

УДК 534.1

ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТЕЙ ШУМОЗАЩИТНОГО БАРЬЕРА НА ЕГО ЭФФЕКТИВНОСТЬ

И. В. ВОВК*, В. Т. МАЦЫПУРА**

*Институт гидромеханики НАН Украины, Киев

**Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко

Получено 11.02.2010

Исследовано влияние свойств поверхностей шумозащитного барьера на его эффективность. В частности, рассмотрен барьер с акустически жесткой, мягкой и поглощающей стенками. Показано, что наиболее эффективен барьер с поглощающей стенкой. Также изучена эффективность барьера, стенка которого покрыта решеткой четвертьволновых резонаторов и резонаторов Гельмгольца. Установлено, что при рациональном выборе параметров таких решеток можно существенно улучшить шумозащиту в полосе частот до одной октавы и более.

Досліджено вплив властивостей поверхні шумозахисного бар'єра на його ефективність. Розглянуто бар'єр з акустично жорсткою, акустично м'якою й поглинаючою поверхнями. Показано, що бар'єр з поглинаючою поверхнею є найбільш ефективним. Також досліджено ефективність бар'єра, поверхня якого покрита решіткою чвертьхвильових резонаторів і резонаторів Гельмгольца. Встановлено, що при раціональному виборі параметрів таких решіток можна суттєво покращити шумозахист у смузі частот до однієї октави й більше.

The influence of wall properties of a noise barrier on its effectiveness has been studied. The barriers with acoustically hard, soft and absorbing surfaces have been considered. The barrier with the absorbing surface is shown to be the most effective. Moreover, the effectiveness has been studied for the barrier which surface is covered by a grating of quarter-wavelength Helmholtz resonators. It has been found that by rational choosing of parameters of the grating one can considerably improve the noise protection in frequency band of one octave and wider.

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия количество транспортных средств на автомагистралях подавляющего большинства развитых стран мира неуклонно растет. Естественно, вместе с этим растут и уровни создаваемых автомобилями шумовых полей. Одним из наиболее распространенных средств защиты прилегающих к автомагистралям территорий стало возведение на обочинах шумозащитных барьеров. Классический барьер конструктивно прост и представляет собой относительно тонкую вертикальную стенку, выполненную из акустически жесткого материала. Очевидный путь увеличения глубины тени и ее размеров за барьером – сделать барьер более высоким. Однако такой подход во многих случаях неприемлем как с экономической, так и с эстетической точки зрения. В связи с этим уже на протяжении многих лет ведется поиск таких путей повышения эффективности барьеров, которые не предполагали бы увеличения их высоты более четырех–шести метров. Теоретические и экспериментальные исследования, проведенные за последние тридцать лет, показали, что увеличение эффективности барьеров может быть достигнуто за счет применения специальных (неклассических) конструкций и использования в них материалов с определенными

акустическими свойствами (см., например, [1–3] и библиографию в них).

В качестве примера на рис. 1 представлены фотографии барьеров, сделанные одним из авторов осенью 2009 года на дорогах Австрии и Италии. Эти изображения позволяют с большой долей уверенности предположить, что поверхности всех трех барьеров обладают звукопоглощающими свойствами, но конструктивно они выполнены по-разному. На рис. 1, а поверхность барьера выполнена в виде панелей из переплетенных деревянных лент, что обеспечивает определенную степень звукопоглощения. Кстати, такого типа панели нередко используются для обработки стен и потолка концертных залов для придания им необходимого времени реверберации. На рис. 1, б барьер выполнен в виде этажерок, частично заполненных песком. Можно предположить, что этажерки представляют собой четвертьволновые резонаторы, а песок необходим для обеспечения некоторого уровня поглощения звука. Наконец, на рис. 1, в изображен барьер в виде набора горизонтальных панелей с мелкими отверстиями (перфорациями). Очевидно, что с тыльной стороны этих панелей на некотором расстоянии размещена жесткая стенка¹, в

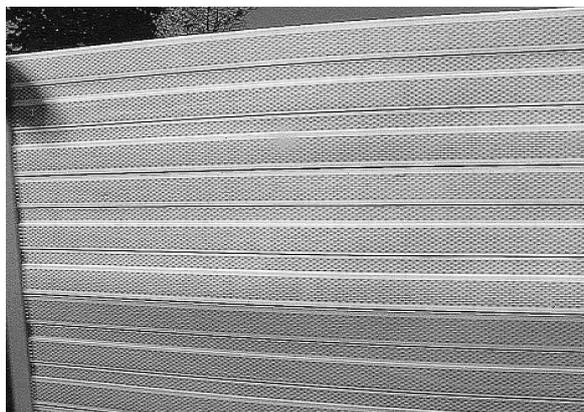
¹Отсутствие жесткой стенки привело бы к полной звукопрозрачности барьера и потере смысла в его установке.



а



б



в

Рис. 1. Реальные барьеры, используемые на автомагистралях Австрии и Италии:

- а – барьер из переплетенных тонких деревянных лент;
- б – барьер в виде набора этажерок, частично заполненных песком;
- в – барьер, набранный из горизонтальных перфорированных панелей

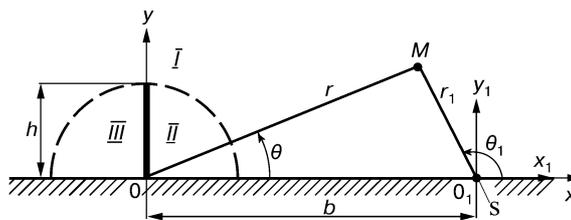


Рис. 2. Геометрия математической модели барьера

результате чего организуется так называемый резонансный поглотитель, широко используемый в строительной технике [2].

Представленное разнообразие конструкций барьеров может указывать на то, что до сих пор не выработана оптимальная их конструкция, которая удовлетворяла бы одновременно нескольким критериям, а именно, акустической эффективности, эстетике и приемлемой стоимости.

Цель данной работы – разработка строгого эффективного метода расчета акустических свойств барьеров, стенки которых обладают звукопоглощающими свойствами. Кроме того, на примерах конкретных конструктивных схем, реализующих такие свойства, будет проанализирована акустическая эффективность барьера в целом.

1. ФИЗИЧЕСКАЯ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛИ БАРЬЕРА

Рассмотрим идеализированную физическую модель барьера (рис. 2). Будем считать, что на бесконечной акустически жесткой поверхности, моделирующей поверхность земли, в точке O установлен бесконечный (вдоль направления, перпендикулярного к плоскости рисунка) тонкий барьер высотой h . Справа параллельно барьеру на расстоянии b от него на поверхности земли ($y=0$) расположен линейный гармонический источник звука S в виде бесконечной пульсирующей нити, моделирующий звук, создаваемый транспортным потоком. Буквой M обозначена точка наблюдения. Все полупространство $y > 0$ заполнено воздушной средой с плотностью ρ и скоростью звука c . Будем считать, что обращенная к источнику (освещенная) поверхность барьера характеризуется некоторым комплексным импедансом, а теневая поверхность всегда остается акустически жесткой.

Описанная физическая модель с математической точки зрения эквивалентна плоской задаче, когда звуковое поле не зависит от одной из координат (в нашем случае – от координаты, перпендикулярной к плоскости рисунка). Принятые допу-

щения об акустически жестких теневой поверхностях барьера и земли означают, что нормальная составляющая колебательной скорости на этих поверхностях равна нулю. Задание же импеданса на освещенной поверхности барьера дает возможность моделировать отражающие и поглощающие свойства реальных конструкций.

Для гармонического источника искомое поле давления удовлетворяет уравнению Гельмгольца. Такая модель, с одной стороны, в общих чертах адекватна ситуациям, встречающимся на практике, а с другой (как будет показано ниже), – позволяет построить аналитическое решение о рассеянии звука на таком препятствии как барьер, освещенная стенка которого обладает некоторыми поглощающими свойствами.

2. ПОСТРОЕНИЕ АНАЛИТИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Для нахождения решения поставленной задачи введем полярную систему координат (r, θ) с центром в точке O (см. рис. 2). Решение задачи будем строить на базе метода частичных областей [4, 5], в соответствии с идеей которого все пространство существования звукового поля разобьем на три области:

- область I – внешность полукруга радиуса h , т. е. $r > h, 0 \leq \theta \leq \pi$;
- область II занимает одну четверть круга радиуса h , т. е. $r < h, 0 \leq \theta \leq \pi/2$;
- область III определяется другой четвертью круга радиуса h , т. е. $r < h, \pi/2 \leq \theta \leq \pi$.

Поместим в точку расположения источника S центр O_1 второй полярной системы координат (r_1, θ_1) . Поле давления элементарного линейного источника единичной амплитуды определяется как

$$p_0 = H_0^{(1)}(kr_1),$$

где $k = \omega/c$; $\omega = 2\pi f$ – частота. Если $b > h$, то источник звука расположен в области I, а если $b < h$ – то в области II. Пусть для определенности $b > h$. Тогда звуковое поле в области I следует записать в виде

$$p_I = H_0^{(1)}(kr_1) + \sum_{n=0}^{\infty} A_n \frac{H_n^{(1)}(kr)}{H_n^{(1)'}(kh)} \cos(n\theta), \quad (1)$$

где угловые функции $\cos(n\theta)$ выбраны так, что решение автоматически удовлетворяет граничным условиям на жесткой поверхности, моделирующей

землю (при $\theta=0$ и $\theta=\pi$). Поскольку поле источника p_0 представлено в координатах (r_1, θ_1) , его нужно записать в координатах (r, θ) . Для этого следует либо установить непосредственную связь между системами отсчета (r_1, θ_1) и (r, θ) , либо использовать теорему сложения для цилиндрических функций [5]:

$$p_0 = H_0^{(1)}(kr_1) = \sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon_n H_n^{(1)}(kb) J_n(kr) \cos(n\theta), \quad (2)$$

где $\varepsilon_0 = 1$ и $\varepsilon_n = 2$ при $n > 0$. Соответствующий подбор произвольных коэффициентов A_n в формуле (1) позволяет выполнить условия сопряжения полей на границе раздела областей I, II и III.

Поле давления в области II запишем в виде

$$p_{II} = \sum_{n=0}^{\infty} B_n \frac{J_{2n}(kr)}{J_{2n}'(kh)} \cos(2n\theta) + \sum_{n=0}^{\infty} C_n \cos\left(\frac{n\pi z}{h}\right) \exp(i\gamma_n x). \quad (3)$$

Здесь первая сумма представляет собою совокупность частных решений уравнения Гельмгольца в области в виде четверти круга радиуса h . Как следствие, при должном выборе коэффициентов B_n она позволяет удовлетворить произвольным условиям сопряжения полей на поверхности раздела областей I и II. Угловые функции $\cos(2n\theta)$ выбраны в предположении, что поверхность земли и освещенная сторона барьера акустически жесткие.

Поскольку в нашей модели освещенная сторона барьера характеризуется некоторым импедансом Z , то для удовлетворения граничного условия на этой поверхности в формуле (3) необходима вторая сумма, представляющая собой набор нормальных волн плоско-параллельного волновода с жесткими граничными поверхностями, ширина которого равна h . Благодаря этому, посредством соответствующего подбора коэффициентов C_n можно удовлетворить импедансное граничное условие на освещенной стороне барьера.

Для области III звуковое поле естественно представить как

$$p_{III} = \sum_{n=0}^{\infty} D_n \frac{J_{2n}(kr)}{J_{2n}'(kh)} \cos[2n(\theta - \pi/2)]. \quad (4)$$

Сформируем систему функциональных уравнений, которая определяет условия непрерывности звукового поля на границах раздела областей I,

Заметим, что при неограниченном увеличении радиуса дуги интегрирования r_w угол φ асимптотически стремится к углу α . При этом, для достаточно больших расстояний ($r_w \gg \lambda$, $r_w \gg h$) величина мощности звукового поля, пронизывающего дугу l_w , не будет изменяться, поскольку в этом случае дуга интегрирования является частью фронта волны, сформированной системой “источник – барьер – поверхность земли”.

3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Зададим следующие геометрические параметры модели барьера (см. рис. 1 и 2): высота $h = 4$ м; расстояние от барьера до источника звука $b = 6$ м; радиус дуги, на которой подсчитывается поток звуковой энергии $r_w = 20$ м.

Анализ шумозащитных свойств модели начнем с ситуации, когда освещенная сторона барьера обладает свойствами акустически идеальной поверхности. На рис. 4 кривая 1 соответствует акустически жесткой, кривая 2 – акустически мягкой, кривая 3 – полностью поглощающей поверхности освещенной стороны барьера. Для указанных трех вариантов величина удельного (на единицу площади) и нормированного к величине ρc импеданса освещенной поверхности барьера равна соответственно $Z = \infty$, $Z = 0$ и $Z = 1$.

Кривая 1 на рис. 4 фактически определяет потенциальные возможности классического барьера с акустически жесткими поверхностями. На ней условно можно выделить три участка: первый – область очень низких частот (до 30 Гц), второй – низкие частоты (от 30 до 120 Гц), третий – средние и высокие частоты (свыше 120 Гц). На первом участке с понижением частоты кривая круто идет вверх, характеризуя факт существенного снижения шумозащитных свойств барьера в этой области. Это является следствием малой волновой высоты барьера. На втором участке при наличии сильных осцилляций с ростом частоты происходит довольно быстрое уменьшение величины G . На третьем участке с дальнейшим повышением частоты кривая 1, осциллируя, приближается к некоторому значению коэффициента G , определяемому согласно геометрической теории дифракции.

Кривая 3, по сути, соответствует максимально возможным значениям энергетического коэффициента G для барьера с поглощающей поверхностью. Как видно, для частот выше 30 Гц барьер становится практически звуконепрозрачным. На участке очень низких частот (ниже 30 Гц) кривая 3 также круто уходит вверх, однако в этом диапазоне частот наблюдается существенное улу-

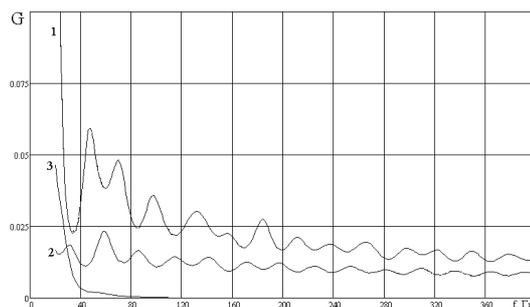


Рис. 4. Частотная зависимость энергетического коэффициента G для случая акустически идеальной поверхности освещенной стороны барьера:

1 – акустически жесткая; 2 – акустически мягкая;
3 – полностью поглощающая

чшение шумозащитных свойств по сравнению с акустически жестким барьером.

Ход кривой 2, которая соответствует акустически мягкой поверхности освещенной стороны барьера, отличается от кривых 1 и 3 – она занимает среднее положение между этими зависимостями, сохраняя даже в области очень низких частот приблизительно постоянное значение коэффициента G . Такие свойства барьера обусловлены тем, что фаза отраженной от акустически мягкой стенки волны сдвинута на 180° по отношению к падающей волне. В силу этого их взаимодействие приводит к тому, что на поверхности барьера давление становится равным нулю, а в непосредственной близости от него существенно снижается. Как следствие повышается общая эффективность барьера. Конечно, такой результат очень желателен, однако создать акустически мягкую поверхность в воздушной среде в широком диапазоне частот не представляется возможным. Поэтому кривая 2 служит скорее неким ориентиром, чем моделью реально конструируемых барьеров. Вместе с этим, ниже будет показано, что акустически “мягкую” стенку все же можно реализовать (по крайней мере, для некоторого диапазона частот).

Очевидный интерес представляет выяснение того, в какой степени изменятся значения коэффициента G , если идеально поглощающий материал располагается не на всей поверхности освещенной стороны барьера, а только на некоторой ее части (при этом остальная часть остается акустически жесткой). Ответ на данный вопрос дают результаты расчетов, представленные на рис. 5. Здесь кривая 1 соответствует полному покрытию освещенной стороны барьера, а кривые 2–4 – разным степеням частичного покрытия. При этом поглотитель размещается в верхней части поверхно-

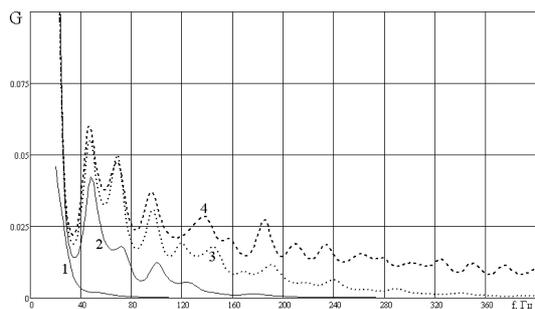


Рис. 5. Частотная зависимость энергетического коэффициента G для случаев, когда идеальный поглощающий материал располагается на некоторой части поверхности освещенной стороны барьера, начиная от его верхней кромки $y=h$ (в долях площади поверхности):
 1 – 100 %; 2 – 50 %; 3 – 25 %; 4 – 10 %

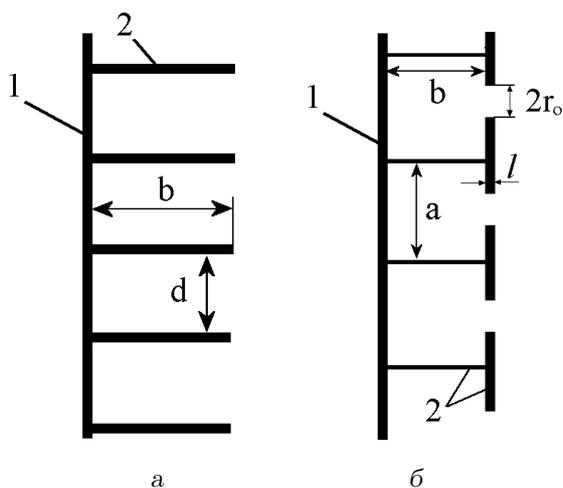


Рис. 6. Модели конструкций поглощающего покрытия:

- 1 – акустически жесткая поверхность барьера,
- 2 – стенки резонаторов;
- а – решетка четвертьволновых резонаторов,
- б – решетка резонаторов Гельмгольца

сти барьера, начиная от его верхней кромки $y=h$. Как видно из графиков, покрытие на 50 % (кривая 2) все еще существенно улучшает шумозащитные свойства барьера практически во всем рассматриваемом диапазоне частот по сравнению с акустически жесткой поверхностью конструкции (ср. с кривой 1 на рис. 4). Покрытие на 25 % (кривая 3) дает улучшение шумозащитных свойств в области относительно высоких частот (выше 120 Гц). Что касается покрытия на 10 % (кривая 4), то его ожидаемая эффективность незначительна. Таким образом, представленные на рис. 4 и 5 данные, позволяют сделать важный вывод, со-

гласно которому шумозащитные свойства барьера действительно можно существенно улучшить, покрывая поглотителем не менее, чем (25...50) % поверхности его освещенной стороны.

Выше были проанализированы шумозащитные свойства экранов при наличии покрытия, которое полностью поглощает звук вне зависимости от его частоты. Конечно, важно провести подобные исследования для моделей поглощающих покрытий, более близких к реальным конструкциям. Две из таких моделей показаны на рис. 6. Обратимся к первой из них (см. рис. 6, а), которая представляет собой решетку четвертьволновых резонаторов [7, 8]. Можно предположить, что эта модель должна соответствовать реальному барьеру, фотография которого дана на рис. 1, б. Удельный и нормированный к величине ρc импеданс такой конструкции имеет вид [5]

$$Z = \frac{r}{\rho c} + i \operatorname{ctg} \left(\frac{\omega b}{c} \right), \quad (13)$$

где коэффициент r определяет потери звуковой энергии внутри конструкции; b – глубина резонатора. Заметим, что представление (13) имеет смысл в области частот, для которых размер d (см. рис. 6, а) меньше половины длины звуковой волны.

На частоте основного резонанса конструкции (рис. 6, а), т.е. когда величина b составляет четверть длины звуковой волны, давление в плоскости входного сечения резонаторов практически равно нулю (при $r=0$ имеет место точное равенство). Таким образом, данная конструкция на резонансной частоте реализует ситуацию, близкую к падению волны на акустически мягкую поверхность, рассмотренную выше.

На рис. 7 представлены частотные зависимости энергетического коэффициента G для ситуаций, когда поглощающее покрытие выполнено в виде четвертьволновых резонаторов (рис. 6, а). Здесь кривая 1 соответствует акустически жесткой поверхности, а кривые 2 и 3 – конструкции в виде решетки резонаторов, покрывающей всю освещенную сторону экрана. При этом для кривой 2 глубина резонатора $b=0.25$ м, а для кривой 3 – $b=0.5$ м. Соответствующие таким размерам резонансные частоты равны примерно 330 и 165 Гц. При этом нормированный коэффициент потерь полагался $r/(\rho c)=0.1$. Как видно из графика, каждая из конструкций четвертьволновых резонаторов в достаточно широком диапазоне частот уменьшает величину G примерно вдвое по сравнению с акустически жестким барьером. Естественно, область этих частот зависит от глубины резонатора b .

Теперь обратимся ко второй модели поглощающего покрытия в виде решетки из резонаторов Гельмгольца (рис. 6, б), считая, что они также располагаются на всей поверхности освещенной стороны экрана. Можно предположить, этот случай соответствует реальному барьеру, фотография которого дана на рис. 1, в. Технические характеристики и особенности конструктивного решения звукопоглощающих плит на основе использования резонаторов Гельмгольца можно найти, например, на электронных страницах [9, 10].

Параметры отдельно взятого резонатора Гельмгольца зависят от его геометрических размеров, а именно, глубины b и ширины a камеры резонатора, диаметра $2r_0$ и длины l горла резонатора (полагаем, что сечение горла резонатора – круг, площадь которого $\sigma = \pi r_0^2$, а сечение камеры – квадрат с площадью $S = a^2$). Определив эти величины, можно записать формулы [11, 12] для собственной частоты резонатора Гельмгольца в воздухе:

$$f_0 \approx \frac{93r_0}{a\sqrt{b(l + \Delta l)}} \quad (14)$$

и импеданса, выраженного в долях ρc и рассчитанного на единицу площади основания камеры резонатора ($S = a^2$):

$$Z = \frac{n\tilde{r}}{\rho c} + i \left[\operatorname{ctg} \left(\frac{\omega b}{c} \right) - \frac{\omega n}{c} (l + \Delta l) \right]. \quad (15)$$

Здесь \tilde{r} – коэффициент трения в некоторых элементах конструкции резонатора Гельмгольца (обычно это мелкая сетка или ткань, которая размещается у горла резонатора [12]); $n = S/\sigma$. Величина $\Delta l = \pi r_0/2$ обусловлена наличием так называемой присоединенной массы на концах горла резонатора.

Очевидно, что, меняя геометрические и физические параметры конструкции резонатора, можно получить модели барьера с различными частотными характеристиками энергетического коэффициента G . На рис. 8 показаны три варианта расчета такого барьера (кривые 2–4). При этом в расчетах неизменными оставались диаметр горла резонатора $2r_0$, ширина камеры a и коэффициент трения \tilde{r} . В качестве переменных параметров были выбраны глубина камеры резонатора b и длина горла l . При этом с ростом номера кривых глубина камеры b увеличивается, а длина горла l уменьшается. Это приводит к одновременному уменьшению эквивалентной упругости и массы резонатора Гельмгольца, вследствие чего остаются близкими собственные частоты резонатора, но существенно изменяется его добротность.

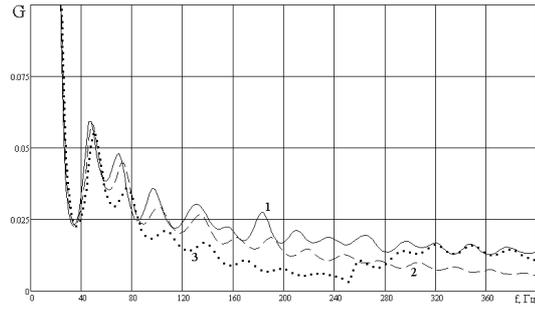


Рис. 7. Частотная зависимость энергетического коэффициента G для случаев, когда вся поверхность освещенной стороны экрана выполнена в виде решетки из четвертьволновых резонаторов (коэффициент потерь $r/(\rho c) = 0.1$):

1 – поверхность барьера акустически жесткая;
2 – $b = 0.25$ м; 3 – $b = 0.5$ м

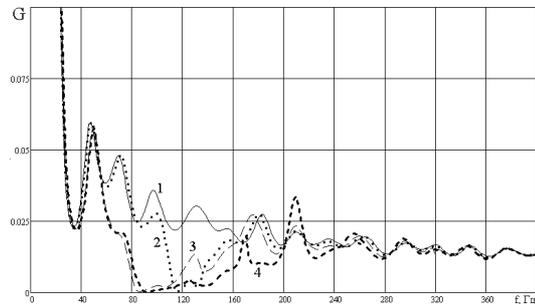


Рис. 8. Частотная зависимость энергетического коэффициента G для случаев, когда на всей поверхности освещенной стороны барьера располагается решетка резонаторов Гельмгольца ($a = 0.05$ м, $2r_0 = 4 \cdot 10^{-3}$ м, $\tilde{r} = 2$):

1 – поверхность барьера акустически жесткая;
2 – $b = 0.08$ м, $l = 10^{-2}$ м, $f_0 = 115$ Гц;
3 – $b = 0.32$ м, $l = 2.5 \cdot 10^{-3}$ м, $f_0 = 88$ Гц;
4 – $b = 0.40$ м, $l = 5 \cdot 10^{-4}$ м, $f_0 = 97$ Гц

На кривых 2–4 наблюдается значительное снижение коэффициента G для определенного диапазона частот в окрестности собственной частоты резонатора Гельмгольца. При этом кривая 2 отвечает наиболее узкополосной, а кривая 4 – наиболее широкополосной конструкции. Следует отметить, что, как показывают расчеты, стремление к расширению полосы эффективной шумозащиты может привести к существенной неравномерности в частотной характеристике коэффициента G на некоторых частотах (см. кривую 4). Таким образом, если нам известна полоса частот, где наблюдается интенсивный шум, то рационально применять решетки из резонаторов, частота резонанса которых располагается в ее середине.

В заключение заметим, что рассмотренный под-

ход к решению задачи о рассеянии звука на барьере, одна стенка которого характеризуется некоторым импедансом, может быть легко обобщен на случай, когда поверхности обеих стенок барьера (освещенной и теневой) носят импедансный характер, в том числе и отличающийся друг от друга. Для этого достаточно в выражение (4) добавить слагаемое в виде ряда, аналогичного второму ряду в (3) и, соответственно, в систему функциональных уравнений (5)–(8) ввести дополнительное уравнение, аналогичное соотношению (7), но уже для поля p_{II} .

ВЫВОДЫ

1. Решена задача о дифракции звуковых волн на шумозащитном барьере, поверхность освещенной стенки которого носит импедансный характер (в том числе, акустически жесткий, акустически мягкий, идеально поглощающий или резонансный).
2. Получены численные результаты для широкого диапазона частот, проведен их анализ и установлены связи между характером импеданса освещенной стенки барьера и шумозащитными свойствами барьера. В частности, установлено, что максимальной эффективностью обладает барьер, освещенная стенка которого полностью поглощает звуковые волны. Менее эффективен барьер с акустически мягкой стенкой, а за ним следует барьер с акустически жесткой стенкой. Показано, что частичное покрытие стенки идеальным поглотителем звука способствует повышению эффективности барьера, однако площадь покрытия должна быть не менее 25 % от площади стенки.
3. Исследована эффективность барьера в случае, когда импеданс поверхности освещенной

стенки имеет резонансный характер. В частности, рассмотрены две конструктивные схемы, используемые на практике: покрытие в виде решетки из четвертьволновых резонаторов и решетки из резонаторов Гельмгольца. Установлено, что при рациональном выборе параметров таких решеток удается повысить эффективность барьера в полосе частот до одной октавы и более.

1. May D. N., Osman M. M. Highway noise barriers: New shapes // J. Sound Vib.– 1980.– 71.– P. 73–101.
2. Осипов Г. Л., Юдин Е. Я., Хюбнер Г., Сергеев М. В. и др. Снижение шума в зданиях и жилых районах.– М.: Стройиздат, 1987.– 558 с.
3. Вовк И. В., Мацьпура В. Т., Сотникова Т. А. Об одном методе повышения эффективности шумоподавляющих барьеров // Акуст. вісн.– 2006.– 9, № 2.– С. 17–26.
4. Вовк И. В., Конченко Т. А., Мацьпура В. Т. Об одном строгом методе оценки акустических свойств шумоподавляющих барьеров // Акуст. вісн.– 2004.– 7, № 4.– С. 21–27.
5. Грінченко В. Т., Вовк І. В., Мацьпура В. Т. Основы акустики.– К.: Наук. думка, 2007.– 640 с.
6. Вовк И. В., Сотникова Т. А. Интегральные акустические характеристики V-образного шумоподавляющего барьера // Акуст. вісн.– 2007.– 10, № 3.– С. 25–29.
7. Севрюгова Н. В. Звуковое поле вблизи плоской периодической структуры с импедансными полосами // Акуст. ж.– 1981.– 27, № 1.– С. 138–142.
8. Шестопалов В. П., Литвиненко Л. Н., Масалов С. А., Сологуб В. Г. Дифракция волн на решетках.– Харьков: Изд-во Харьков. ун-та, 1973.– 287 с.
9. Звукоизоляция и акустика помещений [электронный ресурс]. Режим доступа к сайту: <http://acoustic.ua>.
10. SDL – Гуртово-роздрібна торгівельна компанія [электронный ресурс]. Режим доступа к сайту: <http://www.sdl.net.ua>.
11. Ржевкин С. Н. Курс лекций по теории звука.– М.: Изд-во МГУ, 1960.– 336 с.
12. Фурдуев В. В. Электроакустика.– М.-Л.: ОГИЗ, 1948.– 516 с.