

УДК 534.1

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ АКУСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ V-ОБРАЗНОГО ШУМОПОДАВЛЯЮЩЕГО БАРЬЕРА

И. В. ВОВК, Т. А. СОТНИКОВА

Институт гидромеханики НАН Украины, Киев

Получено 12.04.2007

Предложен интегральный критерий, позволяющий оценивать шумоподавляющие свойства акустических барьеров. Проведен сравнительный анализ эффективности шумоподавления с помощью классического и V-образного барьеров. Показана целесообразность практического применения V-образных барьеров.

Запропоновано інтегральний критерій, який дозволяє оцінювати шумозаглушуючі властивості акустичних бар'єрів. Проведено порівняльний аналіз ефективності шумозаглушення за допомогою класичного і V-подібного бар'єрів. Показана доцільність практичного застосування V-подібних бар'єрів.

An integral criterion, allowing the estimation of noise-suppressing properties of the acoustic barriers, is offered. Efficiencies of noise-suppressing by the classic and the V-shaped barriers are compared. The expedience of practical using of the V-shaped barriers is shown.

ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] развит метод, позволяющий получить строгое решение задачи дифракции звука на классическом барьере в виде плоской стенки и оценить пространственное распределение звукового поля в освещенной области и в области тени за барьером.

В статье [2] предложена одна из возможных конструктивных схем барьера повышенной эффективности, представляющая собой V-образный барьер с акустическим резонатором. Сравнение шумоподавляющих свойств V-образного и классического барьеров проводилось путем сопоставления полей пространственного распределения модулей звукового давления в их присутствии. Такая форма представления информации очень удобна для детальной оценки степени шумоподавления, поскольку дает наглядное и исчерпывающее представление об уровнях звука в любой точке пространства, включая и важную для практики зону акустической тени. Однако, поскольку локальные значения сигнала существенно зависят от конфигурации барьеров, частоты и положения источника звука, сравнительное оценивание эффективности рассматриваемых конструкций по полю давлений оказывается достаточно трудоемкой задачей. Вместе с тем, при проектировании реальных барьеров зачастую оказываются полезными обобщенные оценки их шумоподавляющих свойств, которые позволили бы выбрать ту или иную конструкцию, не прибегая к подробному анализу структуры акустических полей.

Ниже предлагается критерий оценки эффектив-

ности шумоподавляющего барьера, основанный на исследовании интегральных характеристик рассеянного им звукового поля.

1. МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ШУМОПОДАВЛЯЮЩИХ ХАРАКТЕРИСТИК БАРЬЕРА

Как нам представляется, для оценки интегральных характеристик акустических свойств шумоподавляющих барьеров наиболее целесообразно использовать энергетические характеристики звукового поля. В первую очередь, к ним следует отнести полную излучаемую источником мощность W_0 (при наличии барьера) и мощность звукового поля W_D , проникающего в зону геометрической тени барьера за счет дифракции. Чтобы убедиться в правомерности такого подхода, достаточно взглянуть на распределения потока акустической энергии от источника в присутствии классического и V-образного барьеров (рис. 1). Здесь ориентации стрелок указывают направление потока энергии, а их длины – относительный уровень интенсивности. На рис. 2 представлены схематические изображения самих барьеров со всеми параметрами, необходимыми для нахождения угла раскрыва геометрической тени φ . Здесь использована полярная система координат (r, θ) с центром в точке O и направлением отсчета угла $\theta=0$ от оси Ox .

В качестве интегрального критерия для оценки шумоподавляющих свойств барьера выберем величину

$$G = W_D/W_0, \quad (1)$$

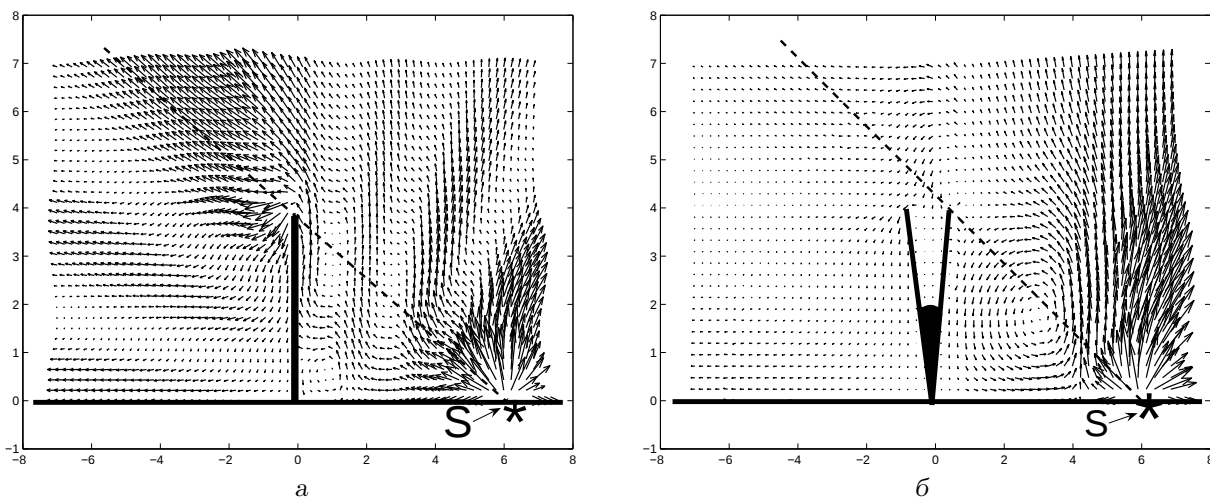


Рис. 1. Распределение потока звуковой энергии:
а – для классического барьера, б – для V-образного барьера

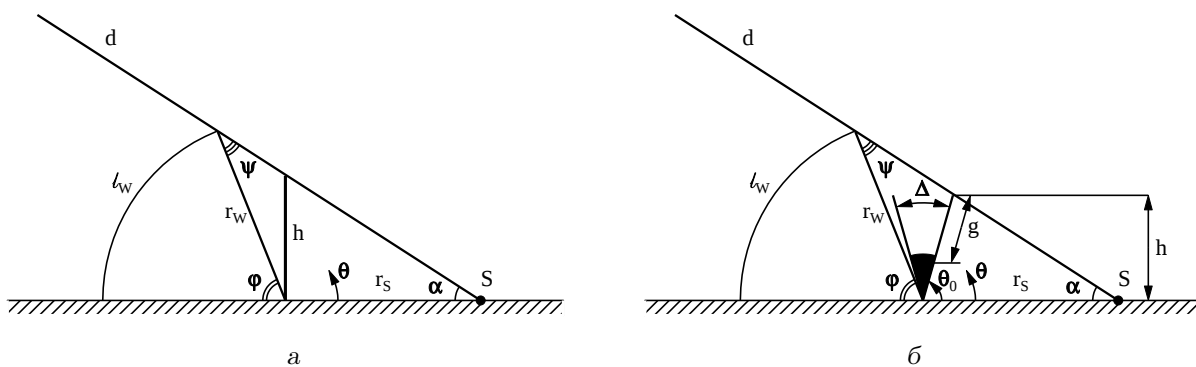


Рис. 2. Конфигурация рассматриваемых шумозащитных барьеров, классического (а) и V-образного (б):
S – источник звука; d – линия, соединяющая источник с кромкой барьера (отделяет зону тени от освещенной зоны)

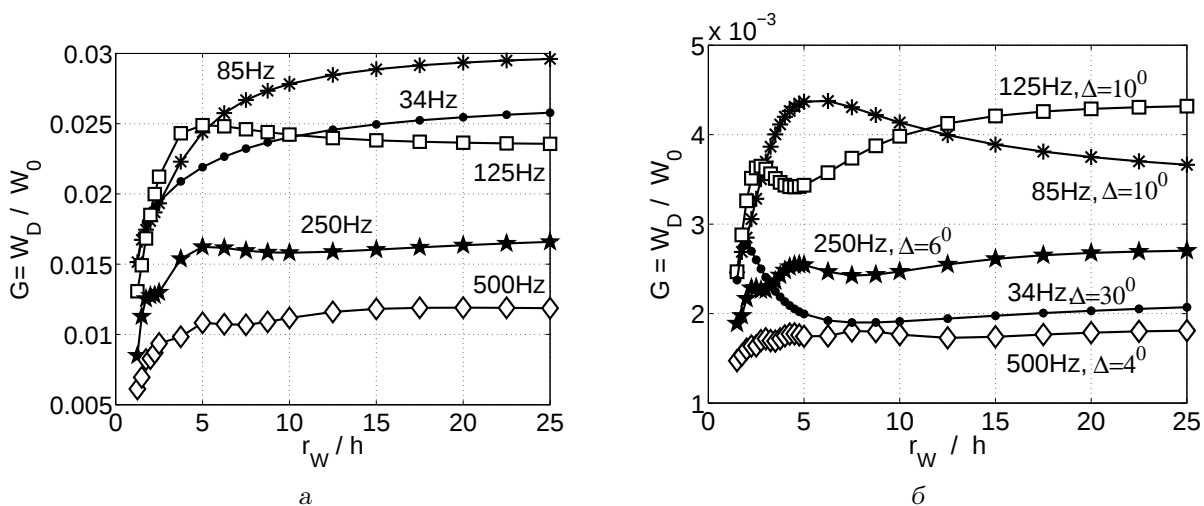


Рис. 3. Интегральная эффективность шумоподавления барьеров в зоне тени:
а – классический барьер, б – V-образный барьер

которая по сути является коэффициентом прохождения акустической энергии в зону тени барьера. Поскольку рассматривается плоская задача дифракции звука на барьере, то выражение для полной мощности источника на единицу его протяженности будет иметь следующий вид¹:

$$W_0 = \int_l I(l) dl, \quad l = f(r, \theta), \quad r > r_S, \quad 0 \leq \theta \leq \pi, \quad (2)$$

где интенсивность I в каждой точке на дуге l выражается через звуковое давление в ней p и нормальную к дуге составляющую колебательной скорости v_n :

$$I = \operatorname{Re} [p v_n^*] / 2. \quad (3)$$

Здесь звездочка при v_n обозначает комплексное сопряжение.

Для вычисления величины W_D будем использовать мощность звукового поля, пронизывающего дугу l_W радиуса r_W (см. рис. 2, а), которая расположена в зоне тени и ограничена с одной стороны поверхностью земли, а с другой – линией геометрической тени d , проходящей от источника через кромку барьера. Заметим, что при неограниченном увеличении радиуса дуги интегрирования r_W угол ее раскрытия φ асимптотически стремится к углу геометрической тени α . При этом для достаточно больших расстояний ($r_W \gg \lambda$, $r_W \gg h$) мощность звукового поля, пронизывающего дугу l_W , уже не будет изменяться, поскольку в этом случае дуга интегрирования становится частью общего фронта распространения волны, сформированной системой “источник – барьер – поверхность земли”.

Все вышесказанное позволяет определить искомую величину W_D через интеграл от интенсивности I по дуге l_W :

$$W_D = \int_{l_W} I(l_W) dl, \quad l_W = f(r, \theta), \quad (4)$$

$$r = r_S, \quad \pi - \varphi \leq \theta \leq \pi.$$

Для классического барьера (см. рис. 2, а) нетрудно показать, что угол раскрытия дуги интегрирования φ выражается через угол геометрической тени α , высоту барьера h и радиус дуги r_W следующим образом:

$$\varphi = \alpha + \arcsin \left(h \frac{\cos \alpha}{r_W} \right). \quad (5)$$

¹Так как потери в среде не учитываются, полную мощность источника можно оценивать на любой дуге l радиуса $r > r_S$

Для V-образного барьера (см. рис. 2, б) справедливо

$$\varphi = \alpha + \arcsin \left(\frac{h}{\sin \theta_0} \frac{\sin(\alpha + \theta_0)}{r_W} \right). \quad (6)$$

Из формул (5), (6) непосредственно следует поведение величины φ при неограниченном увеличении r_W :

$$\lim_{r_W \rightarrow \infty} \varphi \rightarrow \alpha. \quad (7)$$

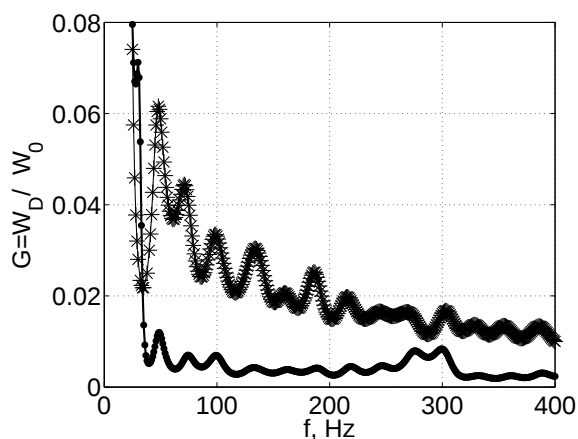
2. АНАЛИЗ ЧИСЛЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Используем выработанный критерий для анализа интегральных акустических свойств барьеров. Сначала рассмотрим зависимости коэффициента прохождения звука за барьер G от радиуса дуги интегрирования r_W .

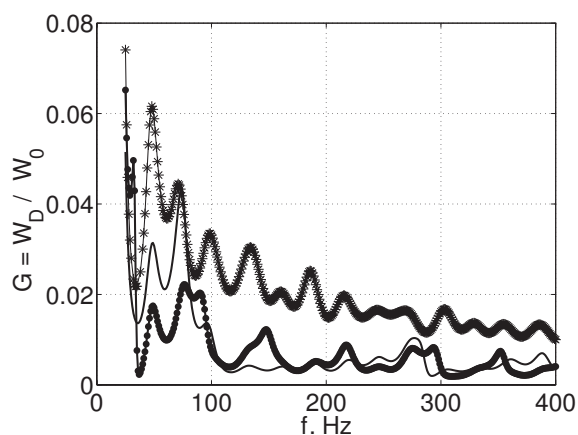
На рис. 3 показано, как меняется по мере удаления от барьера доля относительной звуковой мощности, попадающей в зону геометрической тени (приведены графики для шести разных частот). По оси абсцисс отложено отношение r_W/h , характеризующее степень удаленности контура интегрирования от барьера. Эффективная высота обоих барьеров составляла 4 м. Глубина и угол раскрытия V-образного барьера Δ для каждой кривой настраивались на исследуемую частоту [2]. Источник располагался на земле на расстоянии 6 м от барьера (см. рис. 2).

Графики демонстрируют весьма схожую тенденцию – потоки звуковой энергии, проходящей за барьер, возрастают в диапазоне $1 < r_W/h < 5$ и практически постоянны при больших значениях r_W/h . Сравнивая уровни соответствующих кривых, нетрудно заметить, что V-образный барьер значительно (примерно в 6 раз) эффективнее классического. Это совпадает с выводами, сделанными при сравнении пространственных распределений звуковых полей [2].

На рис. 4 приведены частотные зависимости отношения G для обоих типов исследуемых барьеров. Параметры систем те же, что ранее, с тем отличием, что раскрыт V-образного барьера фиксирован: $\Delta = 10^\circ$ при наклоне боковой стенки $\theta_0 = 85^\circ$. Глубина резонатора (внутренней области барьера) вновь подстраивалась под каждую исследуемую частоту [2]. Видно, что и для классического, и для V-образного барьеров величина G существенно зависит от частоты. В обоих случаях осцилляции кривых связаны с интерференционными явлениями, возникающими за счет взаимодействия прямой волны от источника с отраженной волной от барьера.

Рис. 4. Частотная зависимость величины G :

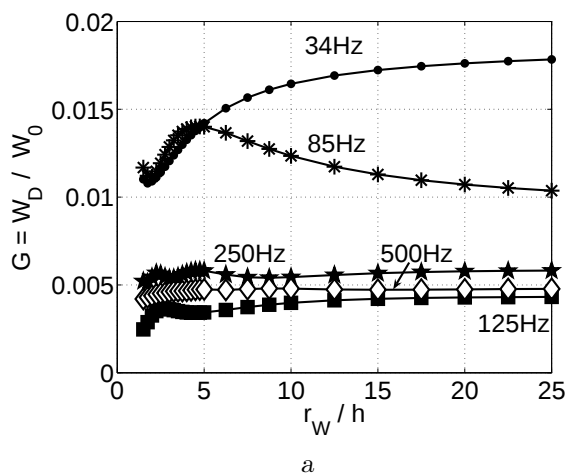
* – классический барьер;
 • – подстраиваемый V-образный барьер

Рис. 5. Частотная зависимость величины G :

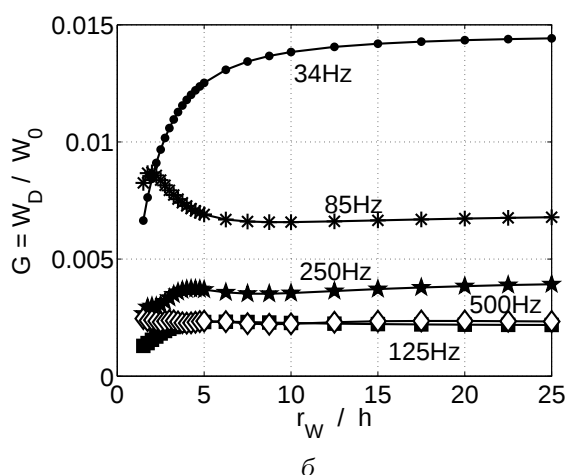
* – классический барьер;
 • – V-образный барьер, настроенный на 34 Гц;
 – – V-образный барьер, настроенный на 125 Гц

Естественно, подстраивать резонатор V-образного барьера целесообразно тогда, когда спектр источника шумов имеет доминирующие тональные сигналы или зоны узкополосного шума. Разумеется, на практике чаще всего приходится иметь дело с широкополосным шумом [3, 4]. Поэтому параметры резонатора должны выбираться под каждый конкретный спектр шума индивидуально, исходя из преобладающих частотных составляющих.

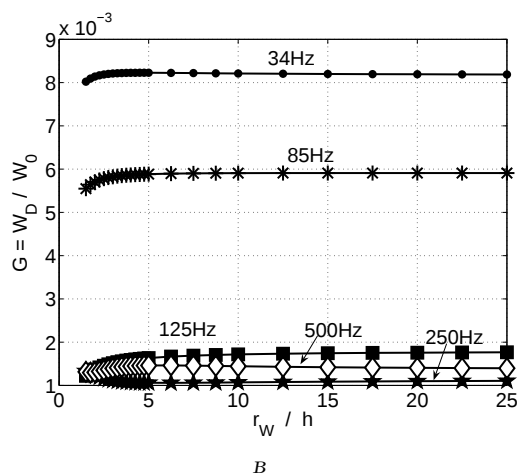
На рис. 5 представлены частотные зависимости G для случаев, когда резонатор V-образного барьера настроен на частоты 34 и 125 Гц. Как и следовало ожидать, эффективность барьера с фиксированной настройкой резонатора ниже, чем у ба-



а



б



в

Рис. 6. Эффективность шумоподавления для V-образного барьера, настроенного на частоту 125 Гц, по секторам:

а – полная зона тени $l_W = f(\varphi)$;
 б – сектор зоны тени $l_W = f(2\varphi/3)$;
 в – сектор зоны тени $l_W = f(\varphi/3)$

рьера с резонатором, подстраиваемым под частоту источника шума. Тем не менее, его действенность все равно оказывается значительно выше, чем у классического барьера.

Обращает на себя внимание то, что в окрестности 34 Гц наблюдается ситуация, когда уровень шума для V-образного барьера, настроенного на эту частоту, превышает уровень для классического барьера. Связанно это с тем, что в диапазоне от 25 до 60 Гц угол раскрыва резонатора $\Delta = 10^\circ$ настолько мал, что звуковая волна просто “не замечает” его. Здесь волновое расстояние между верхними кромками резонатора составляет лишь $\sim 0.07\lambda$ и вся конструкция ведет себя подобно барьеру с достаточно широким сплошным верхним торцом, который обладает худшими шумоподавляющими свойствами, чем классический тонкий экран (см., например [5]).

Во многих практических случаях необходимо защитить от шума в первую очередь расположенные на улице места пребывания людей (детские игровые площадки, приусадебные участки, пешеходные зоны, тянущиеся вдоль трассы, и др.). Поэтому большой интерес представляет изучение более узкого участка зоны тени, прилегающего непосредственно к земле и составляющего по высоте примерно $1.5 \div 2$ человеческих роста. С этой целью рассмотрим величину G , вычисленную в различных секторах зоны тени с углами $\varphi_1 = \varphi/3$ (рис. 6, в) и $\varphi_2 = 2\varphi/3$ (рис. 6, б). В обоих случаях угол φ отсчитывается от плоскости земли $\theta = \pi$, т.е. дуга интегрирования l_W описывается координатами $r = r_W$, $\pi - \varphi \leq \theta \leq \pi$. Для сравнения на рис. 6, а приведены зависимости G во всей геометрической зоне тени за V-образным барьером. На рис. 7 представлены аналогичные данные для классического барьера. Сравнивая эти графики, можно заключить, что в прилегающих к земле зонах эффективность V-образного барьера существенно выше, чем у классического. Здесь сказывается отсутствие не столь важной для практики переходной теневой области, примыкающей к границе геометрической тени d (она описывается диапазоном углов $\pi - \varphi \leq \varphi \leq \pi - \tilde{\varphi}$).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен интегральный критерий, позволяющий оценивать эффективность акустических барьеров. Сравнительный анализ шумоподавляющих свойств классического и V-образного барьеров показал целесообразность практического применения данной методики. По результатам оценки эффективности классического и V-образного ба-

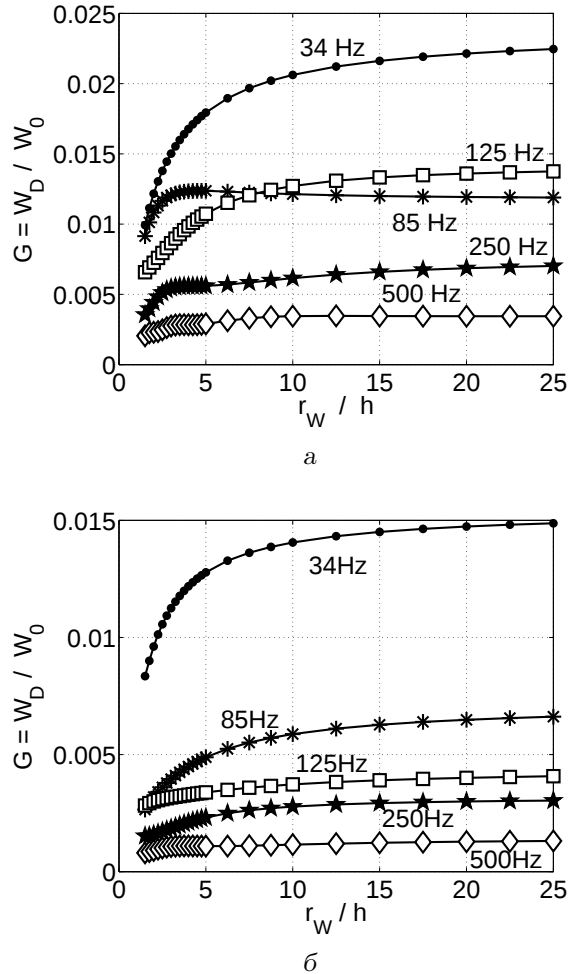


Рис. 7. Эффективность шумоподавления для классического барьера по секторам:

а – сектор зоны тени $l_W = f(2\varphi/3)$;
б – сектор зоны тени $l_W = f(\varphi/3)$

рьеров на прилегающем к земле участке зоны геометрической тени показано, что здесь V-образный барьер дает максимальный выигрыш.

1. Вовк И. В., Конченко Т. А., Мацыпура В. Т. Об одном строгом методе оценки акустических свойств шумоподавляющих барьеров // Акуст. вісн.– 2004.– 7, N 4.– С. 21–27.
2. Вовк И. В., Мацыпура В. Т., Сотникова Т. А. Об одном методе повышения эффективности шумоподавляющих барьеров // Акуст. вісн.– 2006.– 9, N 2.– С. 17–26.
3. Makarewicz R. Air absorption of motor vehicle // J. Acoust. Soc. Amer.– 1986.– 80, N 2.– P. 561–568.
4. Vos J. Annoyance caused by simultaneous impulse, road-traffic, and aircraft sounds // J. Acoust. Soc. Amer.– 1992.– 91, N 6.– P. 3330–3345.
5. Kurze U. J. Noise reduction by barriers // J. Acoust. Soc. Amer.– 1974.– 55, N 3.– P. 504–506.