

УДК 534.222

КРИТЕРИИ ПОДОБИЯ СПЕКТРОВ ПРИСТЕНОЧНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ ТУРБУЛЕНТНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ¹*Ефимцов Б. М.*

Приведены результаты обобщения обширного экспериментального материала, полученного при измерениях пристеночных пульсаций давления безградиентного турбулентного пограничного слоя на самолетах и в аэродинамических трубах.

В отечественной и иностранной литературе содержится много публикаций, посвященных экспериментальному изучению спектров пристеночных пульсаций давления турбулентного пограничного слоя. Однако полученный разными авторами экспериментальный материал в той или иной мере отражает не только истинные свойства поля, но и условия проведения экспериментов, особенности методики измерений. По-видимому, по этой причине не увенчались успехом неоднократные попытки получить универсальные зависимости спектров пульсаций давления от осредненных аэродинамических параметров пограничного слоя на основе экспериментальных данных разных авторов.

Здесь приводятся обширные сведения о спектрах пристеночных пульсаций давления турбулентного пограничного слоя в широком диапазоне изменения чисел Маха ($M=0,015-4$), Рейнольдса ($Re=6 \cdot 10^2-1,5 \cdot 10^5$) и Струхалья ($Sh=0,2-10^4$), полученные с использованием единой методики измерений и приемников с высокой пространственной разрешающей способностью. При этом была поставлена серия экспериментов на ряде самолетов и аэродинамических труб в зонах с развитым турбулентным пограничным слоем при нулевом градиенте среднего давления [1-4]. Методические вопросы, которые могут представить интерес для специалистов, достаточно подробно освещены в указанных публикациях. Ниже приводятся только результаты обобщения полученного экспериментального материала на основе статистических методов анализа случайных процессов и теории подобия.

Анализ результатов исследований позволил выявить два основных критерия подобия спектров пристеночных турбулентных пульсаций давления: число $Sh=\omega\delta/U_\tau$ и число $Re=\delta U_\tau/\nu_w$. Здесь δ — толщина пограничного слоя, $U_\tau=(\tau_w/\rho_w)^{1/2}$ — динамическая скорость, τ_w — осредненное местное напряжение трения на обтекаемой поверхности, ρ_w и ν_w — соответственно плотность и коэффициент кинематической вязкости газа для температурных условий непосредственно у стенки. Влияние числа M в диапазоне его изменения $0,015 \dots 4,0$ проявляется в спектрах в основном только через осредненные пристеночные параметры турбулентного пограничного слоя (τ_w, ρ_w, ν_w).

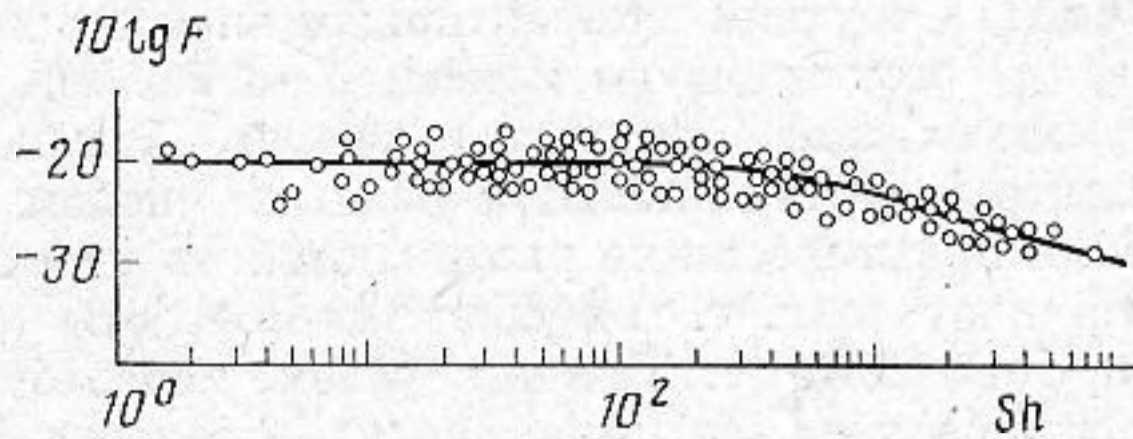
Эффект числа Re проявляется в спектрах пульсаций давления непосредственно, причем различно в зависимости от того, больше или меньше Re его характерной величины $Re_0=3 \cdot 10^3$. При $Re \gg Re_0$ в области $Sh \ll 1,3Re^{1/2}$ безразмерная спектральная плотность пульсаций давления $F=\Phi(\omega)/U_\tau^3 \rho_w^2 \delta$ характеризуется практически независящей от числа Sh величиной при малых его значениях и спадом $\sim Sh^{-2/3}$ по мере увеличения числа Sh (фиг. 1). Переход от зависимости $F \sim Sh^0$ к зависимости $F \sim Sh^{-2/3}$ наблюдается в окрестности числа Sh , определяемого из условия $8\alpha^3 Sh^2=1$, где $\alpha=0,01$. В этом случае безразмерная спектральная плотность пристеночных турбулентных пульсаций давления практически не зависит от

¹ Материалы были представлены на II Всесоюзном симпозиуме по физике акустико-гидродинамических явлений и оптоакустике. Суздаль Владимирской обл., 3-7 декабря 1979 г.

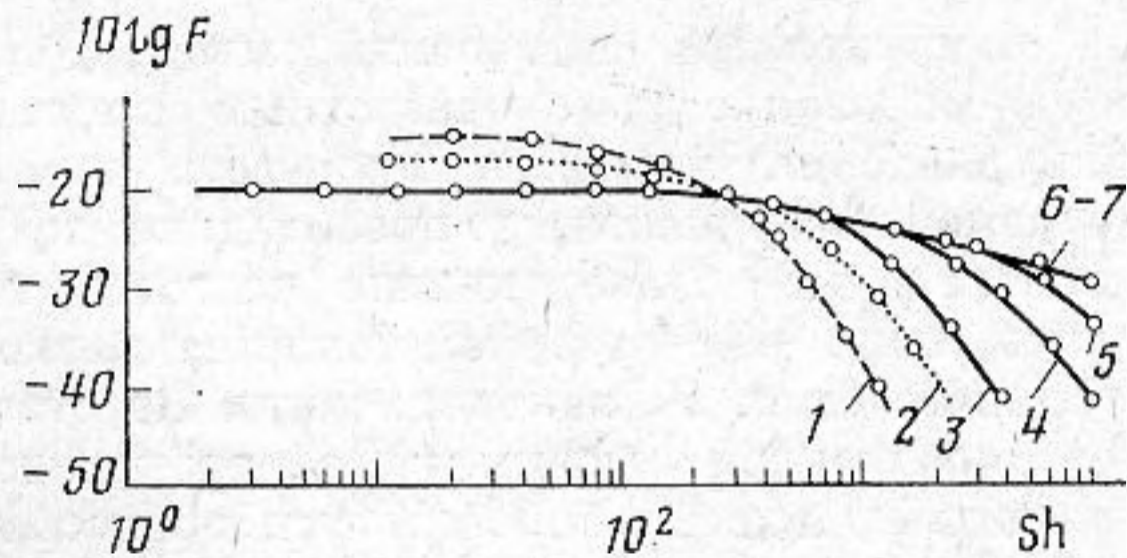
числа Рейнольдса и может быть представлена в виде функции одного параметра

$$F = \alpha (1 + 8\alpha^3 \text{Sh}^2)^{-1/3}. \quad (1)$$

Однопараметрическая форма представления (1) не может быть распространена на всю область чисел Sh . В противном случае не существовал бы интеграл, определяющий среднеквадратичное значение пульсаций дав-



Фиг. 1. Безразмерная спектральная плотность пристеночных пульсаций давления турбулентного пограничного слоя при $\text{Re} \gg 3 \cdot 10^3$, $\text{Sh} \ll 1,3 \cdot \text{Re}^{1/3}$



Фиг. 2. Безразмерная спектральная плотность пристеночных турбулентных пульсаций давления в виде F при различных числах Re : 1 — $\text{Re} = 6,7 \cdot 10^2$, $d/\delta = 0,055$, $dU_\tau/\nu = 37$; 2 — $\text{Re} = 1,32 \cdot 10^3$, $d/\delta = 0,0515$, $dU_\tau/U = 68$; 3 — $\text{Re} = 2,66 \cdot 10^3$, $d/\delta = 0,045$, $dU_\tau/\nu = 128$; 4 — $\text{Re} = 6,57 \cdot 10^3$, $d/\delta = 0,035$, $dU_\tau/\nu = 230$; 5 — $\text{Re} = 1,24 \cdot 10^4$, $d/\delta = 0,044$, $dU_\tau/\nu = 545$; 6 — $\text{Re} = 4,4 \cdot 10^4$, $d/\delta = 0,008$, $dU_\tau/\nu = 352$; 7 — $\text{Re} = 1,05 \cdot 10^5$, $d/\delta = 0,008$, $dU_\tau/\nu = 840$

ления. Действительно, последующее увеличение числа Sh сопровождается более резким спадом спектральной плотности, так как в окрестности $\text{Sh} = 1,3 \text{Re}^{1/3}$ осуществляется переход к зависимости $F \sim \text{Sh}^{-10/3}$. Это иллюстрируется зависимостями, приведенными на фиг. 2. Для всей области определения чисел Sh при $\text{Re} \gg \text{Re}_0$ безразмерную спектральную плотность пристеночных пульсаций давления турбулентного пограничного слоя можно представить в виде

$$F = \alpha [(1 + 8\alpha^3 \text{Sh}^2)^{1/3} + \alpha \text{Re} (\text{Sh}/\text{Re})^{10/3}]^{-1}. \quad (2)$$

Форма представления спектров (1) является частным случаем двухпараметрического представления (2). Из анализа выражения (2) непосредственно следует, что при $\text{Re} \gg \text{Re}_0$ эффект числа Re в основном проявляется в изменении протяженности области чисел Sh со слабым спадом спектральной плотности. Следствием этого является увеличение отношения среднеквадратичного значения пульсаций давления к напряжению трения τ_w по мере роста Re_τ .

По мере уменьшения Re и приближения его к Re_0 область чисел Sh со слабым спадом спектральной плотности вырождается. Однако величина F на участке с зависимостью $F \sim \text{Sh}^0$ (при малых числах Sh) при этом практически не меняется. Последующее уменьшение приводит к росту величины F в области малых чисел Sh , так что при $\text{Re} \ll \text{Re}_0$ она становится пропорциональной Re^{-1} . Поведение спектров в области $\text{Re} \ll \text{Re}_0$ можно описать функцией

$$F = \alpha \text{Re}_0 \text{Re}^{-1} [1 + \alpha \text{Re}_0 (\text{Sh}/\text{Re})^{10/3}]^{-1}. \quad (3)$$

Величина Re_0 , по существу, равна отношению толщины пограничного

слоя (инерционного линейного масштаба) к вязкому линейному масштабу v_w/U_τ турбулентного пограничного слоя. Поэтому из соотношения (3) непосредственно следует другая однопараметрическая форма представления спектров пульсаций давления при малых числах Re :

$$F_1 = \alpha Re_0 (1 + \alpha Re_0 Sh_1^{10/3})^{-1}, \quad (4)$$

где $F_1 = F \cdot Re = \Phi(\omega) / U_\tau^2 \rho_w^2 v_w$ — безразмерная спектральная плотность, $Sh_1 = \omega v_w / U_\tau^2$ — число Струхала с характерным вязким линейным масштабом. Выражению (4) соответствуют кривые 1–3 на фиг. 3, где представлены те же результаты измерений, что и на фиг. 2, только в виде функции $F_1(Sh_1)$. Спектры, относящиеся к разным числам Re , при таком виде представления практически не различаются на участке с резким спадом спектральной плотности, т. е. в области $Sh_1 \gg 1,3 Re^{7/8}$ или, что то же самое, в области $Sh_1 \gg 1,3 Re^{-1/8}$. Таким образом, использование характерного вязкого масштаба v_w/U_τ и динамической скорости U_τ в масштабах частоты и спектральной плотности позволяет корректно учесть влияние числа Рейнольдса на спектры пристеночных пульсаций давления турбулентного пограничного слоя при $Re < Re_0$ во всем охваченном при измерениях диапазоне чисел Струхала и при $Re \gg Re_0$ в области $Sh_1 \gg 1,3 Re^{-1/8}$. Это имеет вполне определенный физический смысл. Действительно, ответственными за формирование высокочастотных пристеночных турбулентных пульсаций давления являются процессы, протекающие непосредственно у обтекаемой поверхности, где преобладают эффекты вязкости. Они распространяются и на более низкие частоты по мере уменьшения Re , т. е. увеличения относительной толщины вязкого подслоя турбулентного пограничного слоя. И, наконец, когда Re становится существенно меньше его характерной величины Re_0 , практически весь спектр пристеночных пульсаций давления определяется процессами, связанными с эффектами вязкости.

При малых числах M область $Re \ll Re_0$ для развитого турбулентного течения весьма ограничена. По мере увеличения числа M эта область несколько расширяется, так как при этом увеличивается отношение толщины вязкого подслоя к толщине пограничного слоя. По этой причине описанный эффект числа Рейнольдса впервые был обнаружен при сверхзвуковых скоростях потоков [2].

На фиг. 4 иллюстрируется влияние числа Re на безразмерную спектральную плотность пристеночных турбулентных пульсаций давления в виде F_1 в области, где она практически не зависит от числа Струхала (F_0). Здесь представлены экспериментальные данные, охватывающие диапазон чисел Маха 0,015...4,0.

Из соотношений (2) и (3) получается универсальная двухпараметрическая форма представления безразмерной спектральной плотности пристеночных пульсаций давления турбулентного пограничного слоя:

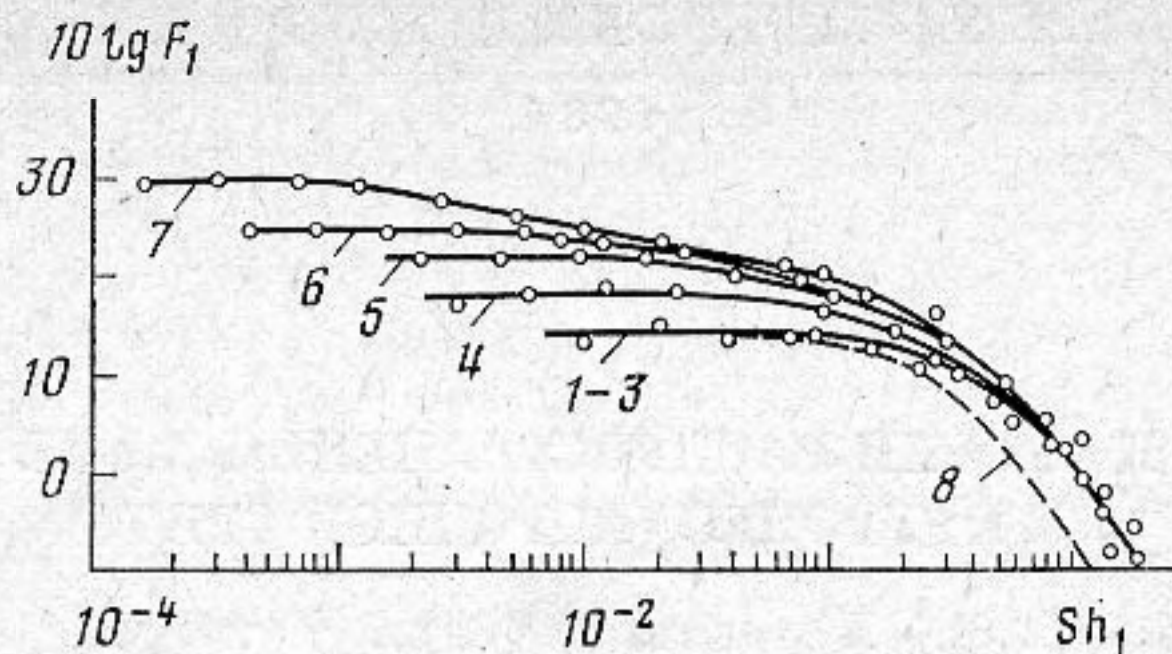
$$\bar{F} = \alpha \beta [(1 + 8\alpha^3 Sh^2)^{1/2} + \alpha \beta Re (Sh/Re)^{10/3}]^{-1}, \quad \beta = [1 + (Re_0/Re)^3]^{1/2}. \quad (5)$$

Отсюда следуют приближенные соотношения для оценки среднеквадратичного значения пристеночных пульсаций давления турбулентного пограничного слоя:

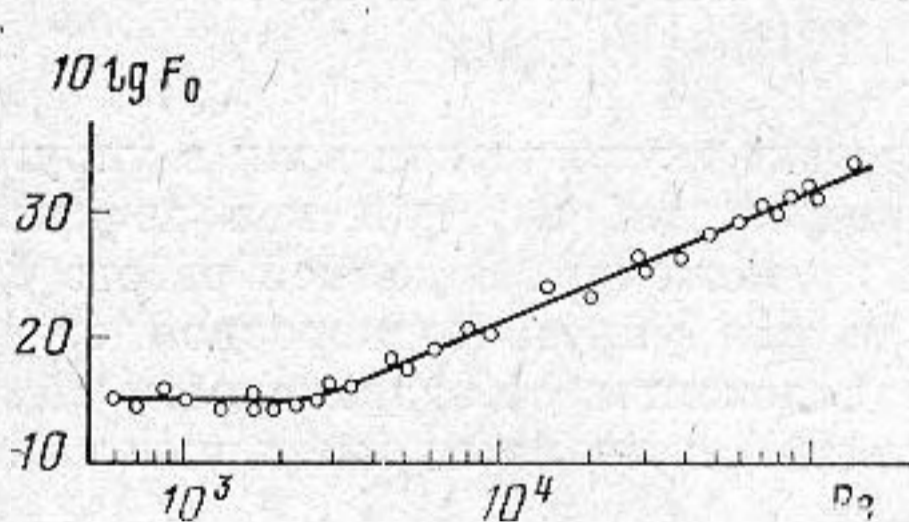
$$(\bar{q}^2)^{1/2} / \tau_w \approx \begin{cases} 3,47 & \text{при } Re \ll Re_0, \\ 1,25 Re^{1/7} & \text{при } Re \gg Re_0. \end{cases} \quad (6)$$

Зависимость $(\bar{q}^2)^{1/2} / \tau_w$ от числа Re иллюстрируется на фиг. 5. В большинстве практических случаев выполняется условие $Re \gg Re_0$. Более того, практически всегда выполняется условие $Sh \ll 1,3 Re^{7/8}$, когда речь идет о турбулентных пульсациях давления звукового диапазона частот на поверхности фюзеляжа самолета в районе пассажирского салона. Именно поэтому измеренные на поверхности фюзеляжа самолета спектры [1, 3] хорошо согласуются с рассчитанными по формуле (1).

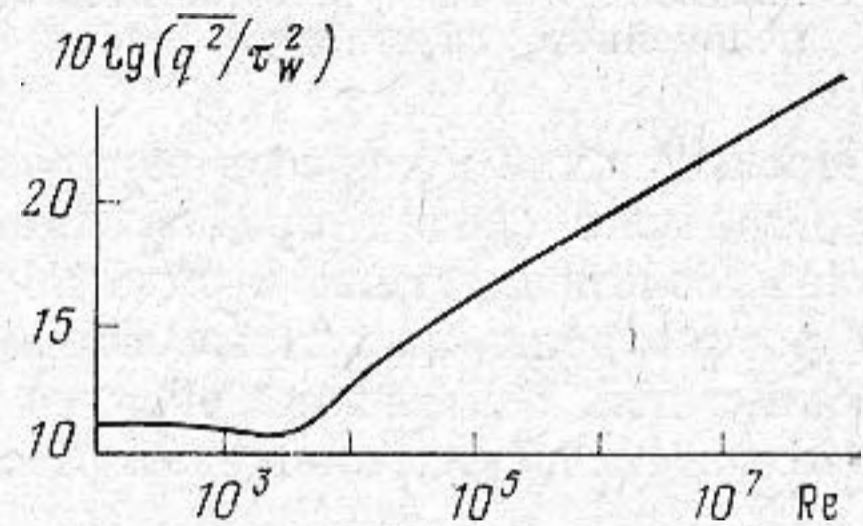
Следует заметить, что приведенные здесь результаты измерений на стенке аэродинамической трубы при $M \ll 1$ практически не отличаются от данных работы [5]. Хорошо они согласуются и с результатами измере-



Фиг. 3. Безразмерная спектральная плотность пристеночных турбулентных пульсаций давления в виде F_1 при разных числах Re : параметры кривых 1-7 те же, что и для фиг. 2; 8 — экспериментальные данные работы [6]



Фиг. 4. Влияние числа Re на безразмерную спектральную плотность пристеночных турбулентных пульсаций давления в виде F_1 на участке, где $F_1 = F_0 \sim Sh_1^0$



Фиг. 5. Влияние числа Re на безразмерное среднее квадратичное значение пристеночных турбулентных пульсаций давления

ний [6] в области малых чисел Струхаля. Однако на участке с резким спадом спектральной плотности наши экспериментальные точки лежат несколько выше (фиг. 3). Здесь, как и в работе [6], для измерений использовались приемники, устанавливаемые чувствительным элементом строго заподлицо с обтекаемой поверхностью, а в работе [5] — зондовый микрофон, который, как было убедительно показано [6], давал завышенные оценки спектральной плотности в области $\omega v/U_\tau^2 > 0,1$. Наблюдаемое различие наших данных и результатов работы [6] можно объяснить тем, что все представленные здесь спектры (1-7) были откорректированы на конечность размеров чувствительного элемента. При этом использовались непосредственно измеренные в условиях экспериментов пространственные масштабы корреляции спектральных составляющих и фазовая скорость. Правомочность использованного метода корректировки была подтверждена непосредственно на основе измерений пульсаций давления приемниками с разными размерами чувствительного элемента [1, 4]. Результаты работы [5] также представлены без корректировки, а приблизились они к нашим из-за усиления сигналов, связанного с нарушением непрерывности граничной поверхности зондом [6].

ЛИТЕРАТУРА

1. Ефимцов Б. М., Шубин С. Е. Вероятностные характеристики пульсаций давления турбулентного пограничного слоя на поверхности самолета. — Тр. ЦАГИ, 1975, вып. 1655, с. 3-14.
2. Ефимцов Б. М., Мозольков А. С. и др. Влияние числа Рейнольдса на спектры пристеночных пульсаций давления в турбулентном пограничном слое при сверхзвуковых скоростях потока. — Уч. зап. ЦАГИ, 1979, т. 10, № 1, с. 35-45.
3. Ефимцов Б. М., Ткачев А. А., Шубин С. Е. — Тр. ЦАГИ, 1982, вып. 2133, с. 19-26.
4. Ефимцов Б. М., Бибко В. Н. и др. — Тр. ЦАГИ, 1982, вып. 2157.
5. Blake W. K. Turbulent boundary layers wall pressure fluctuations on smooth and rough walls. — J. Fluid Mech., 1970, v. 44, p. 637-660.
6. Bull M. K., Thomas A. S. W. High frequency wall pressure fluctuations in turbulent boundary layers. — Phys. Fluids, 1976, v. 19, № 4, p. 597-599.

Поступила в редакцию
29.XI.1982