

В.И. Токарев, В.Ф. Шило

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ОБОСНОВАНИЯ  
ЭФФЕКТИВНОСТИ АКУСТИЧЕСКИХ ЭКРАНОВ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ  
ВОЗДЕЙСТВИЯ ШУМА В ОКРЕСТНОСТИ АЭРОПОРТОВ**

*Приведены результаты разработки и исследования моделей и алгоритмов расчета эффективности экрана в условиях свободного поля. Модель учитывает: геометрические параметры экрана, эффекты отражения звуковых волн от подстилающей поверхности, поглощение акустических колебаний в атмосферном воздухе и в полосах зеленых насаждений. Показано, что эффективность экрана зависит от спектрального состава источников шума и импедансных характеристик подстилающей поверхности. Приведены также результаты исследования влияния температуры воздуха и скорости ветра на эффективность акустических экранов.*

Акустические экраны (АЭ) являются эффективным средством снижения воздействия шума транспортных источников как в рабочей зоне предприятия, так и на территории жилой застройки в его окрестности [1-5]. Акустические экраны применяют на основании анализа источников шума в районе аэропорта после учета или совместно с учетом остальных методов и средств уменьшения шума (строительно-планировочных, использования стационарных глушителей, рельефа местности, полос зеленых насаждений (ПЗН) и др.).

Акустические экраны устанавливаются между источником шума и точкой контроля. Их использование направлено на снижение уровней шума до требований норм СН 3077-84 [6], ГОСТ 12.1.003-76, СНиП 11-12-77 [7].

Выбор основных характеристик АЭ осуществляется на основании акустического расчета. Эффективность АЭ в исследуемой ситуации определяется зависимостью вида:

$$\Delta L_{\text{экp}} = L_{\text{до}} - L_{\text{после}}, \quad (1)$$

где  $L_{\text{до}}$ ,  $L_{\text{после}}$  – значение уровней звукового давления (УЗД) или уровней звука в контрольной точке до и после установки экрана.

Акустический расчет экранов для целей снижения шума в окрестности аэропорта учитывает следующие источники шума:

- воздушные суда на этапах руления, взлета и посадки;
- авиационные двигатели, их вспомогательные установки при запуске и опробовании;
- средства механизации и обслуживания воздушных судов;
- тепловые и ветровые машины и авиационные двигатели;
- транспортные средства на прилегающих к авиапредприятиям магистралях и другие.

Практика использования АЭ предусматривает рассмотрение их эффективности в условиях диффузного и свободного акустического поля. Оценка снижения УЗД с использованием АЭ для диффузного поля в помещениях осуществляется по методике СНиП 11-12-77 [7, разд. 7].

В статье исследованы модели и алгоритмы расчета эффективности экрана в условиях свободного поля. Модель разработана на основании результатов выполненных исследований, она учитывает: геометрические параметры экрана, эффекты отражения звуковых волн от подстилающей поверхности, поглощение акустических колебаний в атмосферном воздухе и в ПЗН.

Таким образом, УЗД шума в точке контроля до  $\Delta L_{до}$  и после  $\Delta L_{после}$  установки экрана рассчитывается по формулам:

$$\Delta L_{до} = \Delta L_R + \Delta L_{АТМ} + \Delta L_{ИНТ} + \Delta L_{ПЗН}; \quad (2)$$

$$\Delta L_{после} = \Delta L_R + \Delta L_{АТМ} + \Delta L_{ИНТ} + \Delta L_{ПЗН} + \Delta L_{ЭКР},$$

где  $\Delta L_R$  – затухание в результате сферического распространения звуковой волны (обратно пропорционально квадрату расстояния  $R$ );  $\Delta L_{АТМ}$  – поглощение звука атмосферным воздухом;  $\Delta L_{ИНТ}$  – изменение уровня звука в результате интерференции прямых и отраженных звуковых волн;  $\Delta L_{ПЗН}$  – поглощение звука ПЗН;  $\Delta L_{ЭКР}$  – снижение уровня звука экраном (дифракция звуковых волн).

Алгоритм полного расчета эффективности экрана реализован в программном комплексе ЕКРАНЛУХ (включает подпрограммы АЛФАТМ, ЛАТЕР, ВЕТ\_ИМР, ЕКРАН, ТРЕЕ и файлы баз данных параметров подстилающих поверхностей, характеристик источников шума, коэффициентов затухания шума в ПЗН, расчетных схем). Реализованный алгоритм оценки УЗД не учитывает возможности распространения шума через стенку экрана (не учитываются характеристики звукоизоляции конструкции экрана), т.е. принято допущение, что уровни поглощения звука конструкцией экрана, по крайней мере, на 10 дБ превышают эффективность экрана во всем диапазоне исследуемого спектра.

В соответствии с рассматриваемыми схемами построен алгоритм оценки основных путей распространения шума (обозначения приведены на рис. 1, 2):

$$|SP| = d = \sqrt{(X_p - X_s)^2 + (Y_p - Y_s)^2 + (Z_p - Z_s)^2}; \quad |SP'| = d = \sqrt{(X_p - X_s)^2 + (Y_p - Y_s)^2 + (Z_p - Z_s)^2};$$

$$|SO_1| = a = \sqrt{(X_s - X_e)^2 + (Y_s - Y_{2e})^2 + (Z_s - Z_{o1})^2}; \quad |PO_1| = b = \sqrt{(X_p - X_e)^2 + (Y_p - Y_{2e})^2 + (Z_p - Z_{o1})^2};$$

$$|SO_2| = \sqrt{(X_s - X_e)^2 + (Y_s - Y_{o2})^2 + (Z_s - Z_{2e})^2}; \quad |PO_2| = b = \sqrt{(X_p - X_{e1})^2 + (Y_p - Y_{o2})^2 + (Z_p - Z_{2e})^2};$$

$$|SO_3| = \sqrt{(X_s - X_e)^2 + (Y_s - Y_{o3})^2 + (Z_s - Z_{1e})^2}; \quad |PO_3| = \sqrt{(X_p - X_e)^2 + (Y_p - Y_{o3})^2 + (Z_p - Z_{1e})^2};$$

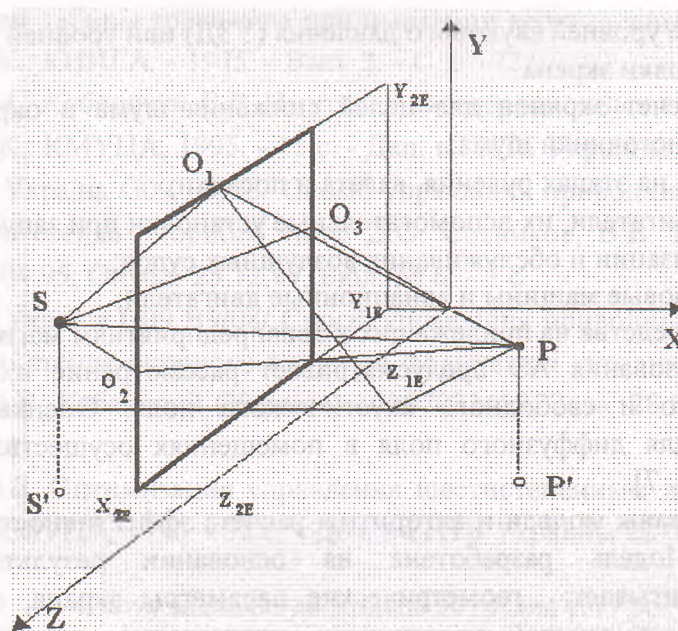


Рис. 1. Схема расчета эффективности тонкого акустического экрана

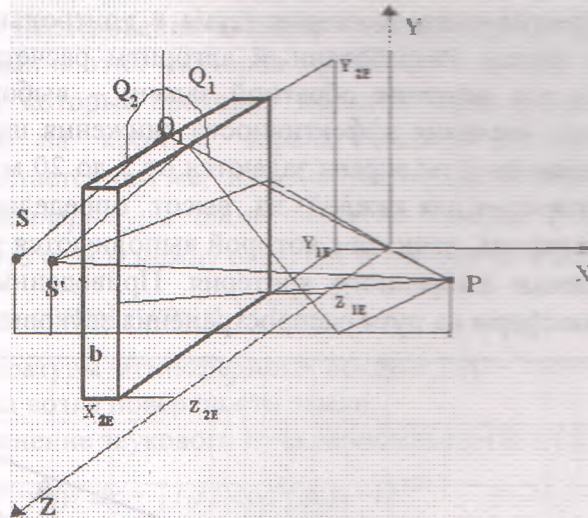


Рис. 2. Схема расчета эффективности экрана конечной толщины

где координаты точки пересечения визирной линии  $SP$  с экраном определяются так:

$X_e$  – задается как исходный параметр;

$$Y_e \frac{(X_e - X_s)(Y_e - Y_s)}{(X_p - X_s)} + Y_s; \quad Z_e \frac{(X_e - X_s)(Z_p - Z_s)}{(X_p - X_s)} + Z_s. \quad (4)$$

Добавочные условия пересечения визирной линии с экраном записываются в виде:

$$Y_{1e} \leq Y_e \leq Y_{2e}; \quad Z_{1e} \leq Z_e \leq Z_{2e}.$$

Эффективность АЭ, выраженная в  $\Delta L_A$ , зависит от спектрального состава источников шума, особенно при условии учета отражения звуковых волн от импедансной подстилающей поверхности. Спектры акустической эффективности экранов (рис. 3) получены для случая отсутствия отраженных звуковых волн 1, при абсолютном отражении (коэффициент отражения  $Q=1$ ) от подстилающей поверхности 2 и при отражении звуковых волн от импедансной поверхности 3. Как видно из рис. 3, при абсолютном отражении звуковых волн эффективность АЭ снижается во всех полосах спектра на 6 дБ. Для поверхности отражения с ограниченными значениями импеданса (спектр 3) характерно наличие в спектре частотных полос с пониженной и повышенной эффективностью АЭ в сравнении с эффективностью для свободного поля в отсутствие отражающих поверхностей. Например, приведенное в диапазоне 100 – 400 Гц снижение эффективности экрана будет крайне отрицательно сказываться на снижении шума авиадвигателей, особенно винтовых (основная гармоника которых как раз находится в данном диапазоне частот). Таким образом, выбором типа подстилающей поверхности перед и за экраном также можно регулировать значение эффективности АЭ. Например, на рис. 4 приведены спектральные значения эффективности экрана для анализируемой геометрии расчетной схемы при условии наличия следующих типов поверхностей до/после экрана: 1 – бетон/бетон; 2 – бетон/трава; 3 – свежеспаханный грунт/трава; 4 – песок пониженной влажности/трава. Пик эффективности на спектре 1 (рис. 4) можно настроить на частотную полосу расположения первой наиболее мощной гармоники винтового двигателя. Требуемый характер поверхности необязательно обеспечивать на всей протяженности удаления источника и приемника звука, а только в зонах предполагаемого отражения звуковых волн (локально реагирующая отражающая поверхность).

В практических расчетах средств защиты от шума авиационных источников необходимо выбирать высоту экрана и остальные его геометрические характеристики, включая координаты размещения на пути распространения звуковых волн, исходя из

требуемого значения эффективности снижения шума в контрольной точке (спектральной или в значениях уровня звука). Разработанный алгоритм расчета эффективности экрана может быть использован для решения обратной задачи – выбора параметров экрана в зависимости от требуемого значения эффективности снижения шума. Экран должен быть длинным и тонким, значения высоты экрана задаются от 5 до 20 м (итерации через 1 м). С помощью расчетного алгоритма для каждой из высот определяется эффективность АЭ. Выбирается такая высота экрана, начиная с которой выполняются требования по снижению шума на основании оценки выбранного критерия. Приведенный анализ соответствует условиям однородной атмосферы на пути распространения звуковых волн.

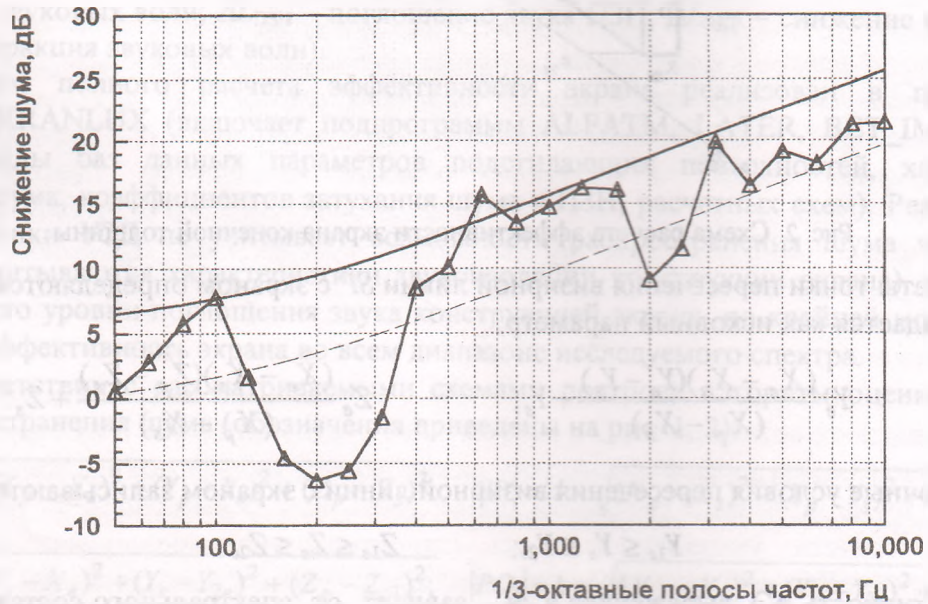


Рис. 3. Спектральная акустическая эффективность для трех типов поверхностей отражения звуковых волн: ———— — полное отражение; - - - - - отражение отсутствует; —△— — отражение от травяного покрова

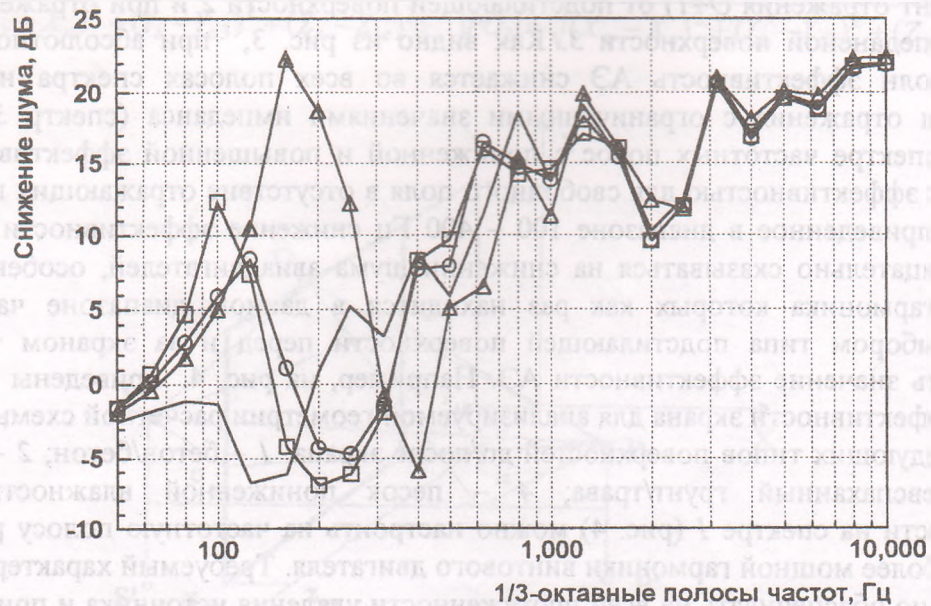


Рис. 4. Влияние характера покрова отражающей поверхности на спектральную эффективность экранов:

—△— — бетон/бетон; —◇— — бетон/трава; —□— — галька/трава; —○— — песок/трава

Выполнено также исследование влияния температуры воздуха и скорости ветра на эффективность АЭ. Влияние этих факторов проявляется в искривлении звуковых лучей и изменении расстояний, которые проходит звуковая волна от источника до приемника, с учетом ее дифракции на краях экрана. Таким образом, расчетный алгоритм эффективности экрана остается тем же, изменяются только длины звуковых лучей  $l$ .

При изменении температуры атмосферы по высоте (например, по закону  $T = T_0 - \gamma Y/100$  [8]) косинус угла  $\varphi$  между осью  $OX$  и нормалью к волне

$$\cos(\varphi) = \cos(\varphi_0) (T/T_0)^{1/2}, \quad (1)$$

где  $\gamma$  – градиент температуры атмосферного воздуха;  $\varphi_0$  – значение угла  $\varphi$  при  $Y = 0$ ;  $T_0$  – температура воздуха возле поверхности земли.

Из условия (1) уравнение звукового луча записывается в виде:

$$y' = dy/dx = [T_0/T \cos^2(\varphi_0) - 1]^{1/2}. \quad (2)$$

Для линейного закона изменения температуры с высотой уравнение (2) записывается в виде

$$(y' + 1)[T_0 \cos(\varphi_0) - \gamma y] = T_0, \quad (3)$$

где  $\gamma' = \cos(\varphi_0)\gamma/100$ . Введением нового параметра  $t$  ( $y' = \text{ctg}(t)$ ) уравнение (3) преобразуется к виду:

$$X + C = -T_0/\gamma' [t - \sin(2t)/2];$$

$$Y = T_0/\gamma' [\cos(\varphi_0) - \sin(t)],$$

где  $C$  – константа интегрирования.

Для расчета распространения звука из точки  $S$  в точку  $P$  имеем:

$$X_s + C = -T_0/\gamma' [t_1 - \sin(2t_1)/2];$$

$$Y_s = T_0/\gamma' [\cos(\varphi_0) - \sin(t_1)]; \quad (4)$$

$$X_p + C = -T_0/\gamma' [t_2 - \sin(2t_2)/2];$$

$$Y_s = T_0/\gamma' [\cos(\varphi_0) - \sin(t_2)].$$

Из системы уравнений (4) определяются четыре неизвестные константы  $\varphi_0$ ,  $C$ ,  $t_1$ ,  $t_2$ . Для оценки влияния температуры на распространение звука между точками  $S$  и  $P$  предположим:  $Y_s = Y_p$ . В этом случае из системы (4) имеем:  $(t_1 - t_2) = \pi$  и

$$\cos(\varphi_0) = [100\pi T_0/\gamma'(X_p - X_s)]^{1/2};$$

$$\cos(t_1) = [1 + 100\pi/(X_p - X_s) (Y_s - T_0/\gamma')]^{1/2}.$$

Длина пути, который проходит звуковой луч из точки  $S$  в точку  $P$ , равна  $l = 4T_0 \cos(t_1)/\gamma'$ . Из условия (4)  $(X_p - X_s) = \pi T_0/\gamma'$ , поэтому

$$(X_p - X_s)/S = \pi/4/\cos(t_1). \quad (5)$$

Соотношение (5) верно при

$$Y_s > [100T_0\pi - \gamma(X_p - X_s)]/100/\gamma/\pi = T_0 - (X_p - X_s)/100/\pi.$$

Как показал анализ приведенных соотношений, эффект изменения температуры атмосферы с высотой (в границах используемой модели) для высот экрана  $h < 20$  м и характерных расстояний между источником и приемником звука в окрестности (районе) аэропорта не проявляется.

Принимая изменение ветра по высоте по линейному закону  $v = \alpha_v Y$ , уравнение (2) для данного случая записывается в виде:

$$y' = dy/dx = \{[1/\cos(\varphi_0) - \alpha_v' Y] - 1\}^{1/2}, \quad (6)$$

где  $\alpha_{vz}' = \alpha_v/a$ ,  $a$  – скорость звука в атмосферном воздухе.

После ряда преобразований для уравнения (6) получим аналог системы соотношений (4) в виде:

$$X_s + C = 1/\alpha_v' \ln|\operatorname{tg}(t_1/2)|;$$

$$Y_s = 1/\alpha_v' [1/\cos(\varphi_0) - 1/\sin(t_1)];$$

$$X_p + C = 1/\alpha_v' \ln|\operatorname{tg}(t_2/2)|;$$

$$Y_p = 1/\alpha_v' [1/\cos(\varphi_0) - 1/\sin(t_2)].$$

В случае  $Y_s = Y_p$  решение задачи упрощается:  $t_1 + t_2 = \pi$  и

$$S = 2/\alpha_v' \operatorname{ctg}(t_1); \quad (X_p - X_s) = 2/\alpha_v' \ln|\operatorname{ctg}(t_1/2)|.$$

Для исходных данных вида  $(X_p - X_s) = 100$  м;  $\alpha_v = 0,1$ ;  $t_1 = 1,5854$ ;  $a = 341$  м/с получаем:  $(X_p - X_s)/S = 0,99995$  длины пути звукового луча без учета ветра и с учетом ветра практически не отличаются, поэтому не проявится влияние скорости ветра на эффективность экрана.

#### Список литературы

1. *ОСТ 54 72004 – 82*. Акустические экраны для защиты от шума на предприятиях ГА. – МГА, 1983. – 15 с.
2. *Справочник по защите от шума и вибрации жилых и общественных зданий* / Под ред. В.И. Заборова. – К.: Будівельник, 1989. – 160 с.
3. *Факторович А.А., Постников Г.И.* Защита городов от транспортного шума. – К.: Будівельник, 1982. – 160 с.
4. *Masaaki Arai, Yoshio Ban.* Noise control for Shinkansen railways // *Inter-Noise 75, Proceedings*, 1975. – P. 69–75.
5. *May D.N., Osmann M.M.* Highway noise barriers: new shapes // *JSV*. – Vol. 71. – № 1. – 1980. – P. 73–101.
6. *СН 3077–84*. Санитарные нормы допустимого шума в помещениях жилых и общественных зданий и на территории жилой застройки. – М.: Минздрав СССР, 1984. – 8 с.
7. *СНиП 11-12-77*. Часть II. Нормы проектирования. Глава 12. Защита от шума. – М.: Госстрой СССР, 1978. – 74 с.
8. *Блохинцев Д.И.* Акустика неоднородной движущейся среды. – М.: Наука, 1981. – 205 с.

Стаття надійшла до редакції 14 грудня 1999 року.