АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XXVI 1980 Вып. 5

УДК 534.26:534.121.1:532.526.533.694.71

О ВЛИЯНИИ ОТСОСА ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ НА СПЕКТР ИЗЛУЧЕНИЯ ТОНКОЙ ПЛАСТИНЫ, КОЛЕБЛЮЩЕЙСЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ

Р. А. Мхитаров

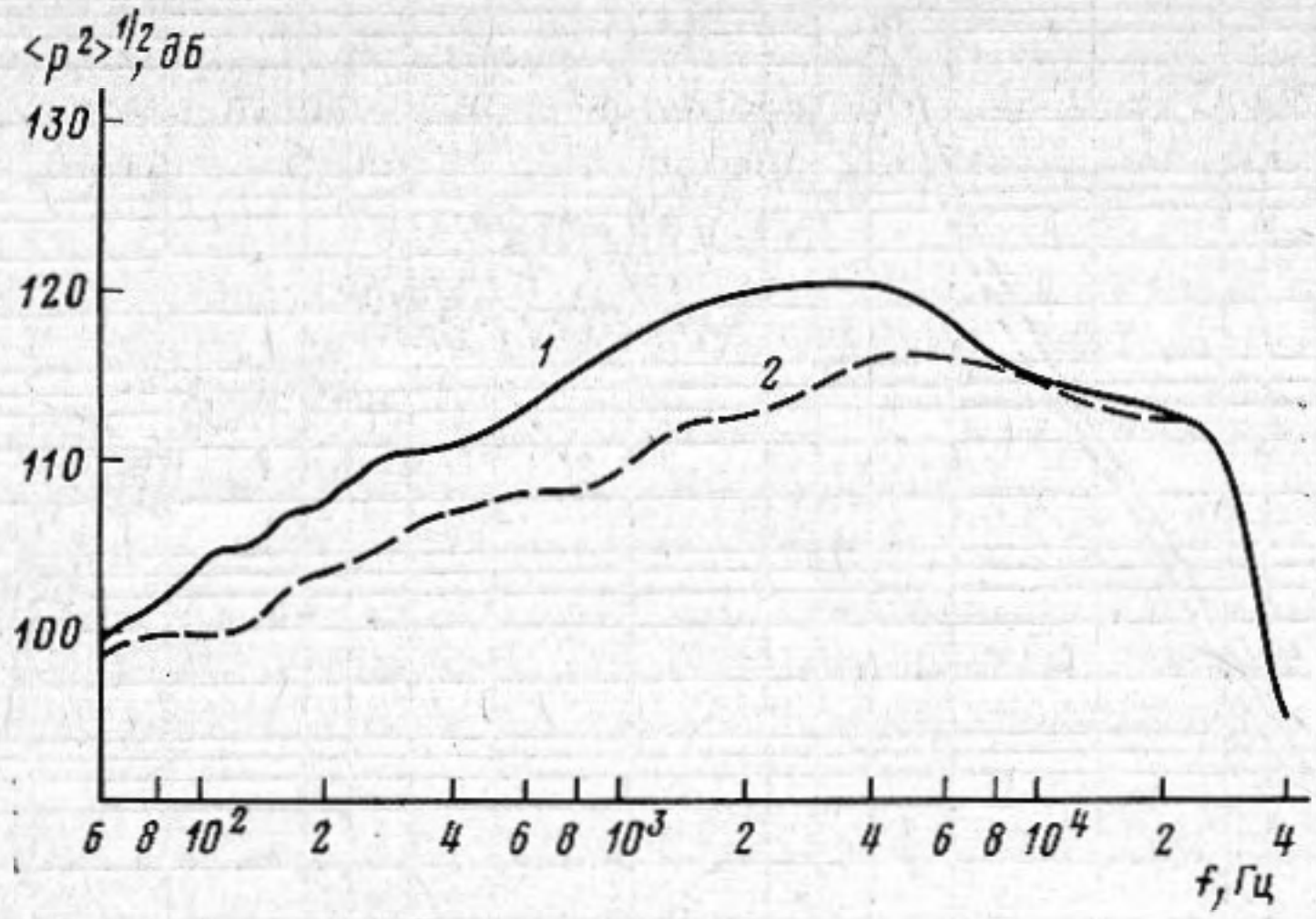
Рассчитан средний квадрат звукового давления тонкой прямоугольной пластины, колеблющейся под действием пульсаций давления в турбулентном пограничном слое при отсосе воздуха при числах $M_\infty=0{,}4$, $\mathrm{Re}_{\delta^*}=5\cdot10^4$ и интенсивности отсоса $C_Q=4{,}2\cdot10^{-3}$. Средний квадрат звукового давления при отсосе пограничного слоя уменьшается в области низких и средних частот по сравнению со случаем без отсасывания и возрастает в области высоких частот $\omega\delta^*/U_\infty>1$, где ω – круговая частота, δ^* – толщина вытеснения пограничного слоя, U_∞ – скорость набегающего потока.

Пристеночные пульсации давления в турбулентном пограничном слое на фюзеляже самолета являются мощным источником воздействия на обшивку самолета, определяющим уровень шума в салоне самолета. Кроме того, они предъявляют определенные требования к усталостной прочности конструкции. В качестве одного из способов снижения уровня пристеночных пульсаций давления применяется локальное отсасывание пограничного слоя. Отсос воздуха приводит к изменению характеристик поля пристеночных пульсаций давления, в частности к снижению величины среднеквадратичного уровня пульсаций давления. Это влечет за собой изменение спектрального состава излучения и снижение уровня шума в салоне самолета.

Рассмотрим влияние отсоса пограничного слоя на примере простейшей модели элемента фюзеляжа самолета – тонкой прямоугольной пластины шарнирно-опертой по контуру и заключенной в бесконечный плоский, жесткий экран. Предположим, что через мелкую перфорацию на поверхности экрана на некотором расстоянии от пластины производится локальный отсос пограничного слоя с площади, значительно превышающей размеры пластины. За счет отсасывания воздуха появляются дополнительные источники излучения, роль которых, как было показано в работе [1], незначительна по сравнению с излучением, связанным с пульсациями давления в пограничном слое. Поэтому при расчете спектральной плотности излучения мы пренебрежем влиянием этих дополнительных источников излучения, а также влиянием перфорации на проницаемость экрана и изменением параметров пограничного слоя по длине пластины.

Модель поля пульсаций давления при отсосе пограничного слоя заметным образом отличается от модели поля без отсоса. Согласно экспериментальным данным, при отсосе уменьшаются интенсивность пульсаций скорости и давления, толщина пограничного слоя, конвективная скорость потока и, напротив, возрастают значения коэффициентов затухания пульсаций давления в продольном и поперечном направлениях [2, 3].

На фиг. 1 показано изменение уровня пульсаций давления в $^1/_3$ октавных полосах частот при отсосе пограничного слоя при числах $\mathrm{M}_\infty=c/U_\infty=0{,}48$, $\mathrm{Re}_{\delta^*}=U_\infty\delta^*/\nu=5\cdot10^4$ и интенсивности отсоса $C_Q=Q/U_\infty S=4{,}2\cdot10^{-3}$,



Фиг. 1. Влияние отсоса пограничного слоя на среднеквадратичный уровень пульсаций давления в $^1/_3$ октавных полосах частот; *1* — без отсоса, *2* — с отсосом

где M_∞ — число Маха набегающего потока, Re_{δ^*} — число Рейнольдса, Q — расход объема воздуха при отсосе, U_∞ — скорость набегающего потока, c — скорость звука, S — площадь поверхности отсасывания, ν — кинематическая вязкость, δ^* — толщина вытеснения пограничного слоя.

Отсос пограничного слоя приводит к уменьшению уровня пульсаций давления в диапазоне низких и средних частот (100—5000 Гц) примерно на 4—6 дБ. Изменение характеристик пульсаций давления в пограничном слое и параметров самого пограничного слоя при отсосе воздуха приводит к изменению звукового излучения пластины, возбуждаемой пульсациями давления в пограничном слое.

Нами было определено после излучения во фраунгоферовой зоне шарнирно-опертой по контуру тонкой прямоугольной пластины, колеблющейся под действием пульсаций давления, в широком диапазоне соотношений между размерами пластины, длиной волны в жидкости и радиусом корреляции пульсаций давления [4]. Выражение для среднего квадрата звукового давления пластины на частоте ω имеет вид

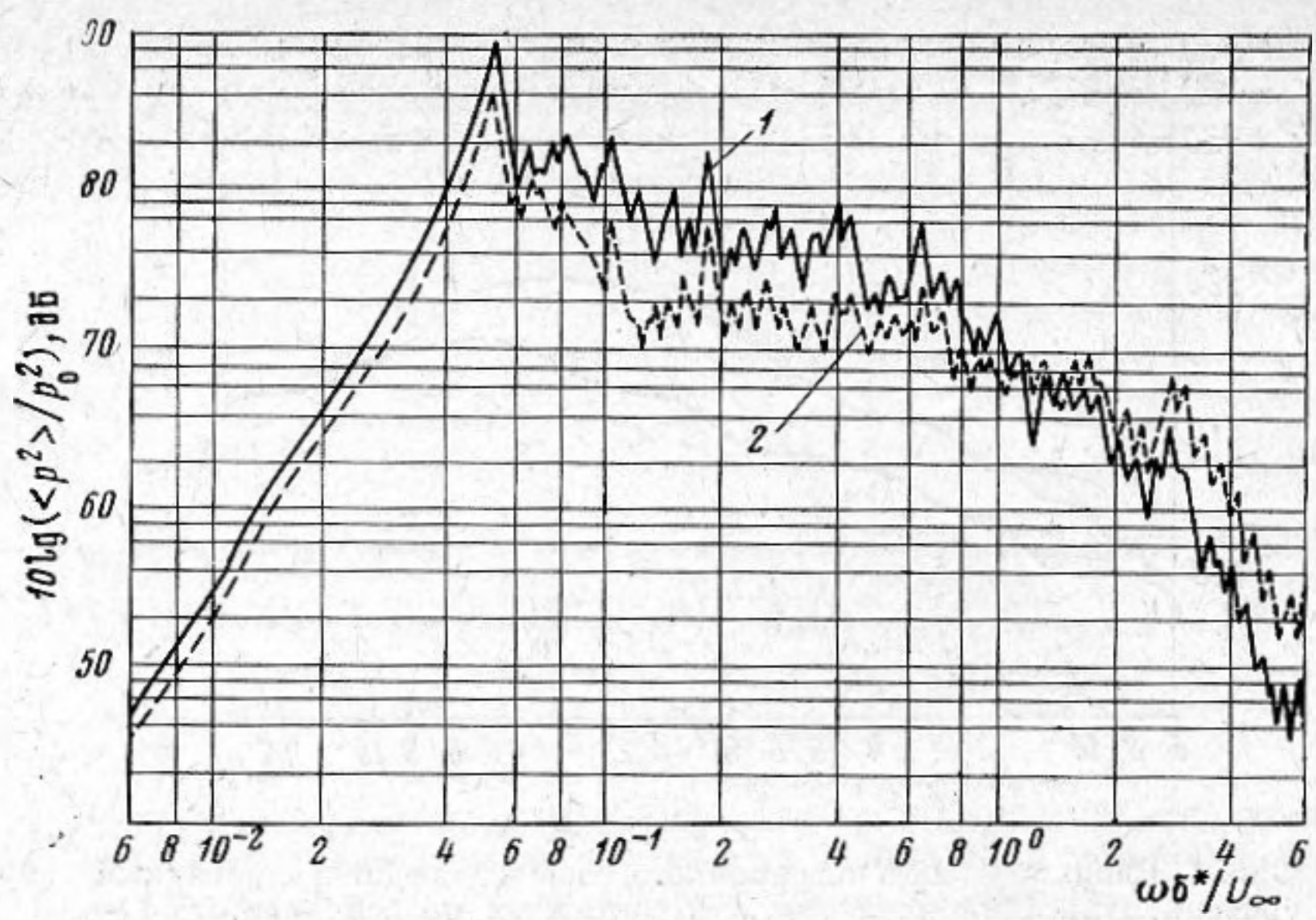
$$\langle p(x,y,z)p^*(x,y,z)\rangle = \frac{4\pi^2\rho^2\omega^2S^2}{R_0^2}\sum_{m=1}^{\infty}\sum_{n=1}^{\infty}\sum_{k=1}^{\infty}\sum_{j=1}^{\infty}\times \tag{1}$$

$$\times\frac{U_mU_k^*V_nV_j^*}{(Z_{mn}+Z_{mnmn})(Z^*_{kj}+Z^*_{kjkj})}\sum_{s=0}^{\infty}\sum_{r=0}^{\infty}(-1)^{s+r}\langle f_{mn}^{(s)}f_{kj}^{(r)*}\rangle,$$

где $$\langle f_{mn}^{(s)}f_{kj}^{(r)*}\rangle = \prod_{p=1}^{s}\prod_{q=1}^{r}\sum_{m_p=1}^{\infty}{}'\sum_{n_p=1}^{\infty}{}'\sum_{k_q=1}^{\infty}{}'\sum_{j_q=1}^{\infty}{}'\times$$

$$\times\frac{Z_{m_{p-1}n_{p-1}m_pn_p}Z^*_{k_{q-1}j_{q-1}k_qj_q}}{(Z_{m_pn_p}+Z_{m_pn_pm_pn_p})(Z^*_{k_qj_q}+Z^*_{k_qj_qk_qj_q})}\langle f_{m_sn_s}f^*_{k_rj_r}\rangle,$$

$m_0=m$, $n_0=n$, $k_0=k$, $j_0=j$, s, $r=0, 1, 2, \ldots$, m, n, k, $j=1, 2, 3, \ldots$, Z_{mn}, Z_{kj}, $Z_{m_pn_p}$, $Z_{k_qj_q}$ — импеданцы изгибных колебаний пластины, Z_{mnmn}, Z_{kjkj}, $Z_{m_{p-1}n_{p-1}m_pn_p}$, $Z_{k_{q-1}j_{q-1}k_qj_q}Z_{m_pn_pm_pn_p}$, $Z_{k_qj_qk_qj_q}$ — импеданцы излучения пластины,



Фиг. 2. Влияние отсоса пограничного слоя на спектр излучения тонкой пластины; *1* — без отсоса, *2* — с отсосом

U_m, U_k, V_n, V_j — функции, определяющие направленность излучения, $R_0=\sqrt{x^2+y^2+z^2}$ — расстояние от пластины до точки наблюдения, $S=a\times b$ — площадь пластины, ρ — плотность среды.

Корреляция коэффициентов разложения $\langle f_{m_s n_s} f^*_{k_r f_r}\rangle$ связана с корреляцией пульсаций давления $\langle p_w(x, y)\, p_w^*(\xi, \eta)\rangle$ соотношением

$$\langle f_{mn} f_{kj}\rangle = (4/ab)^2 \int_0^a\int_0^b\int_0^a\int_0^b \langle p_w(x, y)\, p_w^*(\xi, \eta)\rangle \times$$

$$\times \Psi_{mn}(x, y)\, \Psi_{kj}(\xi, \eta)\, dx dy d\xi d\eta,$$

где $\Psi_{mn}(x, y)$, $\Psi_{kj}(\xi, \eta)$ — собственные функции колебаний шарнирно-опёртой по краям пластины. В качестве корреляционной функции пристеночных пульсаций давления была принята следующая функция, удовлетворительно согласующаяся с экспериментом [5]:

$$\langle p_w(x, y)\, p_w^*(\xi, \eta)\rangle = \Phi(\omega) \exp\left(-\frac{C_1\omega}{U_c}|x-\xi| - \frac{C_2\omega}{U_c}|y-\eta|\right) \cos\left[\frac{\omega}{U_c}(x-\xi)\right], \tag{2}$$

где $\Phi(\omega)$ — частотный спектр пульсаций давления, U_c — конвективная скорость, C_1, C_2 — коэффициенты затухания пульсаций давления в продольном и поперечном направлениях относительно потока.

Подставляя в формулу (2) значения спектральной плотности пульсаций давления, рассчитанной по измеренным уровням в $^1/_3$ октавных полосах частот (фиг. 1), можно определить средний квадрат звукового давления пластины (1) при отсосе пограничного слоя и без отсасывания.

На фиг. 2 показаны частотные спектры излучения (в децибеллах по отношению к нулевому уровню $p_0=2\cdot10^{-5}$ Па) дюралюминиевой пластины размерами 22×18×0,2 см в точке наблюдения с координатами $R_0=5$ м, $\chi=\varphi=30°$ для случаев отсасывания воздуха и без отсоса, где χ — угол между направлением на точку наблюдения и плоскостью пластины, φ —

угол между проекцией этого направления на плоскость (x, y) и осью x. Расчет выполнен с помощью ЭЦВМ при следующих значениях параметров невозмущенного течения в пограничном слое: $\rho c=33$ г/см^{2}с, $\delta^*=0{,}4$ см, $U_c=0{,}8U_\infty$, $C_1=0{,}1$, $C_2=0{,}7$; для случая отсоса пограничного слоя было принято: $\delta^*=0{,}33$ см, $U_c=0{,}75U_\infty$, $C_1=0{,}15$.

Средний квадрат звукового давления при отсасывании пограничного слоя уменьшается в области низких и средних частот по сравнению со случаем без отсоса и, напротив, несколько возрастает в области высоких частот ($\omega\delta^*/U_\infty>1$, $f\geqslant5$ кГц). Уменьшение звукового давления при отсосе пограничного слоя в области низких и средних частот связано с эффектом снижения уровня пульсаций давления (фиг. 1), возрастание спектра излучения пластины на высоких частотах есть результат изменения осредненных (δ^*) и пульсационных (C_1, U_c) характеристик течения при отсосе пограничного слоя по сравнению со случаем без отсасывания.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Лямшев Л. М.* О шуме управляемого пограничного слоя. В сб. Морское приборостроение. Серия Акустика, 1972, 1, 126—137.
2. *Favre A. I., Gaviglio J. J., Dumas R.* Boundary layer above a porous airfoil with suction. Scient. Tech. Min. Air France, 1961, 377, 1—26.
3. *Лямшев Л. М., Салосина С. А., Шустиков А. Г.* Пульсации давления в турбулентном пограничном слое при дискретном отсасывании жидкости. Акуст. ж., 1974, *20*, 3, 435—442.
4. *Мхитаров Р. А.* Излучение звука прямоугольной пластиной, колеблющейся под действием пульсаций давления в турбулентном пограничном слое. Акуст. ж., 1973, *19*, 4, 580—587.
5. *Corcos G. M.* Resolution of pressure in turbulence. J. Acoust. Soc. America, 1963, *35*, 2, 192—199.

Поступила
5 ноября 1979 г.