульсаций давления является очень важным не только из-за того, что они источники гидродинамического шума и возбуждают обтекаемую поверхность, генерируя вибрационные колебания, но также и потому, что они находятся в корреляционных зависимостях в уравнениях переноса для напряжений Рейнольдса и в тензоре диссипации энергии. Традиционно анализ пульсаций давления основывается на уравнении Пуассона, которое для несжимаемой жидкости подтверждает, что пульсации давления, связанные с полем пульсаций скоростей, генерируются двумя механизмами: взаимодействием пульсаций скорости с градиентами осредненной скорости и взаимодействием турбулентности с турбулентностью [2-4]. Обычно турбулентные течения являются трехмерными, вихревыми, нерегулярными и неустойчивыми по природе и являются

движениями со случайными изменениями свойств течения во времени и в пространстве. Из-за нерегулярности и случайности нет возможности описать движение жидкости во всех деталях, как функцию времени и пространственных координат. Поэтому турбулентные течения можно описать, применяя законы теории вероятности и математической статистики, исследуя, в том числе, корреляционные и спектральные зависимости [2, 4, 5].

Цель исследований – определение пространственно-временных корреляций и взаимных спектров пульсаций пристеночного давления на поверхности гибкого продольно обтекаемого протяженного цилиндра, а также выявить источники этих пульсаций и механизм их формирования.

## 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД, ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Экспериментальные исследования проводились в обводном канале, расположенном параллельно руслу Днепра, длиной около 4 км, шириной 40 м и глубиной порядка 5 м. Течение и судоходство в канале отсутствовало, а берега были покрыты растительностью. Шум в канале был ниже нижней границы превалирующих шумов моря, что обеспечивало проведение качественных гидроакустических исследований. Гибкий протяженный цилиндр длиной 20 м и диаметром 29 мм буксировался на глубине 1,2 м. Цилиндр, посредством обтекаемого ножа, закреплялся в корме хорошо обтекаемого и малозумного катамарана, который буксировался катером, удаленным на 160 м от катамарана (из-за помех буксировщика). Скорость буксировки изменялась от 3 м/с до 6 м/с.

Буксируемая цилиндрическая модель представляла собой три взаимно заменяемые секции: демпфирующую, измерительную и холостую. В кормовой части протяженного цилиндра устанавливались стабилизирующие приспособления и устройство натяжения цилиндра. Заподлицо с обтекаемой поверхностью модели располагалась группа датчиков пульсаций пристеночного давления, которые находились в корреляционных блоках и поодиночке вдоль образующей цилиндра. Для проведения исследований были специально разработаны и изготовлены миниатюрные пьезокерамические датчики мембранного типа, которые имели эквивалентный диаметр чувствительной поверхности 1,6 мм. Эти датчики обладают повышенным пространственным разрешением и быстродействием.

Датчики пульсаций давления снабжались предварительными усилителями, которые на минимальных расстояниях располагались от датчиков для уменьшения электромагнитных помех. Электрический сигнал от предварительных усилителей с помощью экранированных линий связи поступал на малозумные усилители мощности и далее на контрольно-измерительную аппаратуру. Регистрация данных осуществлялась четырехканальными измерительными магнитофонами фирмы Брюль и Кьер. Одновременно с измерениями пульсаций давления проводился контроль вибрационной обстановки на исследуемой модели, а затем при обработке данных проводилась виброкомпенсация результатов измерений по соответствующей методике. Обработка и анализ данных осуществлялись на одно и двухканальных анализаторах фирмы Брюль и Кьер с использованием алгоритма быстрого преобразования Фурье.

Датчики пульсаций давления калибровались абсолютными и относительными методами на соответствующем оборудовании. При этом относительные измерения по сравнению с эталонными гидрофонами проводились периодически в ходе проведения экспериментальных исследований для контроля чувствительности датчиков. Все датчики

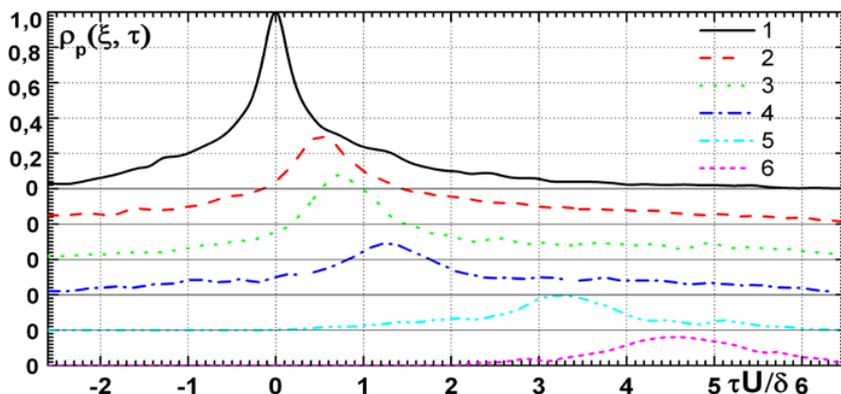


Рис. 1. Взаимные корреляции пульсаций давления для различных разделений между датчиками

на вибростендах были поверены на виброчувствительность в трех взаимно перпендикулярных плоскостях и эти характеристики учитывались при виброкомпенсации результатов измерений. В результате проведенной работы удалось достичь приемлемых условий проведения экспериментов с достаточно высокой степенью точности и повторяемости результатов. Погрешность измерений спектральных зависимостей не превышала 2дБ в диапазоне частот от 0,2 Гц до 12,5 кГц, а корреляционные характеристики измерялись с погрешностью не более 12 % в доверительном интервале 0,95 или 2σ.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис. 1 представлены взаимные или пространственно-временные корреляции пульсаций пристеночного давления,

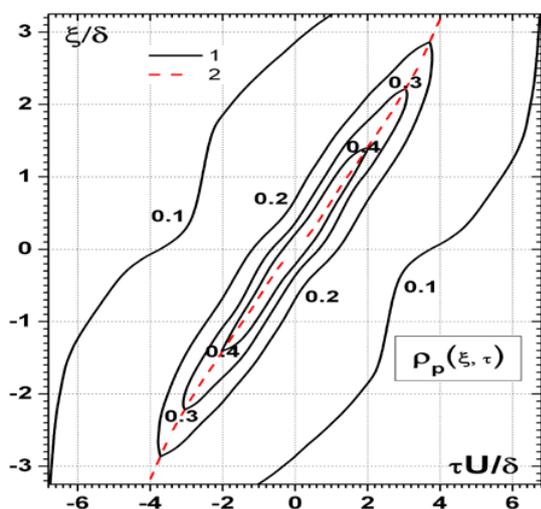


Рис. 2. Изолинии равных значений коэффициента пространственно-временной корреляции

измеренные вдоль образующей цилиндра, обтекаемого течением со скоростью 5 м/с. Для этого режима течения числа Рейнольдса, рассчитанные по скорости буксировки ( $U$ ) и расстоянию до местоположения датчиков ( $x$ ), составляли  $Re_x = Ux/\nu \approx 4 \times 10^7$ , где  $\nu$  - кинематическая вязкость жидкости. Кривая 1 измерена для разделения между датчиками ( $\xi$ ), нормированного толщиной пограничного слоя ( $\delta$ ),  $\xi/\delta = 0$  (автокорреляция), кривая 2 измерена для разделения  $\xi/\delta = 0,29$ , кривая 3 -  $\xi/\delta = 0,44$ , кривая 4 -  $\xi/\delta = 1,32$ , кривая 5 -  $\xi/\delta = 2,79$  и кривая 6 -  $\xi/\delta = 4,12$ . С увеличением разделения между датчиками коррелированность пульсаций пристеночного давления убывает и максимумы коэффициента взаимной корреляции наблюдаются при большем времени задержки ( $\tau$ ).

Линии равных значений коэффициента взаимной корреляции в плоскости  $\xi$  и  $\tau$ , нормированных внешними переменными пограничного слоя, показаны на рис. 2. Здесь кривая 1 отображает значения коэффициента пространственно-временной корреляции пульсаций пристеночного давления, измеренных вдоль образующей цилиндра, а кривая 2 соответствует максимуму коэффициента корреляции для соответствующих  $\xi$  и  $\tau$ . С увеличением разделения между датчиками наклон кривой максимумов корреляции имеет больший наклон по времени задержки. Отношение разделения между датчиками и времени задержки дает возможность определить скорость переноса коррелированных вихревых структур [3, 6]. Так, с увеличением  $\xi$  скорость переноса  $u_c = \xi / \tau_{\max}$  увеличивается. Поскольку источниками пульсаций скорости и давления в турбулентных пограничных слоях являются вихревые структуры, то для больших разделений коррелированными остаются крупномасштабные вихри, располагающиеся во внешней области пограничного слоя [3, 4, 7]. Их скорость переноса выше, чем мелкомасштабных пристеночных вихрей, что вытекает из результатов, представленных на рис. 2. Кроме того, значение коэффициента взаимной корреляции с ростом  $\xi$  убывает, что проиллюстрировано на рис. 1, а форма кривых становится более пологой.

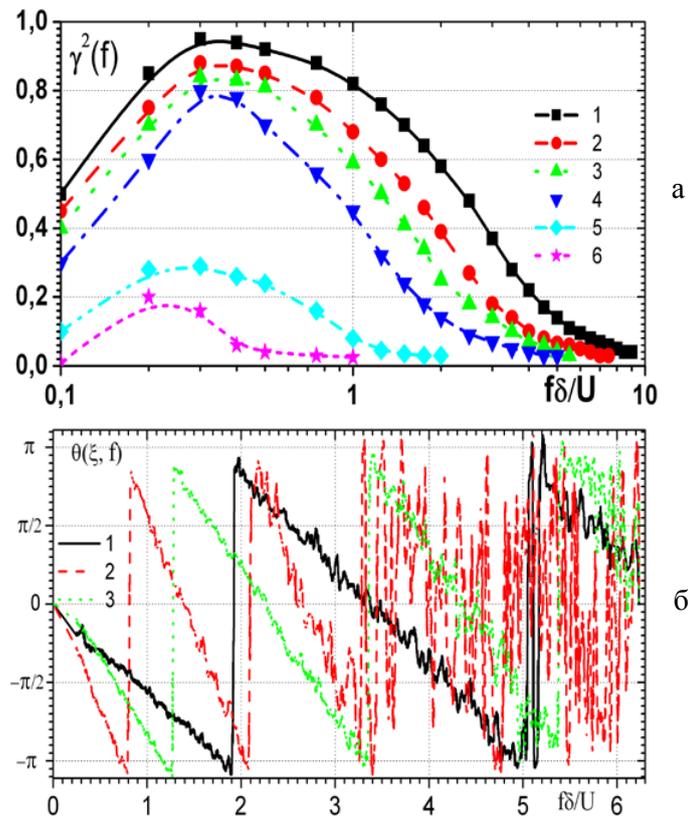


Рис. 4. Взаимный спектр пульсаций пристеночного давления: а) – функция когерентности; б) – фазовый спектр

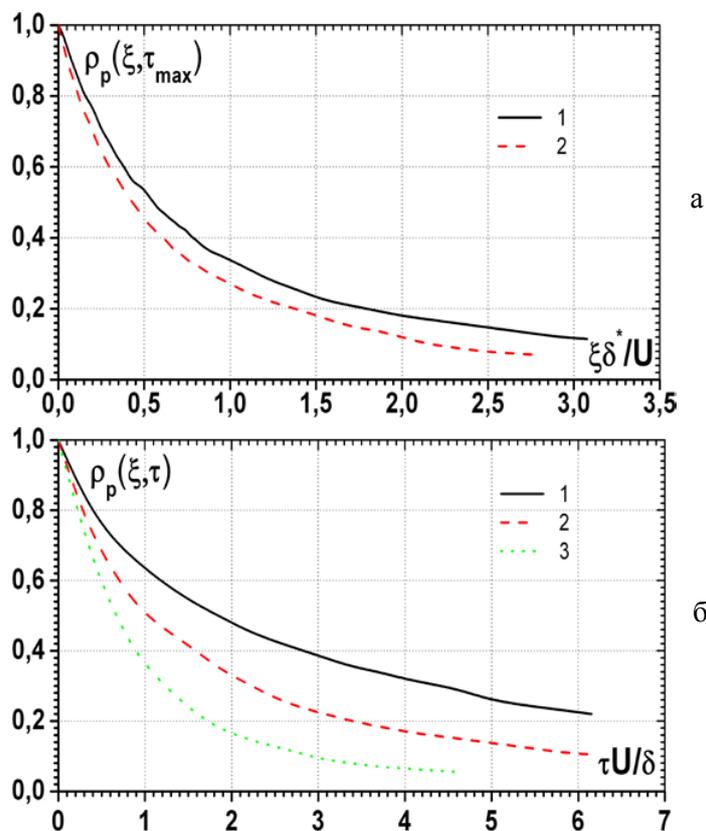


Рис. 3. Вырождение максимальных значений коэффициента взаимной корреляции: а) – вдоль образующей цилиндра; б) – во времени

Вырождение максимальных значений коэффициента пространственно-временной корреляции пульсаций пристеночного давления вдоль образующей цилиндра и во времени показано на рис. 3 для скорости буксировки 3 м/с. На рис. 3, а, кривая 1 получена в работе [8] на плоской пластине в частотном диапазоне  $0,46 \leq f\delta/U \leq 7,55$ , а кривая 2 измерена на гибком протяженном цилиндре кривизной  $\delta/R = 3$ , где  $R$  – радиус цилиндра, в частотном диапазоне  $0,30 \leq f\delta/U \leq 6,34$ . Обнаружено, что на гибком цилиндре скорость вырождения максимальных значений коэффициента взаимной корреляции выше, чем на пластине. На рис. 3, б кривая 1 измерена на гибком цилиндре в диапазоне частот  $0,15 \leq f\delta/U \leq 0,48$ , кривая 2 – в частотном диапазоне  $0,15 \leq f\delta/U \leq 3,12$  и кривая 3 – в частотном диапазоне  $0,30 \leq f\delta/U \leq 6,34$ . Время “жизни” давление образующих крупномасштабных вихревых структур, генерирующих низкочастотные пульсации, в (4...5) раз выше, чем мелкомасштабных низкоскоростных вихрей, которые генерируют высокочастотные пульсации.

Взаимные спектральные зависимости поля пульсаций пристеночного давления в виде функций когерентности и фазовых спектров, измеренных вдоль образующей цилиндра, продольно обтекаемого потоком со скоростью 5 м/с, представлены на рис. 4. Функции когерентности (рис. 4, а) измерены для следующих разделений между датчиками: кривая 1 –  $\xi/\delta = 0,19$ , кривая 2 –  $\xi/\delta = 0,29$ , кривая 3 –  $\xi/\delta = 0,39$ , кривая 4 –  $\xi/\delta = 0,48$ , кривая 5 –  $\xi/\delta = 1,86$  и кривая 6 –  $\xi/\delta = 3,67$ . Фазовые спектры (рис. 4б)

побудовані для пар датчиків, розділених на відстані: крива 1 –  $\xi/\delta=0,19$ , крива 2 –  $\xi/\delta=0,29$  і крива 3 –  $\xi/\delta=0,39$ . Ітак, з збільшенням відстані між датчиками і частоти когерентності поля пульсацій тиску зменшуються, оскільки мелкомасштабні вихвові структури втрачають свою індивідуальність швидше, ніж крупномасштабні когерентні вихвові структури. Фаза взаємного спектра з збільшенням частоти монотонно змінюється і нахил зміни фази зменшується з ростом частоти і з зменшенням відстані між датчиками. Напрямок зміни фази дає можливість визначити напрям переносу когерентних вихвових структур [3, 6, 9, 10], в даному випадку по напрямку руху, а також визначити конвективну швидкість вихвових структур в вигляді  $u_{cp} = \xi / [\Delta\theta(\xi, f) / \Delta f]$ .

## ВИВОДИ

1. Встановлено, що когерентні вихвові структури, генерувані турбулентним пограничним шаром і конвектуючі над обтекаємою поверхнею циліндра, обумовлюють підвищені рівні когерентності поля пульсацій пристіночного тиску, а також зміну фазового спектра в вигляді нахилних кривих, кут нахилу яких зменшується з ростом конвективної швидкості.
2. Обнаружено, що швидкість виродження максимальних значень коефіцієнта просторово-часової кореляції в широкому діапазоні частот на гнучкому циліндрі вище, ніж на пластині.
3. Мелкомасштабні вихви, генеруючі високочастотні пульсації тиску, вироджуються швидше і переносяться повільніше, ніж крупномасштабні когерентні вихвові структури, формуючі зовнішню область пограничного шару.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Блохинцев Д. И.* Акустика неоднородной движущейся среды. – М.: Наука, 1981. – 208 с.
2. *Смоляков А. В.* Шум турбулентных потоков. – СПб.: ЦНИИ им. акад А.Н. Крылова, 2005. – 312 с.
3. *Willmarth W. W.* Pressure fluctuations beneath turbulent boundary layers // *Annu. Rev. Fluid Mech.* – 1975. – 7. – P. 13–37.
4. *Bull M. K.* Wall-pressure fluctuations beneath turbulent boundary layers: Some reflections on forty years of research // *J. Sound Vibr.* – 1996. – 190, № 3. – P. 299–315.
5. *Vinogradnyi G. P., Voskoboinick V. A., Grinchenko V. T., Makarenkov A. P.* Spectral and correlation characteristics of the turbulent boundary layer on an extended flexible cylinder // *J. Fluid Dyn.* – 1989. – 24, № 5. – P. 695–700.
6. *Воскобойник В. А., Гринченко В. Т., Макаренко А. П.* Швидкості переносу когерентних вихвових структур в турбулентному пограничному шарі на циліндрі // *Акуст. вісн.* – 2000. – 3, № 4. – С. 21–29.
7. *Воскобойник В. А.* Когерентные вихвовые структуры турбулентного пограничного слоя на продольно обтекаемом цилиндре // *Прикл. гідромех.* – 2012. – 14, № 1. – С. 49–62.
8. *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.

9. *Воскобойник В. А.* Пульсации пристеночного давления турбулентного пограничного слоя, образованного при обтекании гибкого протяженного цилиндра: Автореф. дис. к. т. н.: 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы. / ИГМ АН Украины. – Киев, 1993. – 15 с.
10. *Farabee T. M., Casarella M. J.* Spectral features of wall pressure fluctuations beneath turbulent boundary layers // *Phys. Fluids.* – 1991. – **3**. – P. 2410–2420.