

УДК 532.526

ТУРБУЛЕНТНЫЕ ПУЛЬСАЦИИ ДАВЛЕНИЯ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ ПРОТЯЖЕННОГО ЦИЛИНДРА ПРИ ЕГО ПРОДОЛЬНОМ ОБТЕКАНИИ

© 2010 г. В. М. Ткаченко, А. В. Смольяков, В. А. Колышницын, В. П. Маршов

Центральный научно-исследовательский институт им. акад. А.Н. Крылова

196158 Санкт-Петербург, Московское шоссе 44

E-mail: asmoliakov@inco.spb.ru

Поступила в редакцию 5.05.09 г.

В малозумной аэротрубе выполнены измерения частотных спектров турбулентных пульсаций давления на поверхности протяженного цилиндра при его продольном обтекании. Измерены частотные спектры, обусловленные как суммарным вкладом от всех мод поля давления, так и вкладом только от нулевой (кольцевой) моды. Результаты измерений частотных спектров сравниваются с другими известными опытными данными. Для нулевой моды выполнены измерения продольных взаимных спектров поля турбулентных давлений. С помощью преобразования Фурье взаимных спектров получены аналитические выражения для размерного и безразмерного частотно-волнового спектра нулевой моды. Обсуждаются особенности частотно-волнового спектра при больших волновых числах.

Практический интерес к структуре и статистическим характеристикам пограничных слоев, образующихся при продольном обтекании протяженных цилиндров, обусловлен широким применением акустических штанговых антенн в морской сейсморазведке углеводородных месторождений, которые часто называют сейсмокосами.

Относительное удлинение сейсмокос, то есть отношение их длины L , достигающей километра и более, к диаметру штанга d размером в несколько сантиметров, может иметь величину L/d порядка 10^4 или даже 10^5 [1]. Обтекание столь протяженных цилиндрических тел имеет свои специфические особенности, не свойственные обтеканию тел с малыми удлинениями $L/d \approx 8-12$, которые характерны для большинства плавающих и летающих инженерных сооружений и для которых в настоящее время разработаны надежные методы прогноза всех необходимых характеристик турбулентных пограничных слоев. Отсутствие таких методов для турбулентных пограничных слоев, образующихся на поверхности протяженных цилиндров большого удлинения, заставляет исследователей концентрировать усилия на выполнении опытных измерений. Практический интерес к данной проблеме стимулировал выполнение большого числа экспериментальных работ по изучению на продольно обтекаемых цилиндрах различных характеристик пограничных слоев, в том числе — спектров турбулентных пульсаций давления [2–9].

Настоящая работа представляет собой развитие ранее начатых экспериментальных исследований [9] в малозумной аэродинамической трубе ЦНИИ им. академика А.Н. Крылова турбулентных пульсаций давления на поверхности продольно обтекаемых цилиндров.

Жесткий металлический макет, изготовленный из титановой трубы со скругленными оконечностями, имел длину 4.5 м. и радиус наружной поверхности $a = 1.75 \times 10^{-2}$ м. Макет с помощью проволочных растяжек располагался параллельно натекающему потоку в центральной части рабочего участка аэротрубы, поперечное сечение которого представляет собой квадрат 1.3×1.3 м² со скошенными углами. Скорость потока U_∞ , обтекающего макет, варьировалась в диапазоне от 10 до 50 м/с, так что число Рейнольдса, составленное по радиусу цилиндра $R_a = aU_\infty/\nu$, изменялось в пределах от $R_a = 1.1 \times 10^4$ до $R_a = 5.6 \times 10^4$ (здесь ν — кинематическая вязкость среды).

Турбулентные пульсации давления на поверхности макета измерялись на расстояниях $x = 2.50-2.70$ м от его носовой оконечности пьезокерамическими преобразователями двух типов. Один из них представлял собой так называемые “точечные” преобразователи с диаметром чувствительной поверхности 1.3 мм, которые предназначались для измерений спектров, обусловленных суммарным вкладом от всех мод поля давлений. Другой тип составляли кольцевые преобразователи, чувствительная поверхность которых шириной в 2.5 мм опоясывала макет по его окружности. Эти

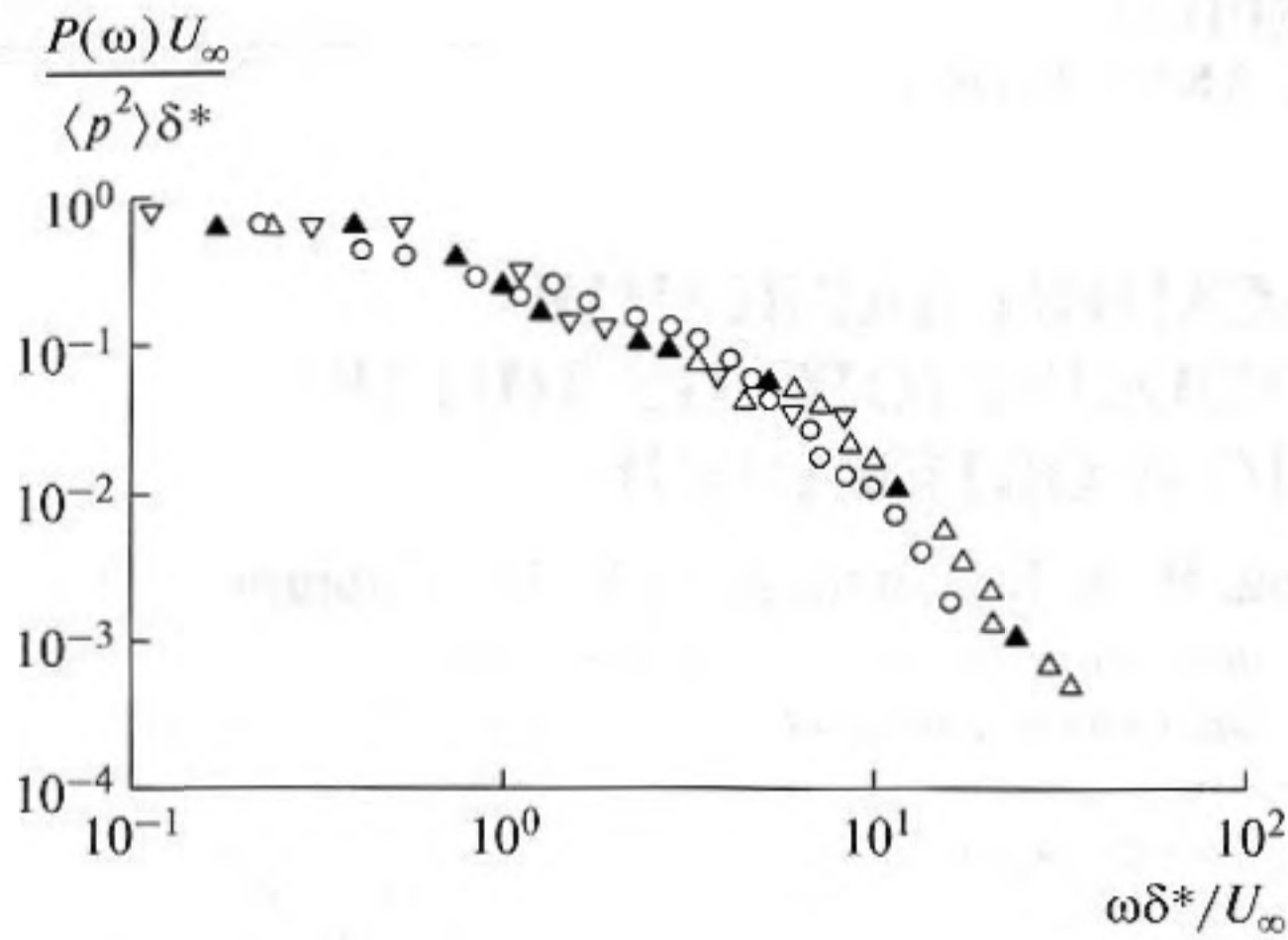


Рис. 1. Частотный спектр суммарного (от всех мод) турбулентного давления при разных скоростях натекающего потока: ∇ – $U_\infty = 10$ м/с; \triangle – $U_\infty = 30$ м/с; \blacktriangle – $U_\infty = 50$ м/с. \circ – Опытные данные работы [10].

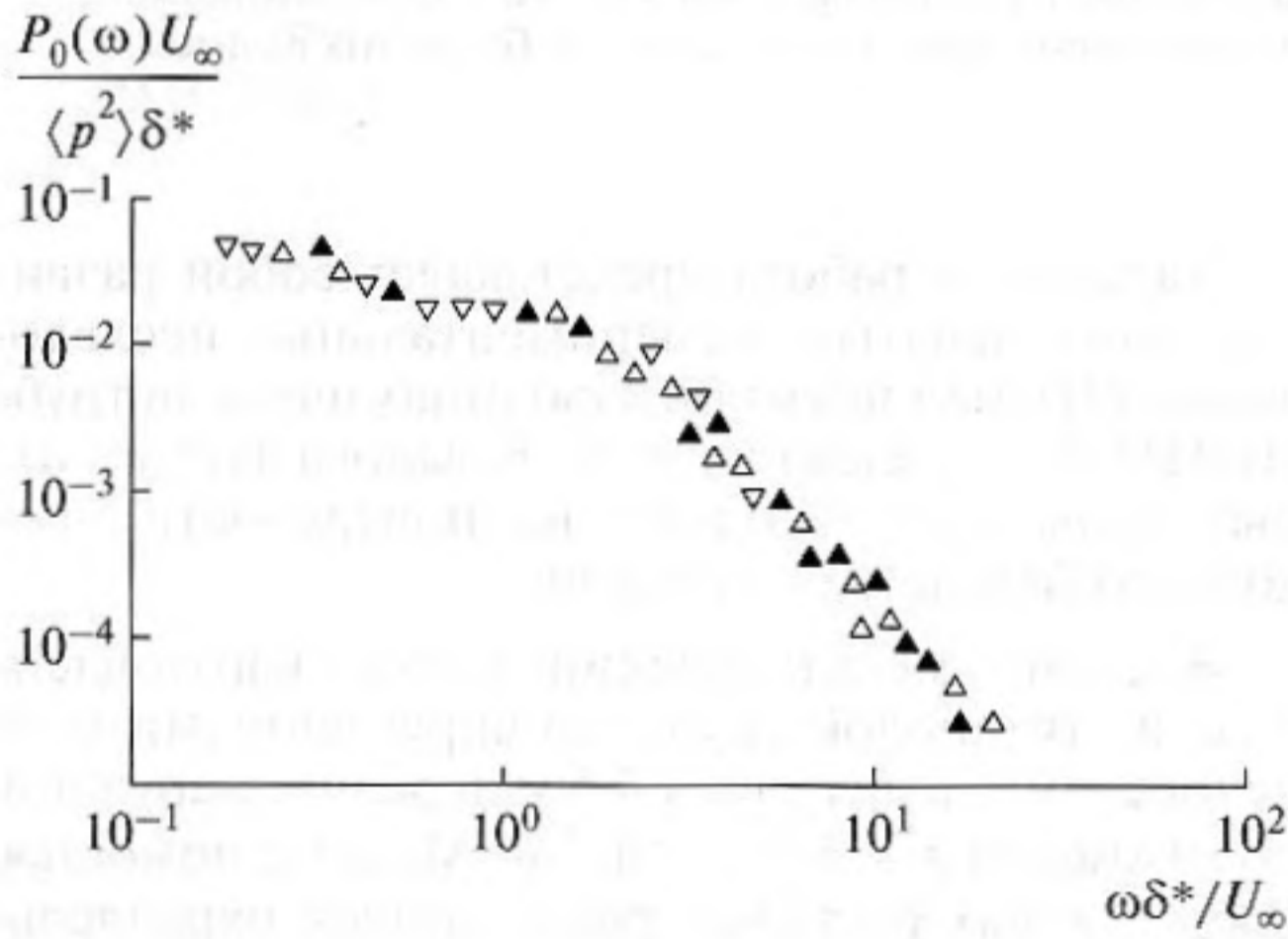


Рис. 2. Частотный спектр нулевой моды турбулентных давлений при разных скоростях натекающего потока $U_\infty = 10, 30$ и 50 м/с (обозначения как на рис. 1).

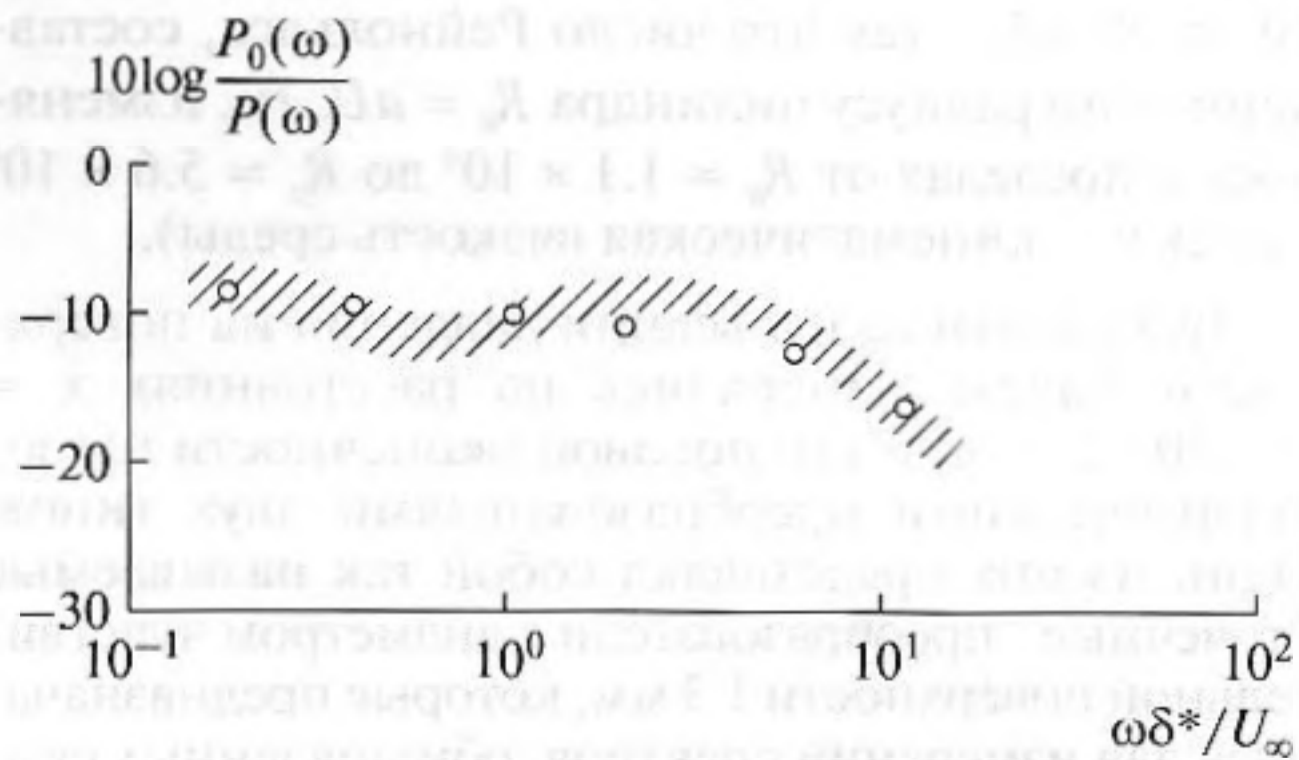


Рис. 3. Относительный вклад нулевой моды в суммарный частотный спектр турбулентных давлений. // — область экспериментальных значений по данным рисунков 1 и 2. \circ – Опытные данные работы [11].

преобразователи предназначались для измерений спектров, обусловленных вкладом только от нулевой (кольцевой) моды поля давлений, поскольку вклады от всех других мод равны нулю в результате их осреднения на кольцевой поверхности такого преобразователя.

Преобразователи обоих типов были объединены в группы блоков, что позволило помимо спектральных уровней поля давлений измерять также узкополосные пространственные корреляции (взаимные спектры) пульсаций давления на поверхности цилиндра. С помощью преобразования Фурье взаимных спектров удалось получить аналитические выражения для частотно-волнового спектра поля давлений.

Результаты выполненных измерений спектральной плотности суммарных давлений и давлений, обусловленных вкладом только нулевой моды, позволили несколько уточнить некоторые из ранее полученных [9] результатов. Вместе с тем в данной работе использованы иные нормирующие комплексы для приведения спектров к безразмерной форме, в которой их удобнее сравнивать с опытными данными, полученными в других лабораториях.

На рис. 1 представлены результаты измерений спектров мощности суммарных давлений, обусловленных вкладом от всех мод. Там же показаны аналогичные данные, полученные в работе Виллмарта и др. [10]. Несмотря на некоторый разброс опытных данных можно считать, что они неплохо согласуются друг с другом. Спектральные уровни $P(\omega)$ и $P_0(\omega)$ соответственно на рисунках 1 и 2 нормированы комплексом $\langle p^2 \rangle \delta^* / U_\infty$, где $\langle p^2 \rangle$ – среднеквадратичное (в общей полосе частот) значение давлений и δ^* – толщина вытеснения пограничного слоя. Круговые частоты ω на рисунках 1, 2 и 3 нормированы комплексом U_∞ / δ^* .

На рис. 2 показаны результаты измерений спектральной плотности давлений, обусловленных вкладом только от нулевой моды.

Рис. 3 иллюстрирует относительный вклад нулевых мод в суммарный спектр мощности на разных частотах. Можно видеть, что этот вклад на низких и средних частотах составляет примерно одну десятую от суммарной мощности, а на высоких частотах и того меньше. На этом же рисунке приведены результаты работы [11], авторы которой получили спектр нулевой моды не путем непосредственных измерений, а с помощью обработки результатов измерений взаимных спектров “точечными” датчиками на поверхности цилиндра. Видно, что наши результаты и результаты работы [11] почти не различаются.

Расположение кольцевых преобразователей вдоль оси макета позволило производить измере-

ния взаимных спектров пульсаций давления при четырех различных пространственных интервалах $\xi_1 = 4.5, 7.5, 15.0$ и 19.5 мм между центрами чувствительной поверхности кольцевых преобразователей. Первичная обработка этих измерений состояла в получении коэффициента когерентности $h(\xi_1, \omega)$ и фазы $\varphi(\xi_1, \omega)$ сигналов, поступающих с кольцевых преобразователей.

Конвективная (фазовая) скорость U_c нулевой моды поля давлений определялась по формуле $U_c = \omega \xi_1 / \varphi(\xi_1, \omega)$, в которой использовались дискретные значения фазы $\varphi(\xi_1, \omega) = \xi_1 \omega / U_c$, кратные числу π . В таблице приведены значения конвективной скорости, нормированные скоростью натекающего потока U_∞ .

Можно видеть, что безразмерная конвективная скорость U_c / U_∞ в среднем равна 0.7 со слабой тенденцией уменьшения с ростом скорости натекающего потока.

Согласно определению, модуль безразмерного взаимного спектра $|\gamma(\xi_1, \omega)|$ связан с коэффициентом когерентности $h(\xi_1, \omega)$ соотношением

$$|\gamma(\xi_1, \omega)| = \sqrt{h(\xi_1, \omega)}. \quad (1)$$

Вычисленные по формуле (1) значения модуля взаимного спектра нулевой моды поля давлений построены на рис. 4 в зависимости от фазы $\varphi(\xi_1, \omega) = \xi_1 \omega / U_c$. Здесь же для сравнения пунктирной линией показан модуль безразмерного продольного взаимного спектра турбулентных пульсаций давления на плоской пластине, соответствующий известной модели Коркоса [12]. Отчетливо видно, что продольный взаимный спектр нулевой моды на цилиндре убывает с ростом фазы значительно быстрее, чем продольный взаимный спектр на пластине. Область экспериментальных точек на рис. 4 практически линейно спадает от единицы (при нулевом значении фазы) до нуля (при $\xi_1 \omega / U_c \approx 2\pi$). Соответствующая аппроксимация для модуля взаимного спектра нулевой моды имеет вид

$$|\gamma(\xi_1, \omega)| = 1 - |\xi_1 \omega / (2\pi U_c)| \quad \text{при } \xi_1 \omega / U_c \leq 2\pi, \quad (2)$$

$$|\gamma(\xi_1, \omega)| = 0 \quad \text{при } \xi_1 \omega / U_c > 2\pi. \quad (3)$$

Обычным определением пространственного масштаба когерентности через взаимный спектр является интеграл от последнего по всему интервалу пространственных разделений:

$$\Lambda = \int_{-\infty}^{\infty} |\xi_1, \omega| d\xi_1. \quad (4)$$

Зависимость конвективной скорости поля давления на нулевой моде от скорости натекающего потока и интервала между точками наблюдения

$\xi_1, \text{мм}$ \ $U_\infty, \text{м/с}$	30	40	50
4.5	0.71	0.68	0.64
7.5	0.68	0.66	0.70
15.0	0.71	0.71	0.68
19.5	0.71	0.70	0.70

Применение формулы (4) к аппроксимации (2), (3) дает величину масштаба когерентности для нулевой моды поля турбулентных давлений:

$$\Lambda = 2\pi U_c / \omega.$$

Эта величина примерно в 2.5 раза меньше, чем аналогичный масштаб турбулентных давлений на плоской поверхности, вычисленный по модели Коркоса. Использование других более поздних моделей и результатов измерений взаимных спектров [13–17] дает несколько отличающиеся оценки $\Lambda_n / \Lambda \approx 2.05 - 2.38$, где Λ_n – интегральные масштабы, вычисленные по этим моделям и результатам.

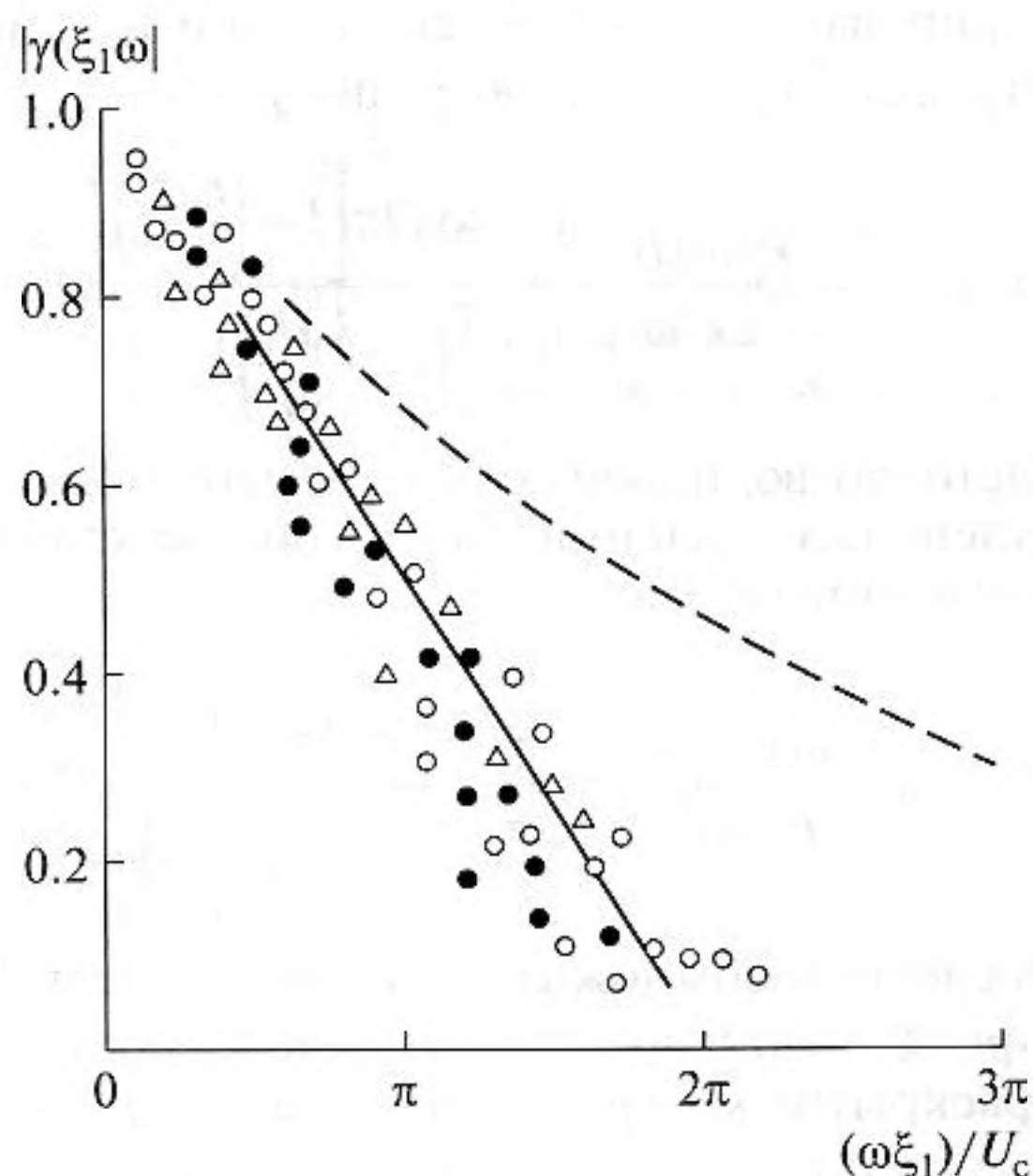


Рис. 4. Взаимный спектр нулевой моды поля турбулентных давлений в диапазоне пространственных разделений $\xi_1 = 4.5-19.5$ мм в зависимости от фазы при разных скоростях натекающего потока: $\Delta - U_\infty = 30$ м/с, $\bullet - U_\infty = 40$ м/с, $\circ - U_\infty = 50$ м/с, - - - - взаимный спектр на плоской пластине, соответствующий модели Коркоса [12].

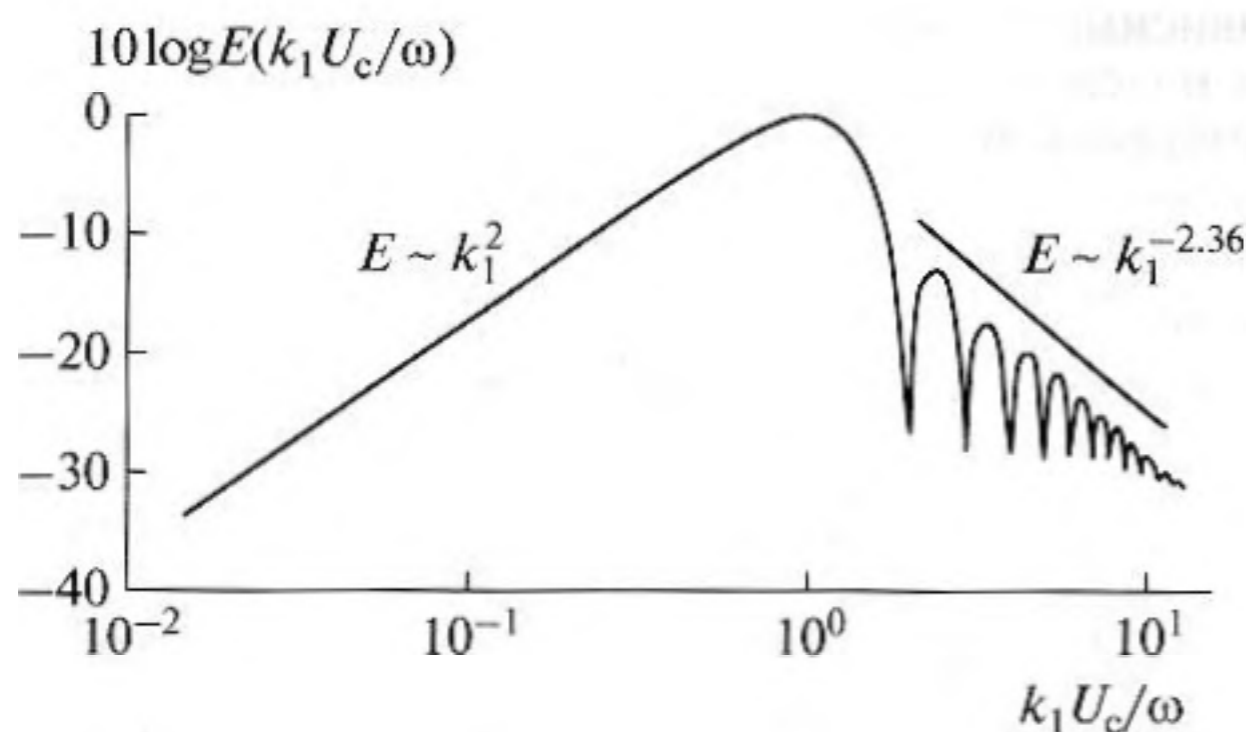


Рис. 5. Безразмерный частотно-волновой спектр нулевой моды поля турбулентных давлений.

Выразим, как обычно, размерный взаимный спектр $P_0(\xi_1, \omega)$ через спектр мощности нулевой моды $P_0(\omega)$:

$$P_0(\xi_1, \omega) = P_0(\omega) |\gamma(\xi_1, \omega)| \exp(i\xi_1 \omega / U_c), \quad (5)$$

где i — мнимая единица. Частотно-волновой спектр $e(k_1, \omega)$ теперь можно получить как преобразование Фурье от взаимного спектра (5):

$$e(k_1, \omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} P_0(\xi_1, \omega) \exp(-ik_1 \xi_1) d\xi_1, \quad (6)$$

где k_1 — продольное волновое число. Подставив (2), (3) и (5) в общее выражение (6) и выполнив интегрирование с учетом симметрии взаимного спектра (2) по разделению ξ_1 , получим

$$e(k_1, \omega) = \frac{P_0(\omega) U_c}{2\pi^2 \omega} \cdot \frac{1 - \cos 2\pi \left[1 - \left(\frac{k_1 U_c}{\omega} \right) \right]}{\left[\left(1 - \frac{k_1 U_c}{\omega} \right) \right]^2}, \quad (7)$$

Частотно-волновой спектр нулевой моды поля турбулентных давлений (7) можно представить в безразмерной форме:

$$E(k_1 U_c / \omega) = \frac{e(k_1, \omega) \omega}{P_0(\omega) U_c} = \frac{1}{2\pi^2} \frac{1 - \cos 2\pi \left[1 - \left(\frac{k_1 U_c}{\omega} \right) \right]}{\left[1 - \left(\frac{k_1 U_c}{\omega} \right) \right]^2}. \quad (8)$$

Последний множитель в правой части (7) и (8) при $k_1 = \omega / U_c$ имеет неопределенность типа $0/0$, раскрытие которой дает для этого множителя величину $2\pi^2$, так что безразмерный частотно-волновой спектр нулевой моды, представленный в форме (8), обращается в единицу при волновом числе $k_1 = \omega / U_c$.

Форма частотно-волнового спектра (8) показана на рис. 5. Сначала этот спектр растет пропорционально квадрату безразмерного волнового

числа $k_1 U_c / \omega$ и достигает максимума при “конвективном” волновом числе $k_1 = \omega / U_c$. Затем начинается убывание спектра, которое, однако, происходит не монотонно, а с флуктуациями. Это выглядит довольно неожиданно, поскольку более привычные для нас частотно-волновые спектры турбулентных пульсаций давления на плоской пластине монотонны [18–22]. Убывающая часть частотно-волнового спектра нулевой моды состоит из множества локальных лепестков с максимумами, величина которых уменьшается с ростом волнового числа по закону $(k_1 U_c / \omega)^{-2.36}$. Ширина лепестков также непрерывно уменьшается по мере увеличения волнового числа.

Результат преобразования Фурье (8) зависит от формы аппроксимации результатов измерения взаимных спектров, принятой здесь в виде линейной зависимости (2)–(3). Линейную аппроксимацию для своих результатов измерения взаимных спектров использовали также авторы работы [11], которой они, однако, не воспользовались для получения частотно-волнового спектра. Если взаимные спектры в действительности не обращаются в нуль при конечном значении фазы $\xi_1 \omega / U_c = \text{const}$, как это принято в [11] и в данной работе, а малые значения взаимных спектров стремятся к нулю асимптотически при $\xi_1 \omega / U_c \rightarrow \infty$, то можно высказать осторожное предположение, что поведение частотно-волнового спектра станет монотонным. Однако измерение малых значений взаимных спектров $|\gamma(\xi_1, \omega)| < 0.05$ представляет собой в настоящее время очень трудную экспериментальную задачу.

Во всяком случае, сейчас пока трудно сформулировать аргументированное физическое объяснение непривычному для нас поведению частотно-волнового спектра (8). Возможно, оно появится по мере накопления экспериментального материала, однако не на основе косвенных вычислений, а путем прямых измерений частотно-волнового спектра. Такие измерения следует получить, например, с помощью многоэлементных волновых решеток [23–25], составленных из серии кольцевых преобразователей, расположенных на поверхности протяженного цилиндра.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект 09-08-00020.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tutty O.R. Flow along a long thin cylinder // J. Fluid Mech. 2008. V. 602. P. 1–37.
2. Snarski S.R. Flow over yawed circular cylinders: wall pressure spectra and flow regimes // Phys. Fluid 2004. V. 16. P. 344–359.

3. *Cipolla K.M., Keith W.L.* Momentum thickness measurements for thick axisymmetric turbulent boundary layers // *J. Fluid Mech.* 2003. V. 125. P. 569–575.
4. *Dhanak M.R.* Turbulent boundary layer on a cylinder: the low-wavenumber surface pressure spectrum due a low-Mach-number flow // *J. Fluid Mech.* 1988. V. 191. P. 443–464.
5. *Nepomuceno H.G., Lueptow R.M.* Pressure and shear stress measurements at the wall in turbulent boundary layer on a cylinder // *Phys. Fluid* 1997. V. 9. P. 2732–2739.
6. *Lueptow R.M., Haritonidis J.H.* The structure of the turbulent boundary layer on a cylinder in axial flow // *Phys. Fluid* 1987. V. 30. P. 2993–2998.
7. *Snarski S.R., Lueptow R.M.* Wall pressure and coherent structures in a turbulent boundary layer on a cylinder in axial flow // *Phys. Fluid* 1995. V. 286. P. 137–142.
8. *Виноградный Г.П., Воскобойник В.А., Гринченко В.Т., Макаренков А.П.* Спектральные и корреляционные характеристики турбулентного пограничного слоя на гибком протяженном цилиндре // *Изв. АН СССР МЖГ.* 1989. № 5. С. 49–54.
9. *Зархин В.И., Робинов Д.Г., Ткаченко В.М.* Спектр мощности кольцевых мод пульсаций давления на поверхности продольно обтекаемого цилиндра // *Акуст. журн.* 1992. Т. 38. Вып. 1. С. 46–51.
10. *Willmarth W.W., Winkel R.E., Sharma L.K., Bogar T.J.* Axially symmetric turbulent boundary layer on cylinder: mean velocity profiles and wall pressure fluctuations // *J. Fluid Mech.* 1976. V. 76. Part 1. P. 35–64.
11. *Bokde L.W., Lueptow R.M., Abracham B.* Spanwise structure of wall pressure on a cylinder in axial flow // *Phys. Fluid.* 1999. V. 11. № 1. P. 151–161.
12. *Corcos G. M.* Resolution of pressure in turbulence // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1963. V. 35. № 1. P. 192–199.
13. *Chase D.M.* The character of the turbulent wall pressure spectrum at subconvective wavenumbers and a suggested comprehensive model // *J. Sound and Vib.* 1987. V. 112. № 1. P. 125–147.
14. *Ffowcs Williams J.E.* Boundary-layer pressure and the Corcos model: a development to incorporate to low-wavenumber constraints // *J. Fluid Mech.* 1982. № 125. P. 9–25.
15. *Abracham B.M. and Keith W.L.* Direct measurements of turbulent boundary layer wall pressure wavenumber-frequency spectra // *J. Fluid Engineer.* 1998. V. 120. P. 29–39.
16. *Hwang Y.F. and Geib F.E.* Estimation of the wavevector-frequency spectrum of turbulent boundary layer wall pressure by multiple linear regressions // *Transaction of the American Society of Mechanical Engineers. J. of Vibration Acoustics, Stress and Reliability in Design.* 1984. V. 106. P. 334–342.
17. *Farabee T.M. and Casarella M.J.* Spectral features fluctuations beneath turbulent boundary layers. // *Phys. Fluids* 1991. A. V. 3. № 10. P. 2410–2419.
18. *Смоляков А.В., Ткаченко В.М.* Модели поля псевдозвуковых турбулентных пристеночных давлений и опытные данные // *Акуст. журн.* 1991. Т. 37. № 6. С. 1199–1207.
19. *Смоляков А.В., Ткаченко В.М.* Измерение турбулентных пульсаций. Л.: Энергия, 1980. 264 с.
20. *Кудашев Е.Б., Яблоник Л.Р.* Турбулентные пристеночные пульсации давления. М.: Научный мир, 2007. 223 с.
21. *Смоляков А.В.* Новая модель взаимного и частотно-волнового спектров турбулентных пульсаций давления в пограничном слое // *Акуст. журн.* 2006. Т. 52. № 3. С. 393–400.
22. *Смоляков А.В.* Шум турбулентных потоков // СПб.: ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова, 2005. 312 с.
23. *Ткаченко В.М., Смоляков А.В., Колышницын В.А., Маршов В.П.* Частотно-волновой спектр турбулентных давлений: способы измерения и результаты // *Акуст. журн.* 2006. Т. 54. № 1. С. 127–132.
24. *Кудашев Е.Б.* Пространственная фильтрация пристеночных турбулентных пульсаций давления // *Акуст. журн.* 2007. Т. 53. № 5. С. 715–723.
25. *Кудашев Е.Б.* Пространственная фильтрация пристеночных турбулентных пульсаций давления. Методы прямых измерений частотно-волновых спектров // *Акуст. журн.* 2008. Т. 54. № 1. С. 118–126.