

УДК 534.1

# АКУСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ШУМОЗАЩИТНОГО БАРЬЕРА С КОЗЫРЬКОМ

Т. А. СОТНИКОВА

Институт гидромеханики НАН Украины, Киев

Получено 25.11.2009

Методом частичных областей решена задача о рассеянии звука на шумозащитном барьере с козырьком. Разработан алгоритм для вычисления звукового поля в освещенной, переходной и теневой зонах. Сравнительный анализ эффективности шумозащиты выявил преимущество барьера с козырьком по сравнению с классическим (в виде простой стенки). Разработаны практические рекомендации по применению рассмотренных типов барьеров.

Методом часткових областей розв'язано задачу про розсіяння звуку на шумозахисному бар'єрі з козырьком. Розроблено алгоритм для обчислення звукового поля в освітленій, перехідній і тінювій зонах. Порівняльний аналіз ефективності шумозахисту виявив перевагу бар'єру з козырьком у порівнянні з класичним (у вигляді простої стінки). Розроблені практичні рекомендації щодо застосування розглянутих типів бар'єрів.

A problem of sound scattering on the noise barrier with a deflector has been solved by the method of partial domains. An algorithm for calculation of the sound field in the illuminated, transitive and shadow zones has been developed. The comparative analysis of noise-suppression efficiencies has shown the advantage of the barrier with a deflector over the classical barrier. The recommendations for practical use of the considered types of barriers have been formulated.

## ВВЕДЕНИЕ

В работах [1, 2] были рассмотрены акустические свойства классического барьера в виде вертикальной жесткой стенки и разработаны критерии оценки эффективности его шумозащиты. В настоящее время наряду с классическим широко применяются барьеры с козырьком или Г-образные барьеры [3, 4], рис. 1.

К сожалению, автору неизвестны литературные источники, в которых содержались бы примеры теоретического расчета и соответствующего анализа акустических свойств Г-образных барьеров. Поэтому цель данной работы состоит в разработке физико-математической модели такого барьера и метода расчета его акустических характеристик, а также в их сравнении со свойствами классического барьера.

## 1. ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ БАРЬЕРА

Опираясь на те же подходы, что и в работах [1, 2], будем полагать, что идеализированная физическая модель исследуемого барьера имеет следующую структуру: поверхность земли представлена бесконечной акустически жесткой плоскостью, на которой в точке  $O$  установлен Г-образный барьер, состоящий из основной акустически жесткой стенки высотой  $r_h$  с углом наклона относительно земли  $\theta_0$ , и расположенного на верхней кромке барьера наклонного акустически жесткого козырька высотой  $d$  с углом наклона отно-

сительно земли  $\theta_1$  (рис. 2). При этом длина козырька в горизонтальном направлении составляет  $\pi r_h (\theta_0 - \theta_1) / 180^\circ$ .

Справа на расстоянии  $b$  от барьера и высоте  $g$  относительно поверхности земли поместим линейный гармонический источник звука в виде бесконечной пульсирующей нити, моделирующей звук, создаваемый транспортным потоком (он обозначен точкой  $S$ ). Сам барьер тоже имеет бесконечную протяженность вдоль оси  $z$ , направленной перпендикулярно плоскости рисунка. Все окружающее барьер полупространство заполнено воздухом, который смоделирован идеально сжимаемой средой с плотностью  $\rho$  и скоростью звука  $c$ . Точка наблюдения обозначена буквой  $P$ . Наша задача определить – звуковое поле, создаваемое источником как в освещенной области, так и в зоне геометрической тени за барьером.

Описанная физическая модель с точки зрения математики эквивалентна плоской задаче, когда звуковая волна не зависит от одной из координат (в нашем случае – от координаты  $z$ ). Искомое поле давления должно удовлетворять уравнению Гельмгольца. Заданные свойства поверхностей (акустически жесткие) означают, что нормальная составляющая колебательной скорости звукового поля на них равна нулю.

Принятая модель удобна тем, что позволяет построить строгое аналитическое решение для оценки поля давления при рассеянии звука на предложенной конструкции барьера. Ниже на основе оговоренных физических моделей барьера и источни-



Рис. 1. Примеры барьеров с козырьком

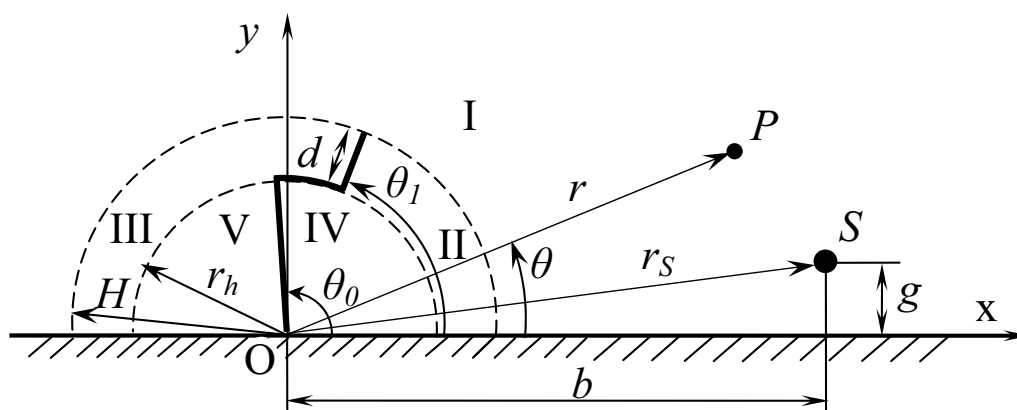


Рис. 2. Геометрия задачи

ка будут сформулированы соответствующие математические модели.

## 2. ПОСТРОЕНИЕ АНАЛИТИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Для построения решения поставленной задачи введем полярную систему координат  $(r, \theta)$  с центром в точке  $O$  (см. рис. 2). На акустически жестких поверхностях рассматриваемой модели должна равняться нулю нормальная производная от давления:

$$\frac{\partial p}{\partial n} \Big|_s = 0. \tag{1}$$

Здесь  $s$  – жесткие поверхности, а  $n$  – нормали к ним.

Решение задачи будем строить на базе метода

частичных областей [6], в соответствии с основной идеей которого все пространство существования звукового поля разобьем на пять областей.

Область I занимает внешность полукруга радиусом  $H = r_h + d$ , т. е. описывается координатами

$$r \geq H, \quad 0 \leq \theta \leq \pi$$

с граничными условиями на поверхности земли ( $y=0$ )

$$\frac{\partial \phi}{\partial \theta} = 0 \quad \text{при} \quad \theta = 0, \pi, \quad H \leq r \leq \infty. \tag{2}$$

Область II описывается координатами

$$r_h \leq r \leq H, \quad 0 \leq \theta \leq \theta_1.$$

Она ограничена правой поверхностью козырька с

одной стороны и землей перед барьером – с другой, что порождает граничное условие

$$\frac{\partial \phi}{\partial \theta} = 0 \quad \text{при} \quad \theta = 0, \theta_1, \quad r_h \leq r \leq H. \quad (3)$$

Область III расположена слева от козырька и ограничена координатами

$$r_h \leq r \leq H, \quad \theta_1 < \theta \leq \pi.$$

Ее граничные условия (на левой поверхности козырька с одной стороны и земли за барьером с другой) имеют вид

$$\frac{\partial \phi}{\partial \theta} = 0 \quad \text{при} \quad \theta = \theta_1, \pi, \quad r_h \leq r \leq H. \quad (4)$$

Области IV и V представляют собой смежные сектора внутри круга радиусом  $r_h$ . Так, область IV описывается координатами

$$r \leq r_h, \quad 0 \leq \theta \leq \theta_0.$$

Поскольку она ограничена землей и правой стенкой барьера, это порождает следующее граничное условие:

$$\frac{\partial \phi}{\partial \theta} = 0 \quad \text{при} \quad \theta = 0, \theta_0, \quad r < r_h. \quad (5)$$

Область V лежит между землей и левой стенкой барьера. Ее координаты

$$r < r_h, \quad \theta_0 < \theta \leq \pi.$$

Этой области принадлежат следующие граничные условия:

$$\frac{\partial \phi}{\partial \theta} = 0 \quad \text{при} \quad \theta = \theta_0, \pi, \quad 0 < r \leq r_h. \quad (6)$$

Описанное выделение частичных областей непосредственно связано со способом построения граничной задачи. Именно для таких областей удастся построить частные решения уравнения Гельмгольца. При этом решение исходной граничной задачи сводится к выполнению условий сопряжения на границах частичных областей.

В рассматриваемой задаче источник звука может располагаться в трех областях: I, когда  $r_s > H$ ; II, когда  $r_h < r_s < H$ ; IV, когда  $r_s < r_h$  (здесь, согласно рис. 2,  $r_s = \sqrt{b^2 + g^2}$ ). Для того чтобы записать звуковое поле, возбуждаемое источником в указанных областях, необходимо воспользоваться формулой для функции Грина внутри бесконечного клина с акустически жесткими границами [7]. Она связывает звуковое поле в

произвольной точке пространства  $(r, \theta)$  с ее положением относительно точки размещения источника  $(r_s, \theta_s)$ :

$$p_0 = G(\vec{r}, \vec{r}_s) = \frac{\pi i}{2\alpha} \sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon_n J_{\nu_n}(kr_{<}) \times H_{\nu_n}^{(1)}(kr_{>}) \cos(\nu_n \theta_s) \cos(\nu_n \theta), \quad (7)$$

$$\nu_n = \frac{n\pi}{\alpha},$$

где

$$\varepsilon_n = \begin{cases} 1, & n = 0, \\ 2, & n > 0; \end{cases}$$

$\alpha$  – угол раскрытия клина;  $r_{<}$  – меньшее из  $r$  и  $r_s$ ;  $r_{>}$  – большее из двух указанных расстояний.

Для случая, когда источник расположен в области I, угол раскрытия клина соответствует плоскости и составляет  $\pi$ . В таком случае выражение для излучаемого источником давления звукового поля  $p_{0I}$  в соответствии с формулой (7) примет вид

$$p_{0I} = \frac{i}{2} \begin{cases} \sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon_n J_n(kr) H_n^{(1)}(kr_s) \times \\ \quad \times \cos(n\theta_s) \cos(n\theta), & H < r < r_s, \\ \sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon_n J_n(kr_s) H_n^{(1)}(kr) \times \\ \quad \times \cos(n\theta_s) \cos(n\theta), & r > r_s. \end{cases} \quad (8)$$

Если источник расположен в области II, то угол раскрытия клина  $\alpha = \theta_1$ , что дает выражение для давления звукового поля источника

$$p_{0II} = \frac{\pi i}{2\theta_1} \begin{cases} \sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon_n J_{\nu_n}(kr) H_{\nu_n}^{(1)}(kr_s) \times \\ \quad \times \cos(\nu_n \theta_s) \cos(\nu_n \theta), & r_h < r < r_s, \\ \sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon_n J_{\nu_n}(kr_s) H_{\nu_n}^{(1)}(kr) \times \\ \quad \times \cos(\nu_n \theta_s) \cos(\nu_n \theta), & r_s < r < H, \end{cases} \quad (9)$$

$$\nu_n = \frac{n\pi}{\theta_1}.$$

Наконец, если источник звука расположен в области IV,  $\alpha = \theta_0$ , а давление звукового поля исто-

чника  $p_{0IV}$  записується як

$$p_{0IV} = \frac{\pi i}{2\theta_0} \begin{cases} \sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon_n J_{\nu_n}(kr) H_{\nu_n}^{(1)}(kr_s) \times \\ \times \cos(\nu_n \theta_s) \cos(\nu_n \theta), & r < r_s, \\ \sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon_n J_{\nu_n}(kr_s) H_{\nu_n}^{(1)}(kr) \times \\ \times \cos(\nu_n \theta_s) \cos(\nu_n \theta), & r_s < r < r_h, \end{cases} \quad (10)$$

$$\nu_n = \frac{n\pi}{\theta_0}.$$

Пусть для определенности  $r_s > H$ . Тогда звуковое поле в области I имеет вид

$$p_I = p_{0I} + \sum_{n=0}^{\infty} A_n \frac{H_n^{(1)}(kr)}{H_n^{(1)'}(kH)} \cos(n\theta), \quad (11)$$

где угловые функции  $\cos(n\theta)$  выбраны таким образом, чтобы автоматически удовлетворять граничным условиям на поверхности земли (2). Совокупность произвольных коэффициентов  $A_n$  позволяет выполнить условия сопряжения на границе с областями II и III.

Поле давления в области II представим в виде суперпозиции стоячих волн:

$$p_{II} = \sum_{n=0}^{\infty} \left( B_n \frac{J_{\alpha_n}(kr)}{J'_{\alpha_n}(kH)} + C_n \frac{N_{\alpha_n}(kr)}{N'_{\alpha_n}(kH)} \right) \times \cos(\alpha_n \theta), \quad (12)$$

$$\alpha_n = \frac{n\pi}{\theta_1}.$$

Здесь угловые функции  $\cos(\alpha_n \theta)$  выбраны согласно граничным условиям на жестких поверхностях земли и барьера (3) (при  $\theta = 0$  и  $\theta_1$ ). Последовательность коэффициентов  $B_n$  обеспечивает выполнение условий сопряжения на границе с областью I.

Аналогично, для областей III–V звуковые поля запишем следующим образом:

$$p_{III} = \sum_{n=0}^{\infty} \left( D_n \frac{J_{\beta_n}(kr)}{J'_{\beta_n}(kH)} + E_n \frac{N_{\beta_n}(kr)}{N'_{\beta_n}(kH)} \right) \times \cos(\beta_n(\theta - \theta_1)),$$

$$\beta_n = \frac{n\pi}{\pi - \theta_1}, \quad (13)$$

$$p_{IV} = \sum_{n=0}^{\infty} L_n \frac{J_{\gamma_n}(kr)}{J'_{\gamma_n}(kr_h)} \cos(\gamma_n \theta), \quad (14)$$

$$\gamma_n = \frac{n\pi}{\theta_0},$$

$$p_V = \sum_{n=0}^{\infty} K_n \frac{J_{\xi_n}(kr)}{J'_{\xi_n}(kr_h)} \cos(\xi_n(\theta - \theta_0)), \quad (15)$$

$$\xi_n = \frac{n\pi}{\pi - \theta_0}.$$

В выражениях (7)–(15) приняты стандартные обозначения для функций Бесселя, Ханкеля и Неймана.

Еще раз подчеркнем, что наличие в выражении (11) слагаемого  $p_{0I}$  указывает на то, что источник расположен в области I. Если источник будет находиться в областях II или IV, то источниковое слагаемое переместится в выражения (12) или (14) и будет иметь вид (8) либо (9) соответственно.

Сформируем систему функциональных уравнений, определяющую условия неразрывности звуковых полей на границах областей I, II, III, IV и V:

$$p_I = \begin{cases} p_{II}, & \theta = [0, \theta_1], \\ p_{III}, & \theta = [\theta_1, \pi], \end{cases} \quad r = H, \quad (16)$$

$$-\frac{\partial p_I}{\partial r} = -\frac{\partial p_{II}}{\partial r}, \quad r = H, \quad \theta = [0, \theta_1], \quad (17)$$

$$-\frac{\partial p_I}{\partial r} = -\frac{\partial p_{III}}{\partial r}, \quad r = H, \quad \theta = [\theta_1, \pi], \quad (18)$$

$$p_{II} = p_{IV}, \quad r = r_h, \quad \theta = [0, \theta_1], \quad (19)$$

$$-\frac{\partial p_{II}}{\partial r} = -\frac{\partial p_{IV}}{\partial r}, \quad r = r_h, \quad \theta = [0, \theta_0], \quad (20)$$

$$p_{III} = p_V, \quad r = r_h, \quad \theta = [\theta_0, \pi], \quad (21)$$

$$-\frac{\partial p_{III}}{\partial r} = -\frac{\partial p_V}{\partial r}, \quad r = r_h, \quad \theta = [\theta_1, \pi]. \quad (22)$$

Подставив выражения (11)–(15) в условия сопряжения (16)–(22), получим систему функциональных уравнений, алгебраизация которых на основе использования свойств ортогональности соответствующих наборов угловых функций даст бесконечную систему линейных алгебраических уравнений второго рода относительно неизвестных коэффициентов  $A_n, B_n, C_n, D_n, E_n, L_n$  и  $K_n$ .

Вычисление указанных коэффициентов и их подстановка в выражения (11)–(15), позволяет рассчитать характеристики акустического поля с наперед заданной точностью [1] в любой точке пространства вокруг барьера с козырьком, установленного на поверхности земли.

### 3. АНАЛИЗ ЧИСЛЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ общего пространственного распределения звуковых полей давления был проведен для двух типов Г-образных барьеров: для случая, когда козырек имеет простую форму при  $d=0$  (см. рис. 3, б) и для случая, когда козырек состоит из двух частей (см. рис. 3, в). Общий характер распределений звуковых полей в окрестностях указанных барьеров в целом аналогичен полевой картине вокруг классического барьера [1], поэтому здесь они не приводятся.

Основное внимание уделим анализу интегральных акустических характеристик шумозащитных барьеров. Целесообразность их применения при оценке эффективности барьеров обсуждалась в статье [5]. Напомним, что речь идет о двух величинах: коэффициенте прохождения акустической энергии в зону тени  $G=W_D/W_0$  (где  $W_0$  – полная энергия, излучаемая источником звука в присутствии барьера, а  $W_D$  – энергия звукового поля, проникающего в зону тени), и его усредненном значении в некотором частотном диапазоне  $\Psi(f_1-f_2)$  (где  $f_1$  и  $f_2$  – начальная и конечная частоты диапазона соответственно). Напомним, что величина  $W_D$  вычисляется как интеграл от интенсивности звукового поля по дуге  $l$ , которая расположена в зоне тени и ограничена с одной стороны поверхностью земли, а с другой – границей геометрической тени  $t$ , проходящей от источника через кромку барьера (см. рис. 3). Следует отметить, что для корректного сравнительного анализа указанных характеристик барьеров необходимо, чтобы длина дуги интегрирования была одинакова для всех исследуемых случаев.

Мы рассматриваем три конфигурации барьеров: классический барьер (рис. 3, а), Г-образный барьер с козырьком простой формы при  $d=0$  (рис. 3, б) и Г-образный барьер с составным козырьком (рис. 3, в). Поскольку даже при одинаковой максимальной высоте перечисленных барьеров их верхние кромки занимают различное положение в пространстве, линия границы геометрической тени  $t$  для каждого из них проходит под своим углом к горизонтالي, а значит и угол  $\varphi$ , и дуга интегрирования  $l$ , которая на него опирается, будут иметь разную величину.

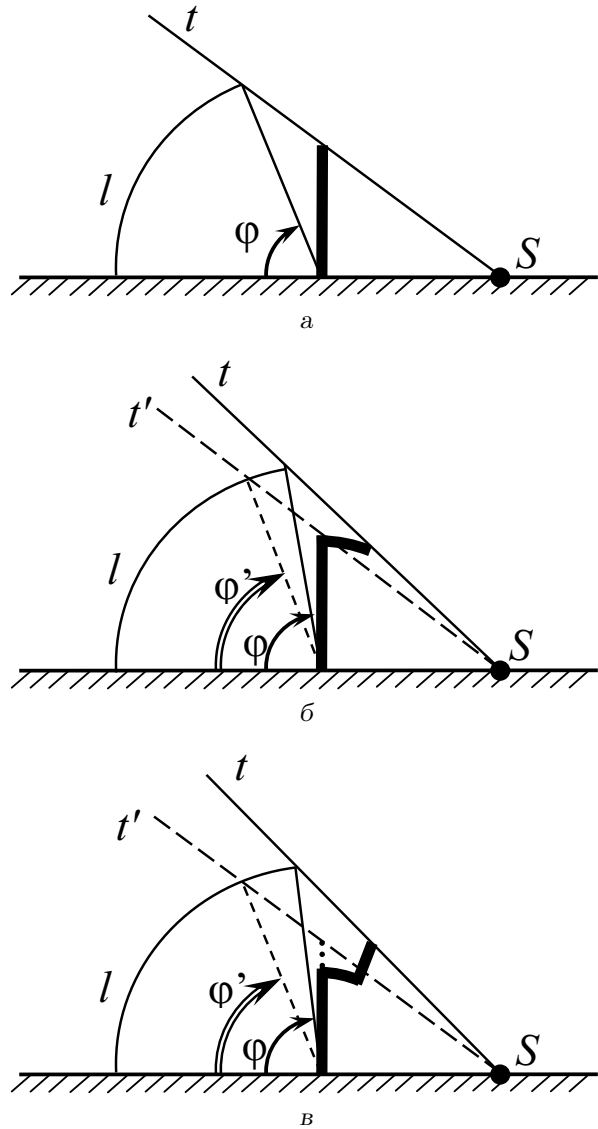


Рис. 3. Конфигурации рассматриваемых шумозащитных барьеров:

а – классический барьер;  
б – Г-образный барьер с простым козырьком;  
в – Г-образный барьер с составным козырьком

С нашей точки зрения, в качестве эталона длины дуги интегрирования наиболее целесообразно выбирать наименьшую из всех рассматриваемых, так чтобы ни для одного из барьеров не выйти за границу тени и не захватить интенсивность из освещенной области. Очевидно, что наименьшая дуга интегрирования принадлежит классическому барьеру (рис. 3, а). На рис. 3, б и в линии, описывающие положение границы тени для классического барьера, показаны штриховыми и обозначены как  $t'$ . Соответственно, угол используемой нами дуги

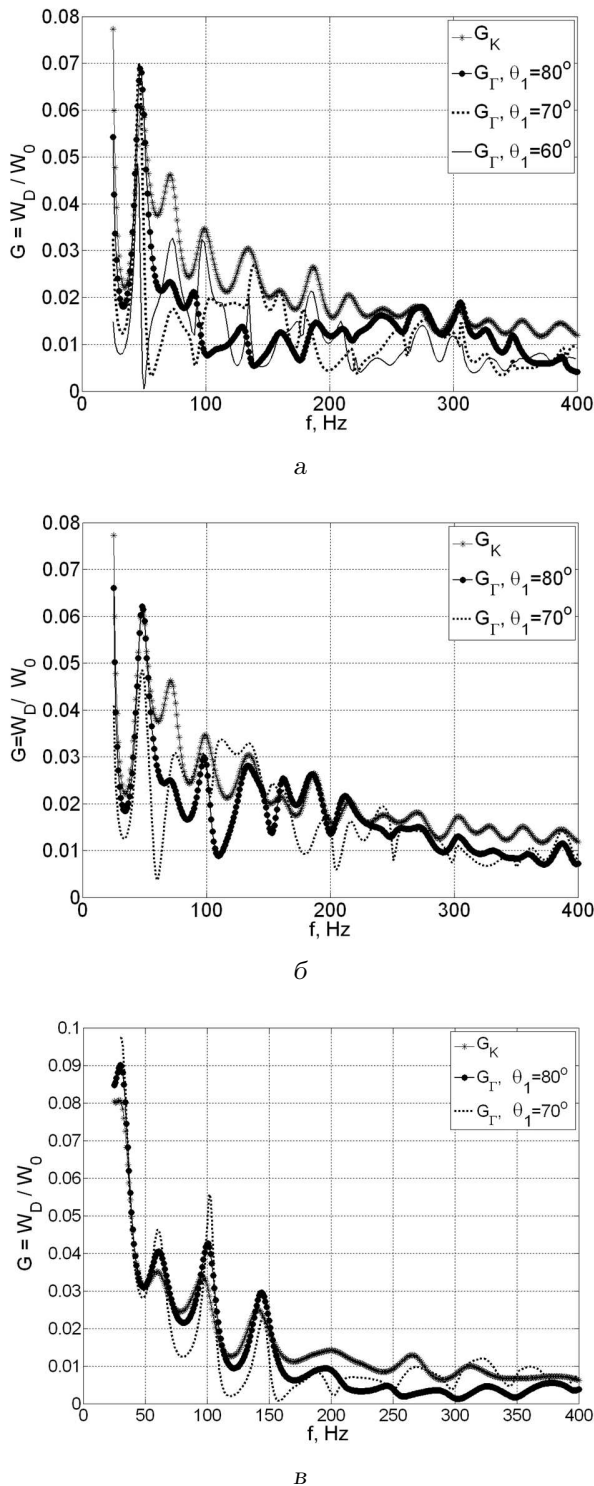


Рис. 4. Частотные зависимости коэффициента прохождения звуковой энергии в зону тени для классических ( $G_K$ ) и Г-образных ( $G_\Gamma$ ) барьеров:  
 а – барьер с простым козырьком ( $b=6$  м);  
 б – барьер с составным козырьком ( $b=6$  м);  
 в – барьер с составным козырьком ( $b=3$  м)

интегрирования показан как  $\varphi'$ . Длину дуги интегрирования следует контролировать и для тех случаев, когда источник звука меняет свое расположение относительно барьера.

Перейдем к непосредственному анализу эффективности Г-образных шумозащитных барьеров. На рис. 4 приведены графики зависимости величины  $G$  от частоты в диапазоне от 25 до 400 Гц для классического ( $G_K$ ) и Г-образного ( $G_\Gamma$ ) барьера с простым и составным козырьком. При этом для рис. 4, а и б расстояние между источником и барьером было  $b=6$  м, а для рис. 4, в –  $b=3$  м. Во всех случаях источник звука располагался на земле и все барьеры имели максимальную высоту 4 м. При этом для Г-образного барьера с составным козырьком  $r_h=3.5$  м, а постоянство его высоты при разных углах наклона козырька обеспечивалось варьированием высоты козырька:  $d=0.56$  при  $\theta_1=80^\circ$  и  $d=0.76$  при  $\theta_1=70^\circ$ . Длина горизонтальной части козырька для обоих типов Г-образных барьеров также определялась углом  $\theta_1$ : при  $\theta_1=80^\circ$  она была 0.7 м, при  $\theta_1=70^\circ$  – 1.4 м, а при  $\theta_1=60^\circ$  – 2.1 м.

Перед тем, как приступить к сравнению величин  $G$  и  $\Psi$ , напомним, что чем меньше их значения, тем меньше звуковой энергии попадает в зону тени и тем выше эффективность шумозащиты соответствующего барьера.

Отметим, что из всех  $G_\Gamma(f)$  только кривая для Г-образного барьера с простым козырьком при  $\theta_1=60^\circ$  ни разу не превышает кривую  $G_K$  (см. рис. 4, а). Для этого барьера в среднем по всему рассматриваемому диапазону частот в зону тени попадает в 2 раза меньше звуковой энергии, чем для классического:  $\Psi_\Gamma(25-400)=4.3$ , а  $\Psi_K(25-400)=8.19$  (см. табл. 1). Если же проводить сравнение для частот от 150 до 400 Гц, то выигрыш по эффективности составляет почти 4 раза (6 дБ). Заметим однако, что в диапазоне до 150 Гц преимущество Г-образного барьера перед классическим – всего 1.3 раза (1.14 дБ). Максимум же эффективности для него приходится на частоту  $f=50$  Гц, на которой количество акустической энергии попавшей в зону тени в 12 раз (10.8 дБ) меньше, чем для классического барьера.

Характеристики двух других Г-образных барьеров с простым козырьком, ограниченных углами  $\theta_1=70^\circ$  и  $\theta_1=80^\circ$  (рис. 4, а), тоже выгодно отличаются от характеристики классического барьера. Во всем исследуемом частотном диапазоне соотношение усредненных количеств акустической энергии, попадающей в зоны их тени, составляет минимум 1.5 раза (1.8 дБ, см. табл. 1). При этом для барьера с  $\theta_1=70^\circ$  в диапазоне до 150 Гц выигрыш

Табл. 1. Значение пространственно-частотного интегрального критерия  $\Psi(f_1 - f_2)$  для Г-образного барьера с простым козырьком высотой  $b=6$  м

Частотный диапазон, Гц	Тип барьера			
	классич.	Г-образный		
		$\theta_1 = 60^\circ$	$\theta_1 = 70^\circ$	$\theta_1 = 80^\circ$
25...400	8.19	2.85	4.68	5.42
25...150	4.08	3.22	2.33	2.5
150...400	4.11	1.07	2.35	2.92

Табл. 2. Значение пространственно-частотного интегрального критерия  $\Psi(f_1 - f_2)$  для Г-образных барьеров с составным козырьком

Частотный диапазон, Гц	$b = 6$ м			$b = 3$ м		
	классич.	Г-образный		классич.	Г-образный	
		$\theta_1 = 70^\circ$	$\theta_1 = 80^\circ$		$\theta_1 = 70^\circ$	$\theta_1 = 80^\circ$
25...400	8.19	6.40	6.63	6.31	4.38	4.04
25...150	4.08	3.29	3.15	3.87	3.25	3.15
150...400	4.11	3.10	3.42	2.44	1.14	1.21

по сравнению с классическим барьером составляет почти 2 раза (3 дБ), а между 50 и 65 Гц – 5 раз (на 7 дБ). В свою очередь, для барьера с  $\theta_1 = 80^\circ$  на частотах от 100 до 200 Гц выигрыш составляет 2÷3 раза (3÷4.7 дБ). Качественное сравнение указанных кривых  $G_\Gamma$  с зависимостью для  $G_K$  не позволяет заключить, что они практически совпадают в диапазонах 40÷53 Гц и 270÷315 Гц, но при 53÷270 Гц и 315÷400 Гц неоспоримым преимуществом по шумозащите обладает Г-образный барьер.

Для барьеров с составным козырьком, отстоящих на 6 м от источника, выигрыш по эффективности относительно классического барьера оказывается меньшим, чем для Г-образных барьеров с простым козырьком (рис. 4, б) – в среднем в 1.2÷1.3 раза (0.8÷1.1 дБ) для обоих рассмотренных. Исключением для барьера с наклоном козырька  $\theta_1 = 70^\circ$  является диапазон 55÷70 Гц, в котором эффективность барьера с составным козырьком в 2÷4 раза (на 3÷6 дБ) больше, а вблизи частоты 60 Гц их разница возрастает в 8 раз (на 9 дБ).

Если же сравнивать между собой характеристики Г-образных барьеров с простым и составным козырьками, то из табл. 2, а также рис. 4, а и б, видно, что по эффективности шумозащиты барьер с составным козырьком занимает промежуточное положение между барьером с простым козырьком и классическим барьером. Это можно объяснить

тем, что у барьера с простым козырьком кромка, порождающая дифрагированное звуковое поле, расположена несколько дальше от защищаемой области (см. рис. 3).

Также следует отметить положительное влияние увеличения длины козырька в горизонтальной проекции на эффективность шумозащиты Г-образных барьеров.

Анализируя данные, представленные на рис. 4, в и в табл. 2, можно оценить, как влияет на эффективность шумозащиты приближение барьера к источнику на расстояние до  $b=3$  м (при сохранении всех прочих параметров). Несмотря на то, что источник звука  $S$  стал ближе к барьеру, вследствие чего зона тени расширилась (см. рис. 3), дуга интегрирования для вычисления величины  $W_D$  была оставлена прежней. Это дает возможность корректно сравнивать полученные данные с рассмотренными случаями для источника, более удаленного от барьера. Сравнение усредненных значений  $\Psi(f_1 - f_2)$  (см. табл. 2) позволяет с уверенностью сказать, что с уменьшением расстояния между источником и барьером увеличивается не только размер зоны тени, но и ее глубина:

- для классического барьера в диапазоне до 150 Гц практически никаких улучшений не наблюдается, но зато на частотах от 100 до 400 Гц эффективность возрастает в 2 раза (на 3 дБ);

- для Г-образного барьера при обоих рассматриваемых углах наклона козырька в среднем по всему диапазону наблюдается повышение эффективности в полтора раза; при этом на частотах до 150 Гц выигрыша нет, а в полосе от 150 до 400 Гц она возрастает почти в 3 раза (на 4.8 дБ).

Более детальное сопоставление приведенных на рис. 4, б и в кривых показывает, что:

- изменение кривой  $G_K$  везде, кроме полос 25÷40 Гц и 83÷98 Гц, указывает на углубление тени в среднем в 2 раза (на 3 дБ), однако в диапазоне 41÷179 Гц эффективность ухудшается примерно в 1.5 раза (на 1.8 дБ);
- для барьера с наклоном козырька  $\theta_1 = 80^\circ$  улучшение шумозащиты происходит в диапазонах 43÷56, 115÷140 и 156÷400 Гц, на отрезках же 25÷42, 57÷114 и 141÷155 Гц в зону тени проходит в среднем в 1.5÷2 раза (на 1.8÷3 дБ) больше акустической энергии;
- для барьера с наклоном козырька  $\theta_1 = 70^\circ$  улучшение шумозащиты приходится на диапазоны 43÷53, 116÷155, 107÷308 и 336÷400 Гц, на отрезках же 25÷42, 54÷68 и 309÷335 Гц в зону тени в среднем проходит в 1.5÷2 раза (на 1.8÷3 дБ) больше акустической энергии.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе применения метода частичных областей строго решена задача о рассеянии звука на шумоподавляющем барьере с козырьком и разработан эффективный алгоритм для проведения численного анализа звукового поля в освещенной, переходной и теневой зонах. Получены количественные данные, характеризующие эффективность шумозащиты Г-образных барьеров в диапазоне частот от 25 до 400 Гц, на который приходится наибольшая часть акустической мощности, излучаемой транспортным потоком [1].

Проведенный сопоставительный анализ акустических свойств классического и Г-образных барьеров двух конфигураций позволил сделать следующие выводы.

1. Г-образные барьеры эффективнее классического: барьер с простым козырьком, начиная

с 50 Гц, улучшает шумозащиту на 1÷7 дБ (в зависимости от частоты), барьер с составным козырьком, – начиная с 150 Гц – на 0.3÷4 дБ.

2. Наиболее эффективным из двух рассмотренных конструкций Г-образных барьеров оказался барьер с простым козырьком.
3. Увеличение длины козырька в горизонтальной проекции расширяет и углубляет зону тени при одинаковой максимальной высоте барьера; это особенно ценно, когда необходимо защитить от шума многоэтажные здания (см. рис. 1, б).
4. При уменьшении расстояния между барьером и источником эффективность Г-образных барьеров возрастает сильнее, чем у классического, поэтому их применение особенно оправдано при не очень широких дорогах, когда источник звука находится близко от барьера.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает благодарность доктору физико-математических наук, профессору Игорю Владимировичу Вовку за помощь в постановке задачи и полезные советы, связанные с обсуждением полученных количественных результатов.

1. Вовк И. В., Конченко Т. А., Мацьпура В. Т. Об одном строгом методе оценки акустических свойств шумоподавляющих барьеров // Акуст. вісн.– 2004.– 7, N 4.– С. 21–27.
2. Вовк И. В., Мацьпура В. Т., Сотникова Т. А. Об одном методе повышения эффективности шумоподавляющих барьеров // Акуст. вісн.– 2006.– 9, N 2.– С. 17–26.
3. Общее о шумозащитных заборах и акустических экранах [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://transpenv.org.ru/people.html>
4. Мы защитим вас от шума! // СтройПРОФИль.– 2008.– 65, N 3.– С. 10–11.
5. Вовк И. В., Сотникова Т. А. Интегральные акустические характеристики V-образного шумоподавляющего барьера // Акуст. вісн.– 2006.– 10, N 3.– С. 25–29.
6. Гринченко В. Т., Вовк И. В. Волновые задачи рассеяния на упругих оболочках.– К.: Наук. думка, 1986.– 240 с.
7. Шендеров Е. Л. Излучение и рассеяние звука.– Л.: Судостроение, 1989.– 301 с.