

УДК 534.222

О ПОПЕРЕЧНОЙ КОРРЕЛЯЦИИ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ КАСАТЕЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ НА СТЕНКЕ

© 1997 г. Б. М. Ефимцов, В. А. Сысоев

Государственный научно-исследовательский центр ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского
107005 Москва, ул. Радио, 17

Поступила в редакцию 26.12.95 г.

Приведены результаты экспериментального исследования пространственной корреляции спектральных составляющих турбулентных пульсаций касательного напряжения на стенке и их взаимной корреляции с пристенными турбулентными пульсациями давления. Обнаружены особенности в поведении поперечных взаимных спектров, связанные с проявлением организованных структур в пристенной турбулентности, и сильная взаимная корреляция между пульсациями давления и касательного напряжения на стенке в области малых чисел Струхала.

Поле турбулентных пульсаций касательного напряжения на стенке привлекает все большее внимание специалистов, которые решают задачи акустики турбулентного пограничного слоя [1, 2] и общие проблемы пристенной турбулентности. В отечественной и иностранной литературе содержится ряд публикаций, в которых приводятся экспериментальные данные об этом случайном по пространству и времени поле [3]. Однако авторы этих публикаций в основном ограничивались получением среднеквадратичных значений и спектров. Информация о продольной корреляции спектральных составляющих и фазовой скорости поля пульсаций касательного напряжения, полученная из экспериментов на пластине и стенке канала, представлена в статьях [4–7]. Более того, в статье [6] содержатся и первые экспериментальные данные о поперечной корреляции при очень малых интервалах между точками наблюдения. Однако последующие измерения при больших значениях интервала между точками наблюдения показали некоторые особенности в поведении поперечных взаимных спектров. Эти особенности проявляются и в поперечной взаимной корреляции спектральных составляющих турбулентных пульсаций давления с пульсациями касательного напряжения. Настоящая работа посвящена описанию этих последних экспериментов и полученных в них результатов.

Установка, на которой изучалась поперечная корреляция турбулентных пульсаций давления и касательного напряжения, представляла собой канал с прямоугольным поперечным сечением 21.4×221 мм² и длиной 3 м. Во входном коллекторе установки, связанном с рабочей частью, осуществлялся переход от круглого сечения к прямоугольному при отношении площадей ~ 12 . За рабочей частью следовали две секции безотрывного

диффузора, глушитель шума и облицованная звукопоглощающим материалом успокоительная камера объемом ~ 1.5 м³. Последняя соединялась трубопроводом (через гибкую вставку) с центробежным вентилятором, который устанавливался вне помещения с экспериментальной установкой. Поток в рабочей части реализовался за счет отсоса воздуха из камеры вентилятором.

Результаты измерений перепада среднего давления и профилей средней скорости показали, что течение в зоне измерений канала было стабилизированным и двумерным. Осредненные параметры потока у стенки канала определялись на основе непосредственных измерений. При скорости на оси канала $U_0 = 30$ м/с скоростной напор $q_0 = 530$ Па, осредненное трение на стенке $\tau_w \approx 1.7$ Па, динамическая скорость $U_\tau = (\tau_w/\rho_w)^{1/2} = 1.2$ м/с, число Рейнольдса $Re = \delta U_\tau/\nu_w = 820$ и толщина вытеснения пограничного слоя $\delta^* = 1.115$ мм. Здесь ρ_w и ν_w – плотность и коэффициент кинематической вязкости для условий на стенке, которые практически не отличались от соответствующих параметров на оси канала.

Осредненное трение на стенке и пульсации касательного напряжения измерялись с помощью пленочных приемников типа 55R45, термоанемометрической системы 55M со стандартным мостом 55M10 фирмы “Диса”. Поперечный размер пленки приемников составлял 0.75 мм, а продольный – 0.2 мм. Верхняя граничная частота измерительного тракта определялась методом тепловых импульсов от генератора, встроенного в термоанемометр. При перегреве 80°C (эта величина перегрева использовалась в измерениях) она достигала 55 кГц, что соответствовало паспортным данным используемых приемников.

При измерениях продольного взаимного спектра $\Phi_r(\xi_1, 0, \omega)$ турбулентных пульсаций касательно-

го напряжения на стенке использовалось два приемника типа 55R45, устанавливаемых строго заподлицо с обтекаемой поверхностью при различных значениях пространственного разделения (ξ_1) в направлении потока. Минимальное значение $\xi_1 = 4.5$ мм определялось габаритными размерами корпуса пленочного приемника. При измерениях поперечного взаимного спектра $\varphi(0, \xi_2, \omega)$ пульсаций касательного напряжения на стенке интервал между точками наблюдения по координате, ортогональной направлению потока (ξ_2), равный 4.5 мм, оказался слишком большим, так как функция $\varphi(0, \xi_2, \omega)$ при $\xi_2 > 4.5$ мм принимала очень малые значения. Поэтому с помощью приемников, установленных заподлицо со стенкой, не удавалось получить надежные экспериментальные данные о поперечном взаимном спектре пульсаций касательного напряжения. Эта трудность методического плана была преодолена.

Для измерения поперечного взаимного спектра при малых интервалах между точками наблюдения вместо одного из пленочных приемников использовался проволочный термоанемометрический приемник пульсаций скорости, устанавливаемый вблизи стенки. Принцип измерений основан на линейной связи пульсации касательного напряжения на стенке с продольными пульсациями скорости вблизи нее. Действительно, результаты исследований структуры вязкого подслоя, которые описаны в обзорной работе [3], свидетельствуют о том, что вблизи стенки не только средняя, но и мгновенная скорости являются линейными функциями расстояния от нее. Линейной зависимостью связаны и пульсации касательного напряжения с продольными пульсациями скорости вблизи стенки. Об этом свидетельствуют и наши результаты непосредственных измерений взаимных спектров между сигналом от пленочного приемника, установленного заподлицо со стенкой, и сигналом от проволочного приемника продольных пульсаций скорости $\varphi_{tu}(\xi_1, \xi_2, \xi_3, \omega)$ при $\xi_1 = \xi_2 = 0$ и при малых значениях расстояния от стенки (ξ_3).

В данной работе использовался проволочный приемник типа 55R14 фирмы "Диса", который имел возможность перемещения по нормали к стенке вплоть до расстояния $\xi_3 = 0.1$ мм от нее. Предварительные измерения функции $\varphi_{tu}(0, 0, \xi_3, \omega)$ показали незначительность ее изменения в интервале $\xi_3 = 0.1-0.3$ мм и близость к единице ее значения на низких частотах. По мере увеличения частоты отклонение $\varphi_{tu}(0, 0, \xi_3, \omega)$ от единицы увеличивалось. Это ограничивало частотный диапазон измерений сверху.

Таким образом, полученные здесь результаты подтверждают возможность использования приемников пульсаций касательного напряжения для исследования структуры поля продольных пульсаций

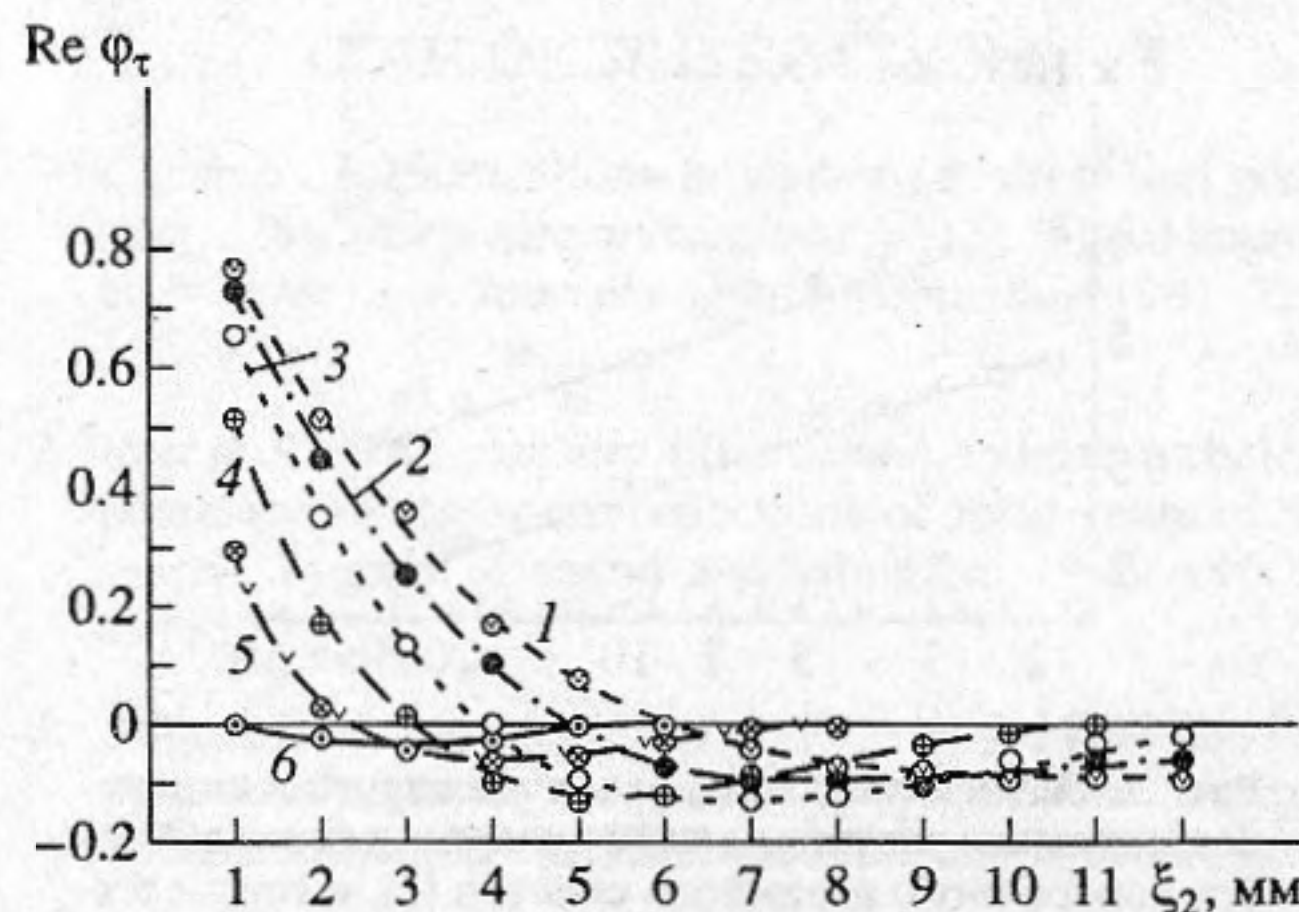


Рис. 1. Вещественная часть поперечного взаимного спектра (турбулентных пульсаций касательного напряжения на стенке) для разных чисел Струхала: 1 — $Sh = 2 \times 10^{-3}$, 2 — 4×10^{-3} , 3 — 8×10^{-3} , 4 — 1.5×10^{-2} , 5 — 3×10^{-3} , 6 — 1.5×10^{-2} , 5 — 3×10^{-2} , 6 — 7×10^{-2} .

скорости вблизи стенки и проволочных приемников продольных пульсаций скорости вблизи стенки для исследования структуры поля пульсаций касательного напряжения на ней.

В данной работе эти возможности были реализованы при определении поперечного взаимного спектра пульсаций касательного напряжения на стенке. С этой целью проволочный приемник устанавливался на фиксированном расстоянии от стенки ($\xi = 0.2$ мм), а пленочный приемник с помощью специального координатного устройства перемещался в поперечном направлении. При этом его чувствительный элемент оставался заподлицо со стенкой. В области частот, где выполнялось условие $\varphi_{tu}(0, 0, \xi_3, \omega) > 0.95$ при $\xi_3 = 0.2$ мм, функция $\varphi_{tu}(0, 0, \xi_3, \omega)$ отождествлялась с поперечным взаимным спектром пульсаций касательного напряжения на стенке. Результаты измерений в данном эксперименте ограничивались сверху частотой $f = 500$ Гц. Величина интервала между точками наблюдения в эксперименте менялась от 1 мм до 12 мм с шагом через 1 мм.

Такая же методика использовалась и при определении поперечной взаимной корреляции между спектральными составляющими турбулентных пульсаций давления и спектральными составляющими касательного напряжения на стенке $\varphi_{pt}(0, \xi_2, \omega)$. Однако в этом случае вместо пленочного термоанемометрического приемника использовался конденсаторный микрофон типа 4138 фирмы "Брюль и Кьер" без защитной сетки. Чувствительный элемент (мембрана) микрофона при его перемещении также оставался заподлицо со стенкой.

При измерениях определялись вещественные и мнимые части поперечных взаимных спектров с

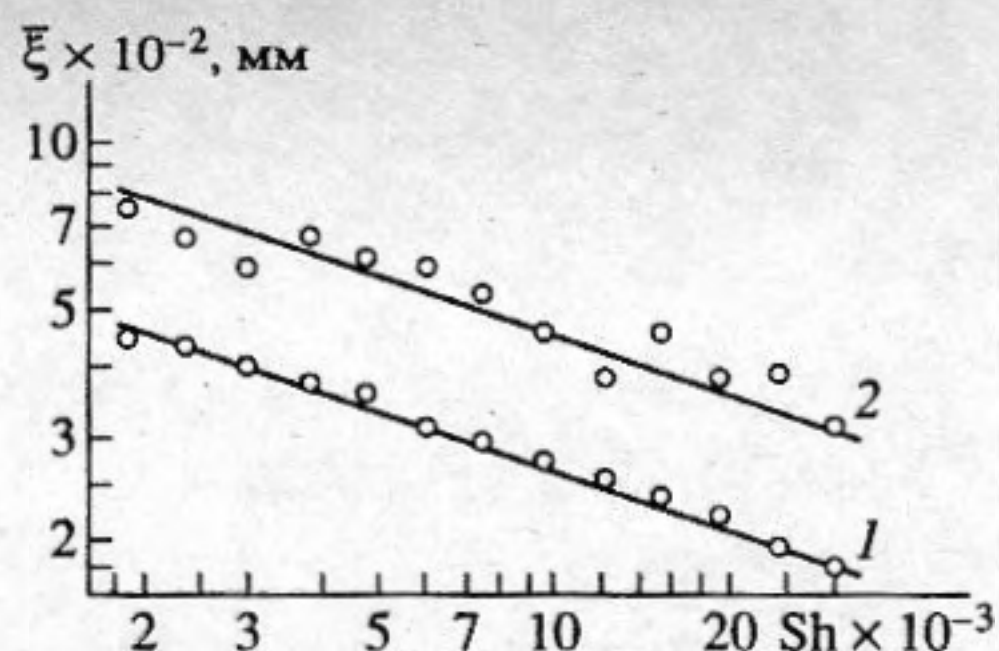


Рис. 2. Зависимость интервала между точками наблюдения, соответствующего нулю вещественной части поперечного взаимного спектра (1), и соответствующего наибольшей его отрицательной величине (2) от числа Струхала.

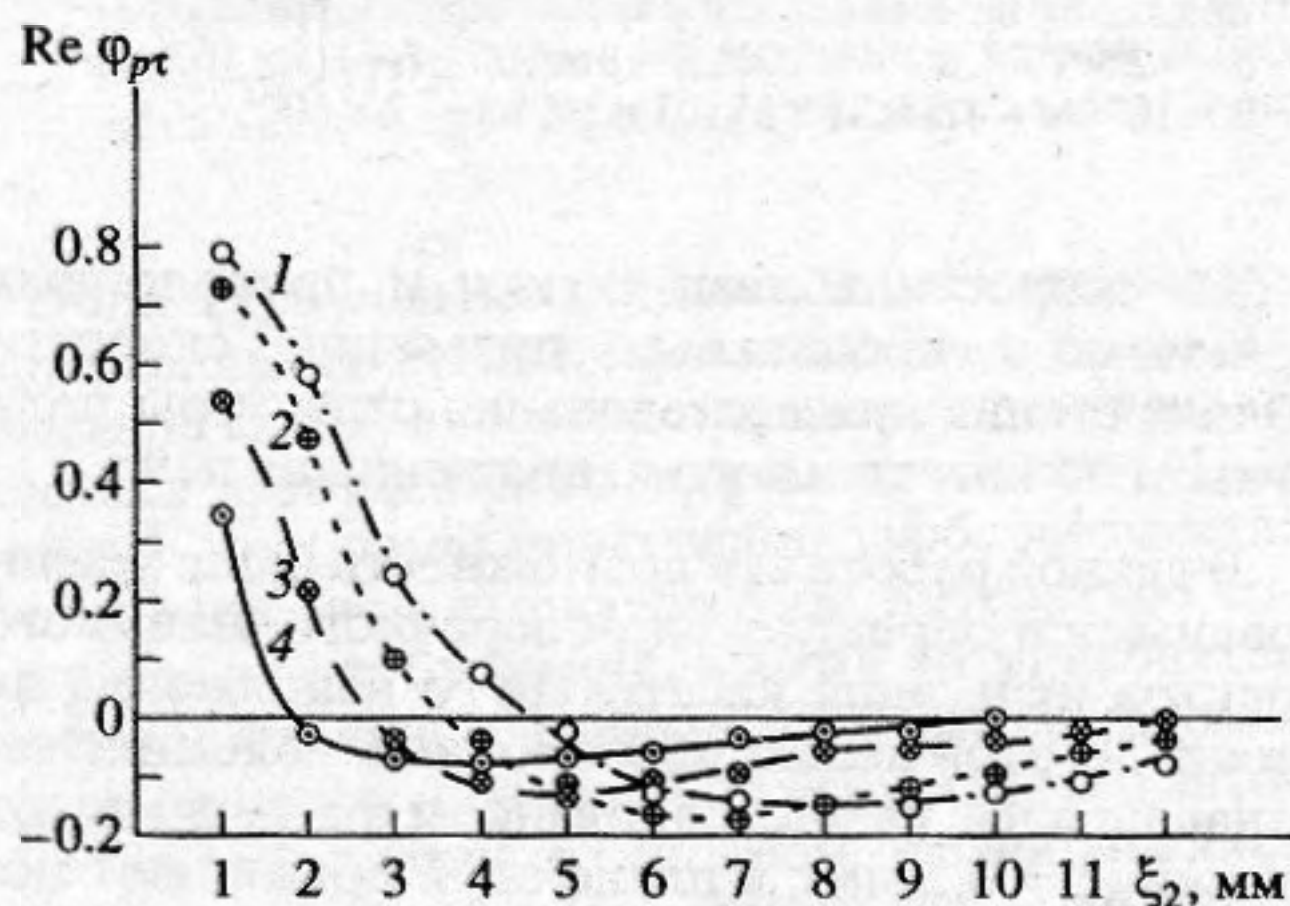


Рис. 3. Вещественная часть поперечного взаимного спектра (пристенных пульсаций давления – пульсаций касательного напряжения на стенке) для разных чисел Струхала: 1 – $Sh = 8 \times 10^{-3}$, 2 – 1.5×10^{-2} , 3 – 3×10^{-2} , 4 – 7×10^{-2} .

помощью анализатора типа 2032 фирмы “Брюль и Кьер”. При этом было установлено, что мнимые части поперечных взаимных спектров $\phi_r(0, \xi_2, \omega)$ и $\phi_{pt}(0, \xi_2, \omega)$ практически не отличались от нуля. Поведение вещественной части поперечного взаимного спектра турбулентных пульсаций касательного напряжения при разных числах Струхала иллюстрируется на рис. 1. Здесь используется число $Sh = \omega v_w / U_\tau^2$, составленное для характерного вязкого линейного масштаба v_w / U_τ , динамической скорости U_τ и круговой частоты ω . Как показано в работе [5], именно это число Струхала является основным критерием подобия спектров турбулентных пульсаций касательного напряжения на стенке. Кривая 1 на рис. 1 соответствует числу $Sh \approx 2 \times 10^{-3}$, 2 – $Sh \approx 4 \times 10^{-3}$, 3 – $Sh \approx 8 \times 10^{-3}$, 4 – $Sh \approx 1.5 \times 10^{-2}$, 5 – $Sh \approx 3 \times 10^{-2}$, 6 – $Sh \approx 7 \times 10^{-2}$. Заметим, что экспериментальные данные, соот-

ветствующие кривым 1–5, были получены при $U_0 = 30$ м/с, а кривой 6 – $U_0 = 20$ м/с.

Характерным для зависимости $Re \phi_r$ от интервала между точками наблюдения является изменение ее знака при разных значениях ξ_2 , зависящих от числа Sh . Именно эта особенность в поведении поперечных взаимных спектров не была обнаружена ранее [6]. По мере увеличения числа Струхала интервал между точками наблюдения, при котором вещественная часть поперечного взаимного спектра меняет свой знак, уменьшается. При этом меняется и величина ее отрицательного значения. Наибольшая отрицательная корреляция наблюдается в окрестности $Sh = 8 \times 10^{-3}$. Последующее увеличение числа Струхала приводит к вырождению отрицательной вещественной части поперечного взаимного спектра турбулентных пульсаций касательного напряжения на стенке.

Изменение знака вещественной части взаимного спектра случайного по пространству и времени поля при увеличении интервала между точками наблюдения, как правило, связано либо с его конвективными свойствами, либо с элементами пространственной организованности порождающих его структур в соответствующем направлении. Какой из этих двух механизмов является определяющим, можно установить по поведению мнимой части взаимного спектра. Если бы поле обладало конвективными свойствами, то мнимая часть его имела бы экстремум в окрестности нуля вещественной части на числовой оси интервала между точками наблюдения. На самом деле мнимая часть поперечного взаимного спектра турбулентных пульсаций касательного напряжения практически равна нулю как в окрестности нуля его вещественной части, так и при больших значениях интервала между точками наблюдения. На основании этого можно предположить, что наблюдаемая особенность в поведении поперечного взаимного спектра изучаемого поля связана с проявлением элементов организованности порождающих его структур в пристенной области.

Зависимость от числа Струхала безразмерного пространственного интервала $\bar{\xi}_2 = \xi_2 U_\tau / v_w$, при котором вещественная часть поперечного взаимного спектра меняет свой знак, иллюстрируется на рис. 2 экспериментальными точками в окрестности линии 1. Эта зависимость приближенно описывается показательной функцией $\bar{\xi}_2 \sim \sim Sh^{-0.335}$. Аналогичная зависимость, только с большим разбросом экспериментальных точек, получается и для безразмерного интервала между точками наблюдения, при котором наблюдаются наибольшие отрицательные значения корреляции спектральных составляющих турбулентных пульсаций касательного напряжения (линия 2 на рис. 2). Относительно большой разброс экспери-

ментальных точек в этом случае обусловлен погрешностями определения положения экстремумов из-за малых градиентов в их окрестности.

Подобные особенности наблюдаются и в пространственной корреляции между спектральными составляющими пристенных турбулентных пульсаций давления и спектральными составляющими пульсаций касательного напряжения на стенке. Это иллюстрируется на рис. 3, где представлена зависимость функции $\varphi_{pt}(0, \xi_2, \omega)$ от поперечного интервала между точками наблюдения при разных числах Струхала. Кривая 1 на рис. 3 соответствует числу $Sh \approx 8 \times 10^{-3}$, 2 – $Sh \approx 1.5 \times 10^{-2}$, 3 – $Sh \approx 3 \times 10^{-2}$, 4 – $Sh \approx 7 \times 10^{-2}$.

Экспериментальный материал, представленный на рис. 3, свидетельствует о сильной связи пристенных турбулентных пульсаций давления с турбулентными пульсациями касательного напряжения на стенке в области малых чисел Струхала. Этот факт, как и описанные особенности в поведении поперечных взаимных спектров, следует учитывать при исследовании акустического излучения пристенной турбулентности и возбуждаемыми ею упругими системами. Описанные здесь результаты экспериментальных исследований могут представить интерес и с более общих позиций (с точки зрения изучения природы пристенной турбулентности), в частности, для идентификации организованных структур.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 95-02-04479-а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chase D.M. Fluctuations in wall-shear stress and pressure at low streamwise wavenumbers in turbulent boundary – layer flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 1991, 225, 545–555.
2. Bull M.K. Wall-pressure fluctuations beneath turbulent boundary layers: some reflections of forty years of research. *Journal of sound and vibration*, 1996, 190(3), 299–315.
3. Экспериментальное изучение структуры полей пристеночных пульсаций турбулентного пограничного слоя. М.: ЦАГИ. Обзор № 579, 1980. 170 с.
4. Ефимцов Б.М., Кузнецов В.Б. Пульсации касательного напряжения на поверхности пластины // *Акустика турбулентных потоков*. М.: Наука, 1983. С. 46–53.
5. Ефимцов Б.М., Кузнецов В.Б., Сысоев В.А. Турбулентные пульсации касательного напряжения на стенке // *Ученые записки ЦАГИ*. 1983. Т. 14. № 2. С. 67–76.
6. Ефимцов Б.М., Кузнецов В.Б., Сысоев В.А. Взаимные спектры пульсаций касательного напряжения на стенке канала // *X Всесоюз. акуст. конф., секция Ж. М.*: Изд. Акуст. ин-та, 1983. С. 41–44.
7. Ефимцов Б.М., Кузнецов В.Б. О пространственно-временной структуре поля турбулентных пульсаций касательного напряжения на стенке // *Проблемы нелинейной акустики, II часть*. Новосибирск: СО АН СССР, 1987. С. 126–128.

Transverse Correlation of Turbulent Pulsations of the Tangential Stress on a Wall

B. M. Efimtsov and V. A. Sysoev

An experimental study of the spatial correlation of spectral components of the tangential stress on a wall and the cross-correlation of these components with adjacent turbulent pressure fluctuations is presented. In transverse cross-correlation spectra, specific properties associated with ordered structures that occur in an adjacent turbulence are revealed. At small Strouhal numbers, strong cross-correlation between pressure fluctuations and the tangential stress on the wall is found.