

УДК 534.1

ШУМОЗАЩИТНЫЕ СВОЙСТВА БАРЬЕРОВ, РАЗМЕЩЕННЫХ ВДОЛЬ ГОРОДСКОЙ УЛИЦЫ

И. В. ВОВК^{1*}, В. Т. ГРИНЧЕНКО¹, В. Т. МАЦЫПУРА²

¹Институт гидромеханики НАН Украины, Киев
ул. Желябова, 8/4, 03680, ГСП, Киев-180, Украина
*E-mail: ivovk@voliacable.com

²Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко
ул. Владимирская, 64/13, 01601, ГСП, Киев, Украина

Получено 14.08.2011

Исследованы шумозащитные свойства барьеров, размещенных на краях тротуаров вдоль обеих сторон городской улицы с многоэтажными домами. Шум транспортного потока моделировался источником звука в виде бесконечной пульсирующей полосы, расположенной на проезжей части улицы. Рассмотрены барьеры с акустически жесткими и звукопоглощающими стенками. В качестве критерия, характеризующего шумозащитные свойства барьеров, выбрано усредненное давление на окнах зданий. Показано, что для барьеров с акустически жесткими поверхностями характерно появление ряда резонансных явлений в областях между барьерами, между домами, а также между барьерами и домами. Таким образом, установка жестких барьеров не приводит к существенному повышению шумозащитности окон домов и зон тротуаров. В отличие от этого, использование барьеров с поглощающими поверхностями ослабляет резонансные явления и тем самым существенно улучшает шумозащитность указанных зон.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: шумозащитный барьер, шумозащитность, импеданс, резонатор Гельмгольца, метод частичных областей

Досліджено шумозахисні властивості бар'єрів, розміщених уздовж обох боків міської вулиці з багатоповерховими будинками. Шум транспортного потоку моделювався джерелом звуку у вигляді нескінченної пульсуючої смуги, розташованої на проїжджій частині вулиці. Розглянуто бар'єри з акустично жорсткими й звукопоглинаючими стінками. За критерій, який би характеризував шумозахисні властивості бар'єрів, вибрано усереднений тиск на вікнах будинків. Показано, що для бар'єрів з акустично жорсткими поверхнями характерна поява ряду резонансних явищ у областях між бар'єрами, між будинками, а також між бар'єрами й будинками. Таким чином, встановлення жорстких бар'єрів не призводить до істотного підвищення шумозахисності вікон будинків і зони тротуарів. На відміну від цього, використання бар'єрів з поглинаючими поверхнями ослаблює резонансні явища і тим самим істотно поліпшує шумозахисність вказаних зон.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: шумозахисний бар'єр, шумозахисність, імпеданс, резонатор Гельмгольца, метод частинних областей

The paper deals with studying the properties of soundproof barriers placed at sidewalk edges the along both sides of a city street with tall buildings. Traffic noise was modeled by a sound source in the form of endless pulsating band located on the roadway. The barriers with the acoustically hard and sound-absorbing walls are considered. An average pressure on the windows of buildings is selected as a criterion for characterizing the properties of soundproof barriers. Typical occurrence of numerous resonance phenomena in the regions between the barriers, between the buildings, as well as between the barriers and buildings is shown for the barriers with the acoustically hard surfaces. Thus, the installation of the hard barriers does not lead to significant increasing of soundproof for the windows and sidewalk zones. In contrast, when using the barriers with sound-absorbing surfaces, the resonance phenomena are attenuated that significantly improves the soundproofing of the mentioned zones.

KEY WORDS: noise barrier, soundproof, impedance, the Helmholtz resonator, method of partial domains

ВВЕДЕНИЕ

Транспорт на городских улицах – наиболее распространенный и интенсивный источник шума в крупных городах [1–7]. Вклад потоков легкового и грузового автотранспорта в акустическое загрязнение улиц составляет от 60 до 80 %, в зависимости от покрытия проезжей части улиц (асфальт или брусчатка), скорости движения, интенсивности и состава потока [7]. Поэтому в районах, где дома плотно стоят вблизи проезжей части улицы, люди оказываются под воздействием повышенно-

го уровня шума как на тротуарах, так и в помещениях, окна которых выходят на улицу. В силу специфики городских условий вопрос шумозащитности тротуаров и окон зданий, расположенных вдоль городской улицы, существенно отличается от условий вне города, где жилые объекты могут быть размещены достаточно далеко от транспортных магистралей, и требует отдельного детального рассмотрения. Поскольку эта проблема в последние годы становится все более актуальной, в современной научной литературе стали появляться работы, посвященные обеспечению защиты от

шумов, возникающих на улицах [2, 3, 6, 7]. Среди них особого внимания заслуживают статьи [2, 3], в которых представлены попытки теоретически и с помощью модельных экспериментов оценить возможность снижения транспортных шумов с помощью классических жестких барьеров, устанавливаемых на краях тротуаров. К сожалению, однозначного ответа на вопрос о целесообразности подобных мероприятий указанные исследования не дали. Вместе с тем, в них показано, что в зонах тротуаров и на стенах фасадов домов частотные зависимости звукового давления шума, создаваемого транспортом, имеют резко осциллирующий характер с перепадами, достигающими 60 дБ.

Цель данной работы состоит в разработке физической и математической моделей улицы с домами, на которой могут присутствовать барьеры и источники звука, а также в построении строгого эффективного метода расчета акустических полей, возникающих в пространстве между домами. На базе полученных количественных данных предполагается провести анализ эффективности барьеров как средства защиты от шума тротуаров и жилых домов в условиях городских улиц с плотной застройкой.

1. ПРИНЯТЫЕ ФИЗИЧЕСКАЯ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛИ

На рис. 1 изображена принятая нами физическая модель типичной городской улицы с плотной застройкой, вдоль которой с обеих сторон расположены шумозащитные барьеры. Здесь акустически жесткая поверхность $y=0$, $x=[0, a+b+c]$ моделирует поверхности тротуаров и проезжей части. Улица ограничена домами, фасады также будем описывать акустически жесткими поверхностями $x=0$, $y=[0, H] \cup x=[-\infty, 0]$, $y=H$ и $x=a+b+c$, $y=[0, H] \cup x=[a+b+c, \infty]$, $y=H$. В целом геометрию модели считаем не зависящей от направления, перпендикулярного к плоскости рисунка. В плоскостях $x=b$ и $x=a+b$ установлены два барьера высотой h . Поверхности между домами и барьерами $x=[0, b]$, $y=0$ и $x=[a+b, a+b+c]$, $y=0$ моделируют тротуар. Поверхность между барьерами $x=[b, a+b]$, $y=0$ представляет собою проезжую часть улицы. На ней задан источник звука S , имеющий вид бесконечной пульсирующей полосы шириной $a_2 - a_1$, которая моделирует шумящий транспортный поток. Полупространство $y > 0$ заполнено воздушной средой с плотностью ρ и скоростью звука c_s . Пусть обращенные к источнику S (освещенные) поверхности барьеров характеризуются некоторой комплексной проводимостью Y , а

теневые поверхности барьеров – акустически жесткие. Здесь следует напомнить, что для идеальной акустически жесткой поверхности проводимость равна нулю ($Y=0$), а для идеально поглощающей поверхности $Y=1$ [11].

Описанная физическая модель с математической точки зрения эквивалентна плоской задаче, когда звуковое поле не зависит от координаты, перпендикулярной к плоскости рисунка. Принятые допущения об акустически жестких поверхностях означают, что нормальные составляющие колебательных скоростей на них равны нулю. Задание импеданса на освещенных поверхностях барьеров дает возможность точнее моделировать акустические свойства реальных конструкций.

Для гармонического источника искомое поле давления удовлетворяет уравнению Гельмгольца. Временная зависимость выбрана в виде $\exp(-i\omega t)$ и ниже этот множитель везде будет опущен.

Представленная математическая модель, с одной стороны, в общих чертах адекватна ситуациям, характерным для городских условий, а с другой, – позволяет построить аналитическое решение и соответствующий ему эффективный вычислительный алгоритм.

2. ПОСТРОЕНИЕ АНАЛИТИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Введем декартову систему координат (x, y) с центром в точке O и полярную систему координат (r, θ) с центром в точке O_1 (см. рис. 1). Как известно, связь между координатами некоторой точки M в двух указанных системах имеет вид

$$\begin{aligned} x &= r \cos \theta + d, \\ y &= r \sin \theta + H, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} r &= \sqrt{(x-d)^2 + (y-H)^2}, \\ \cos \theta &= \frac{x-d}{r}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $d=b+a/2$.

Решение задачи будем строить на базе метода частичных областей, который ранее успешно применялся для изучения шумозащитных свойств барьеров [8–10]. В соответствии с идеей этого метода всю область существования звукового поля разобьем на шесть подобластей (рис. 1):

- область I представляет собой пространство между барьерами 2 и 3 – $b \leq x \leq a+b$, $0 \leq y \leq h$;

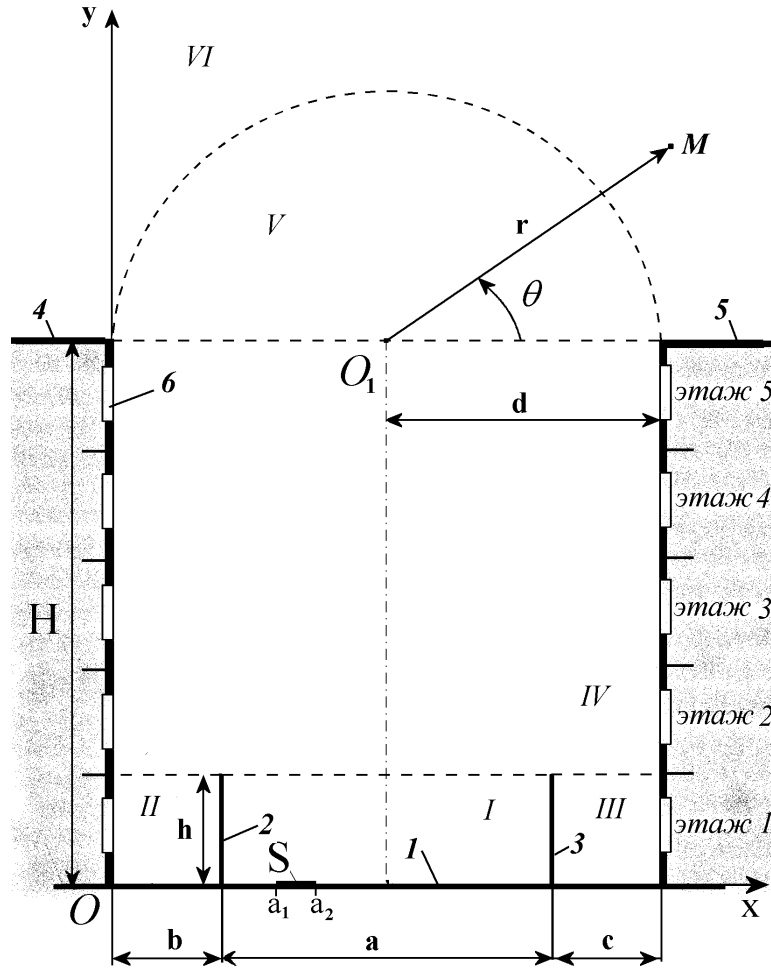


Рис. 1. Геометрия модели:

1 – поверхность тротуаров и проезжей части улицы;
2, 3 – барьеры; 4, 5 – дома; 6 – окна

- область II – пространство между домом 4 и барьером 2 слева от дороги – $0 \leq x \leq b$, $0 \leq y \leq h$;
- область III – пространство между домом 5 и барьером 3 справа от дороги – $a+b \leq x \leq a+b+c$, $0 \leq y \leq h$;
- область IV – пространство между домами – $0 \leq x \leq a+b+c$, $h \leq y \leq H$;
- область V ограничена поверхностями $0 \leq x \leq a+b+c$, $y = H$ и $r = d$, $0 \leq \theta \leq \pi$;
- область VI – $r \geq d$, $0 \leq \theta \leq \pi$.

Такое разбиение позволяет построить в каждой из подобластей общее аналитическое решение соответствующей граничной задачи.

Так, поле в области I следует представить в таком виде, чтобы иметь возможность удовлетворить:

- граничным условиям на поверхности проезжей части $b \leq x \leq a+b$, $y = 0$;
- импедансным условиям на поверхностях барьеров;
- условиям сопряжения звуковых полей на поверхности $b \leq x \leq a+b$, $y = H$.

Указанные условия могут быть выполнены, если искомое поле представить в виде суперпозиции нормальных волн двух плоскопараллельных волноводов с жесткими поверхностями шириною a и

h соответственно:

$$\begin{aligned}
 p_I = & \sum_{n=0}^{\infty} A_n \cos(\beta_n^{(1)}(x-b)) \exp(i\gamma_n^{(1)}y) + \\
 & + \sum_{n=0}^{\infty} A_n^{(1)} \cos(\beta_n^{(1)}(x-b)) \times \\
 & \times \exp(-i\gamma_n^{(1)}(y-h)) + \quad (3) \\
 & + \sum_{n=0}^{\infty} A_n^{(2)} \cos(\beta_n^{(2)}y) \exp(i\gamma_n^{(2)}(x-b)) + \\
 & + \sum_{n=0}^{\infty} A_n^{(3)} \cos(\beta_n^{(2)}y) \exp(-i\gamma_n^{(2)}(x-a-b)).
 \end{aligned}$$

Здесь

$$\begin{aligned}
 \beta_n^{(1)} = \frac{n\pi}{a}; \quad \gamma_n^{(1)} = \sqrt{k^2 - (\beta_n^{(1)})^2}; \\
 \beta_n^{(2)} = \frac{n\pi}{h}, \quad \gamma_n^{(2)} = \sqrt{k^2 - (\beta_n^{(2)})^2}; \quad (4)
 \end{aligned}$$

$k = \omega/c$. Граничное условие на поверхности проезжей части ($b \leq x \leq a+b, y=0$) имеет вид

$$\frac{1}{i\omega\rho} \frac{\partial p_I}{\partial y} \Big|_{y=0} = V(x), \quad (5)$$

где $V(x)$ – функция, задающая распределение амплитуды колебательной скорости поверхностях источника S и проезжей части улицы:

$$V(x) = \begin{cases} v_0, & x \in [a_1, a_2], \\ 0, & x \in [b, a_1] \cup [a_2, b+a]. \end{cases}$$

Подставив выражение (3) в граничное условие (5), определим связь между коэффициентами A_n и $A_n^{(1)}$:

$$A_n = A_n^{(1)} \exp(i\gamma_n^{(1)}h) + \frac{\rho c V_n}{a \delta_n \gamma_n^{(1)}}, \quad (6)$$

где $\delta_0 = 1, \delta_n = 0.5$ при $n > 0$;

$$V_n = \int_0^a V(x) \cos(\beta_n^{(1)}x) dx. \quad (7)$$

С учетом формулы (6) выражение (3) для поля в

области I примет вид

$$\begin{aligned}
 p_I = & \sum_{n=0}^{\infty} A_n^{(1)} \cos(\beta_n^{(1)}(x-b)) \times \\
 & \times [\exp(i\gamma_n^{(1)}(y+h)) + \exp(-i\gamma_n^{(1)}(y-h))] + \\
 & + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\rho c V_n}{a \delta_n \gamma_n^{(1)}} \cos(\beta_n^{(1)}(x-b)) \exp(i\gamma_n^{(1)}y) + \quad (8) \\
 & + \sum_{n=0}^{\infty} A_n^{(2)} \cos(\beta_n^{(2)}y) \exp(i\gamma_n^{(2)}(x-b)) + \\
 & + \sum_{n=0}^{\infty} A_n^{(3)} \cos(\beta_n^{(2)}y) \exp(-i\gamma_n^{(2)}(x-a-b)).
 \end{aligned}$$

Таким образом, благодаря должному выбору коэффициентов $A_n^{(2)}$ и $A_n^{(3)}$ можно выполнить импедансные условия на поверхностях барьеров, а подходящий набор коэффициентов $A_n^{(1)}$ позволяет удовлетворить условия сопряжения звуковых полей на границах областей I и II.

Поле давления в области II запишем как

$$\begin{aligned}
 p_{II} = & \sum_{n=0}^{\infty} A_n^{(4)} \cos(\beta_n^{(3)}x) \exp(i\gamma_n^{(3)}y) + \\
 & + \sum_{n=0}^{\infty} \tilde{A}_n^{(4)} \cos(\beta_n^{(3)}x) \exp(-i\gamma_n^{(3)}(y-h)), \quad (9)
 \end{aligned}$$

где $\beta_n^{(3)} = n\pi/b; \gamma_n^{(3)} = \sqrt{k^2 - (\beta_n^{(3)})^2}$. Расписав граничное условие

$$\frac{\partial p_{II}}{\partial y} = 0, \quad x \in [0, b], \quad y = 0, \quad (10)$$

найдем соотношение $\tilde{A}_n^{(4)} = A_n^{(4)} \exp(-i\gamma_n^{(3)}h)$, с учетом которого выражение (9) примет вид

$$\begin{aligned}
 p_{II} = & \sum_{n=0}^{\infty} A_n^{(4)} \cos(\beta_n^{(3)}x) \times \\
 & \times \frac{\exp(i\gamma_n^{(3)}(y+h)) + \exp(-i\gamma_n^{(3)}(y-h))}{1 + \exp(2i\gamma_n^{(3)}h)}. \quad (11)
 \end{aligned}$$

Аналогично поле в области III можно записать так:

$$\begin{aligned}
 p_{III} = & \sum_{n=0}^{\infty} A_n^{(5)} \cos(\beta_n^{(3)}(x-a-b)) \times \\
 & \times \frac{\exp(i\gamma_n^{(3)}(y+h)) + \exp(-i\gamma_n^{(3)}(y-h))}{1 + \exp(2i\gamma_n^{(3)}h)}. \quad (12)
 \end{aligned}$$

Поле в области IV имеет вид, схожий с выражением (9):

$$p_{IV} = \sum_{n=0}^{\infty} A_n^{(6)} \cos(\beta_n^{(4)} x) \exp(i\gamma_n^{(4)}(y-h)) + \sum_{n=0}^{\infty} \tilde{A}_n^{(7)} \cos(\beta_n^{(4)} x) \exp(-i\gamma_n^{(4)}(y-h)), \quad (13)$$

где $\beta_n^{(4)} = n\pi/(a+b+c)$; $\gamma_n^{(4)} = \sqrt{k^2 - (\beta_n^{(4)})^2}$.

Поле в области V представим в форме

$$p_V = \sum_{n=0}^{\infty} A_n^{(8)} \cos(\beta_n^{(4)} y) \times \exp(i\gamma_n^{(4)}(x-H)) + \sum_{n=0}^{\infty} A_n^{(9)} \frac{J_n(kr)}{J'_n(kd)} \cos(n\theta). \quad (14)$$

Здесь первая сумма представляет собой суперпозицию нормальных волн плоскопараллельного волновода шириною $(a+b+c)$. Она обеспечит сопряжение звуковых полей на границах областей IV и V. Вторая сумма – это совокупность частных решений уравнения Гельмгольца для области в виде полукруга радиуса d . При должном выборе коэффициентов $A_n^{(9)}$ она позволяет удовлетворить условия сопряжения полей на границе раздела областей V и VI.

Наконец, поле в области VI имеет вид

$$p_{VI} = \sum_{n=0}^{\infty} A_n^{(10)} \frac{H_n^{(1)}(kr)}{H_n^{(1)}(kd)} \cos(n\theta). \quad (15)$$

Теперь сформируем систему функциональных уравнений, которая определяет условия непрерывности звукового поля на границах раздела областей I, II, III, IV, V, VI и граничные условия на поверхностях барьеров (при $y=h$):

$$p_{IV} = \begin{cases} p_{II}, & x \in [b, a+b], \\ p_I, & x \in [0, b], \\ p_{III}, & x \in [a+b, a+b+c], \end{cases} \quad (16)$$

$$\frac{\partial p_{IV}}{\partial y} = \begin{cases} \frac{\partial p_I}{\partial y}, & x \in [b, a+b], \\ \frac{\partial p_{II}}{\partial y}, & x \in [0, b], \\ \frac{\partial p_{III}}{\partial y}, & x \in [a+b, a+b+c], \end{cases} \quad (17)$$

$$p_{IV} = p_V, \quad x = [0, a+b+c], \quad y = H, \quad (18)$$

$$\frac{\partial p_{IV}}{\partial y} = \frac{\partial p_V}{\partial y}, \quad x = [0, a+b+c], \quad y = H, \quad (19)$$

$$p_V = p_{VI}, \quad r = d, \quad \theta = [0, \pi], \quad (20)$$

$$\frac{\partial p_V}{\partial r} = \frac{\partial p_{VI}}{\partial r}, \quad r = d, \quad \theta = [0, \pi], \quad (21)$$

$$\frac{1}{i\omega\rho} \frac{\partial p_I}{\partial x} = -Y p_I, \quad x = b, \quad y = [0, h], \quad (22)$$

$$\frac{1}{i\omega\rho} \frac{\partial p_I}{\partial x} = Y p_I, \quad x = a+b, \quad y = [0, h]. \quad (23)$$

После подстановки выражений (8), (11), (12)–(15) в систему (16)–(23) проведем стандартную процедуру алгебраизации полученных функциональных уравнений, как это делалось, например, в [8–10]. Это позволяет прийти к бесконечной системе линейных алгебраических уравнений второго рода относительно неизвестных коэффициентов $A_n^{(1)}, \dots, A_n^{(10)}$. Отметим, что в нашей задаче основной интерес представляют характеристики поля вдали от ребер барьеров. Как показывают многочисленные исследования, в таких случаях достаточную точность численных результатов можно обеспечить с помощью метода простой редукции, удерживая в системе определенное количество неизвестных [10]. Как обычно, оно определяется опытным путем, на основе анализа невязки при выполнении условий сопряжения на границе раздела частичных областей и закона сохранения энергии звукового поля. Опуская эти подробности, отметим, что в целом удовлетворительные с практической точки зрения результаты для исследуемой задачи можно получить при общем количестве неизвестных комплексных коэффициентов от 350 до 600 для диапазона частот источника звука от 30 до 1000 Гц.

3. АНАЛИЗ РАСЧЕТНЫХ ДАННЫХ

Зададим следующие геометрические параметры рассматриваемой модели (см. рис. 1): высота барьера – $h=4$ м, ширина проезжей части $a=12$ м, ширина пешеходных тротуаров слева и справа от дороги одинакова и составляет $b=c=4$ м, полоса,

моделирующая источник шума S , задается координатами $a_1 = 5$ м и $a_2 = 7$ м. Амплитуда скорости источника звука – $v_0 = 1$ м/с. Высота пятиэтажного дома $H = 19$ м, а высота каждого из окон принята равной 2 м. При этом нижний уровень окон относительно поверхности тротуара для каждого из этажей составляет 2; 5.5; 9; 12.5 и 16 м соответственно. В качестве параметров воздушной среды были выбраны плотность $\rho = 1.27$ кг/м³ и скорость звука $c_s = 331.3$ м/с.

Прежде всего, рассмотрим, как соотносятся уровни звуковых давлений в некоторых характерных точках пространства между домами в зависимости от наличия или отсутствия барьеров, поверхности которых предполагаются акустически жесткими. В качестве критерия будем использовать отношение [2]:

$$\Delta L[\text{дБ}] = 20 \lg \left(\frac{|p_1(x_j, y_j)|}{|p_2(x_j, y_j)|} \right), \quad (24)$$

где $|p_1|$ – амплитуда давления в некоторой точке с координатами x_j, y_j при отсутствии барьеров; $|p_2|$ – давление в той же точке при наличии барьеров.

Следует отметить, что для проведения расчетов в случае отсутствия барьеров следует упростить исходную задачу, а именно, исключить области I, II и III (см. рис. 1) и соответствующие им поля (8), (11) и (12). Кроме того, необходимо исключить условия сопряжения полей (16), (22) и (23), а также заменить условие (17) на следующее соотношение при $y = 0$:

$$\frac{1}{i\omega\rho} \frac{\partial p_{IV}}{\partial y} = \begin{cases} v_0, & x \in [a_1, a_2], \\ 0, & x \in [0, a_1] \cup [a_2, b + a + c]. \end{cases}$$

Существует и альтернативный подход. Достаточно устремить высоту барьеров к нулю таким образом, чтобы выполнялись условия $h \neq 0$ и $h/\lambda \ll 1$, где λ – длина волны. Сравнение расчетов, проведенных в рамках обеих описанных моделей, показало, что уже при $h/\lambda \leq 0.1$ их результаты совпадают до четвертого знака.

На рис. 2 представлены частотные зависимости величины ΔL для двух точек на фасаде левого дома (см. рис. 1). Сравнивая их с аналогичными графиками, приведенными в работе [2], отметим хорошее качественное и количественное соответствие. Главная черта представленных кривых – их достаточно беспорядочный, резко осциллирующий характер с перепадами давления, достигающими (50...60) дБ. Конечно, при частотном усреднении становится заметно, что в определенных поддиа-

пазонах наличие барьеров действительно способствует некоторому уменьшению давления в рассматриваемых точках (примерно на (5...10) дБ).

Очевидно, что в силу своего локального характера выражение (24) не дает возможности оценивать интегральную эффективность барьеров, как это было сделано, например, в [8, 9]. Поэтому мы будем считать наиболее важным заданием шумозащиту окон зданий, поскольку именно через них шум проникает в офисные и жилые помещения. Тогда для оценки воздействия шума на поверхность окон вполне логично использовать параметр, представляющий собой усредненное по поверхности окон звуковое давление, отнесенное к объемной скорости источника:

$$J = \frac{1}{S'_0 v_0 (a_2 - a_1)} \int_{S'} |p| dS'. \quad (25)$$

Здесь интегрирование проводится по поверхности окна S' (естественно, для плоской задачи – на единицу его ширины); S'_0 – площадь окна; $v_0(a_2 - a_1)$ – объемная колебательная скорость источника. Очевидно, что преимущественный интерес будет представлять зависимость параметра J от частоты для окон разных этажей.

Для начала рассмотрим тестовую ситуацию, когда барьеры отсутствуют. На рис. 3, а представлены частотные зависимости параметра J для окон дома, стоящего слева от барьеров, а на рис. 3, б – для дома, стоящего справа от барьеров. Как видно из графиков, эти кривые изобилуют резкими относительно узкополосными пиками значительной амплитуды на фоне сравнительно низких средних значений J . В целом характер представленных зависимостей не очень сильно меняется от этажа к этажу, хотя следует отметить определенное снижение пиковых значений для верхних (четвертого и пятого) этажей. Значения амплитуд максимумов, входящих за границы графика, и соответствующие им частоты указаны рядом с пиками в виде дробей, где в числителе стоит частота, а в знаменателе – максимальное значение амплитуды.

Чем же обусловлено появление таких резких пиков в частотной зависимости параметра J ? Для ответа на этот вопрос были проведены расчеты поля давления между домами на частотах, соответствующих некоторым из максимумов. Полученные результаты представлены на рис. 4, а–в. Из их анализа следует, что:

- пики в частотных зависимостях величины J обусловлены резонансными явлениями, во-

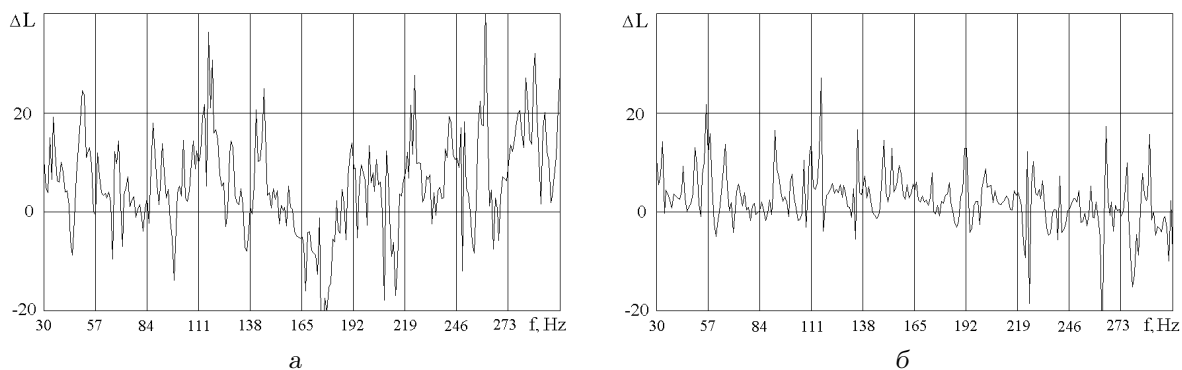


Рис. 2. Частотные зависимости величины ΔL в точках с координатами:
 а – $x=0$ м, $y=3$ м; б – $x=0$ м, $y=10$ м

зникающими в области, ограниченной акустически жесткими фасадами зданий и поверхностью проезжей части и тротуаров; при этом распределение поля визуально представляет собой чередующиеся вертикально вытянутые полосы;

- резонансы могут возникнуть в тех случаях, когда отношение расстояния между домами к длине волны составляет $n/2$, где $n=1, 2, 3, \dots$ (для наглядности в верхней части рис. 3 нанесена шкала значений $(b+a+c)/\lambda$. Здесь λ – длина волны в воздухе); при этом, поскольку поверхности фасадов акустически жесткие, то на них образуются пучности (т. е. зоны максимального значения) давления [12];
- поскольку область между домами с точки зрения акустики представляет собой, по сути, открытый резонатор, то ближе к верхней (открытой) части области резонансная структура поля “размывается”, а давление падает, в результате чего и происходит уже отмеченное ослабление пиковых значений J для четвертого и пятого этажей.

Следует отметить, что не все потенциально возможные резонансы могут реализоваться в полной мере. Их эффективность во многом зависит от волновых размеров источника S и его расположения на проезжей части. Иными словами, не на всех резонансных частотах источник будет достаточно хорошо согласован с объемом воздушной среды, находящейся между фасадами домов. Именно поэтому на кривых рис. 3 видны не только высокоамплитудные максимумы, где согласование относительно хорошее, но и масса мелких пиков, где согласование неудовлетворительное.

Для того, чтобы выяснить, как распределяе-

тся поле на нерезонансных частотах, обратимся к рис. 4, г. На нем представлено распределение поля давления между фасадами домов на частоте 70 Гц, для которой не отмечено каких-либо резких пиков. Как видно из этого графика, распределение поля носит достаточно “размытый” характер и среднее значение амплитуды давления, по мере движения от источника к верхним этажам, постепенно падает.

Теперь рассмотрим ситуацию, когда вдоль улицы размещены барьеры с акустически жесткими поверхностями (см. рис. 1). На рис. 5 представлены частотные зависимости параметра J для тех же вариантов расчетов, что и на рис. 3. Сравнивая графики, представленные на обоих рисунках, можно отметить следующее:

- средний уровень параметра J для нижних этажей (и особенно первого) заметно снизился, примерно на (4...6) дБ, однако его частотная зависимость все равно изобилует большим количеством пиков;
- уровни большинства пиковых значений параметра J уменьшились, по крайней мере, начиная со второго этажа;
- уровень главного резонансного пика на частоте 83 Гц практически не изменился.

Таким образом, можно заключить, что применение акустически жестких барьеров привело к некоторому снижению среднего уровня звукового давления на окнах нижних этажей и пиковых значений давления на верхних этажах. Тем не менее, ожидавшегося существенного снижения значения параметра J практически не произошло. Можно предположить, что применение барьеров создали условия для появления дополнительного ряда резонансных частот и, соответственно, дополнитель-

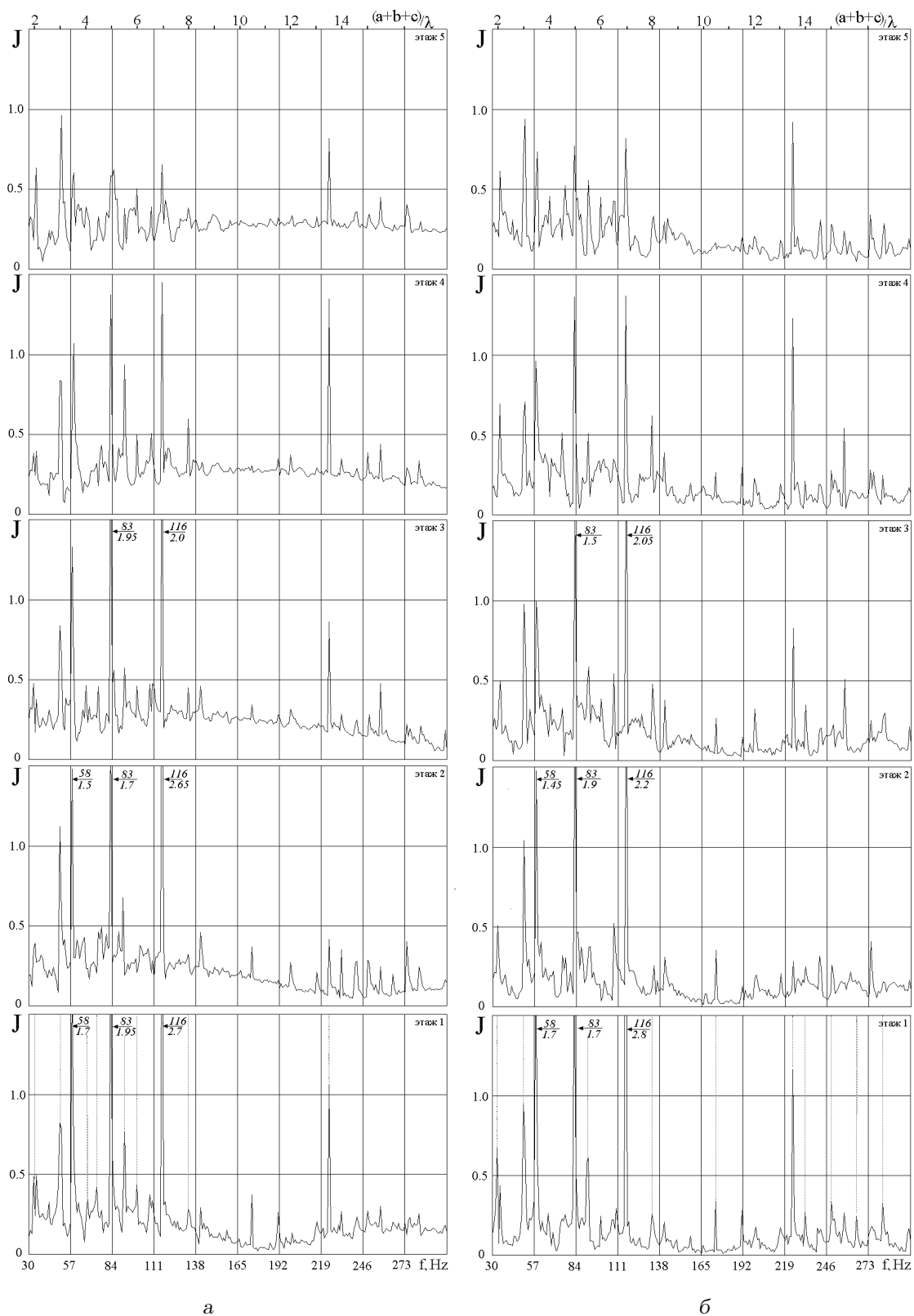


Рис. 3. Частотные зависимости параметра J в отсутствие барьеров:
 а – дом слева от проезжей части; б – дом справа от проезжей части

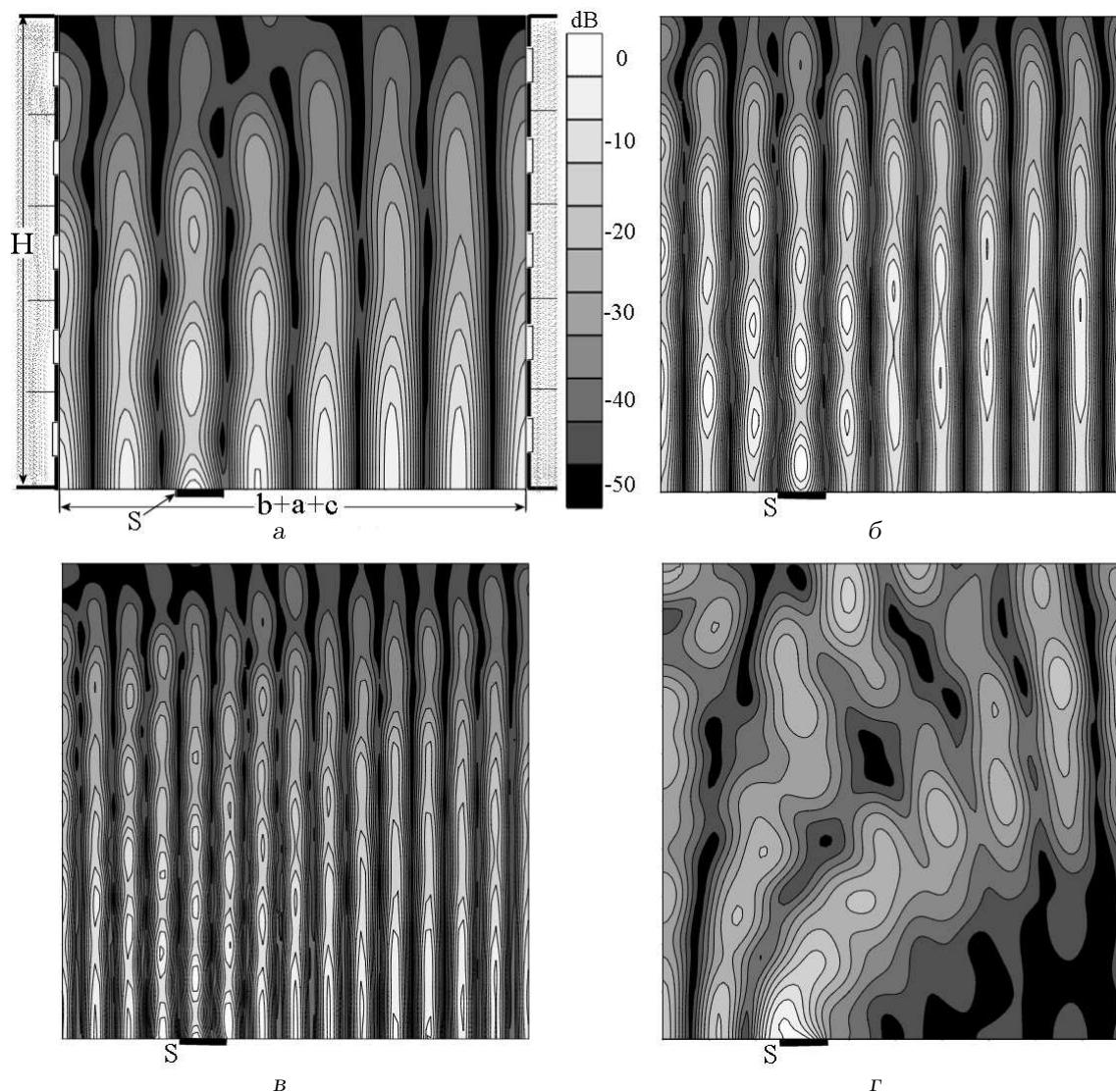


Рис. 4. Поле амплитуды давления в области между домами, когда барьеры отсутствуют, на частотах:
 а – 58 Гц; б – 83 Гц; в – 116 Гц; г – 70 Гц

ных пиков в частотной зависимости параметра J . Действительно, барьеры расположены параллельно друг другу и фасадам зданий, что привело к образованию еще трех открытых резонаторов – одного между барьерами и двух между барьерами и поверхностями фасадов. Чтобы убедиться в этом, обратимся к рис. 6. На рис. 6, а, демонстрирующем распределение поля давления на частоте 45 Гц, хорошо видны резонансные явления между барьерами и фасадами зданий. Именно здесь выполняется условие $b/\lambda = c/\lambda = 1/2$ и на частотной зависимости J возникает явно выраженный пик (см. также рис. 5, – первый этаж). Обратим внимание на то, что указанный резонанс в области между левым барьером и левым фасадом выражен

более ярко, чем между правым барьером и правым фасадом. Это можно объяснить более близким расположением источника к левому барьеру.

Очевидно, что резонансные ситуации могут реализоваться и на более высоких частотах, для которых выполняется условие $b/\lambda = c/\lambda = m/2$, где $m = 1, 2, 3, \dots$. Исходя из этого, на нижних графиках рис. 5 нанесены дополнительные шкалы значений a/λ , b/λ , которые могут помочь в оценке частот потенциально возможных резонансных ситуаций между барьерами и фасадами зданий.

Рис. 6, б иллюстрирует появление резонанса между барьерами на частоте 58 Гц, что соответствует волновому размеру $a/\lambda = 2$ (естественно, в общем для этого должно выполняться условие вида

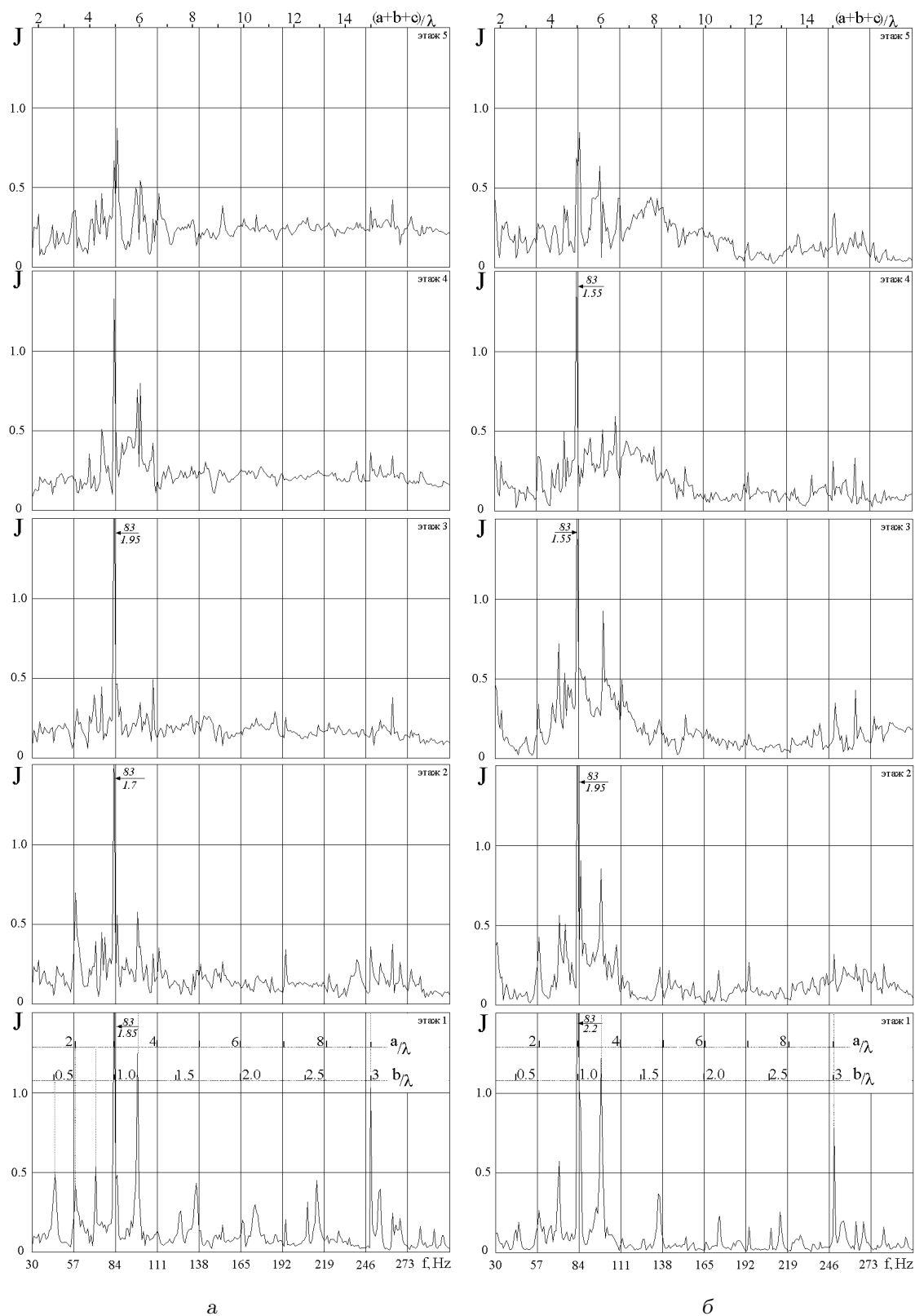


Рис. 5. Частотные зависимости параметра J при наличии акустически жестких барьеров:
 а – дом слева от проезжей части; б – дом справа от проезжей части

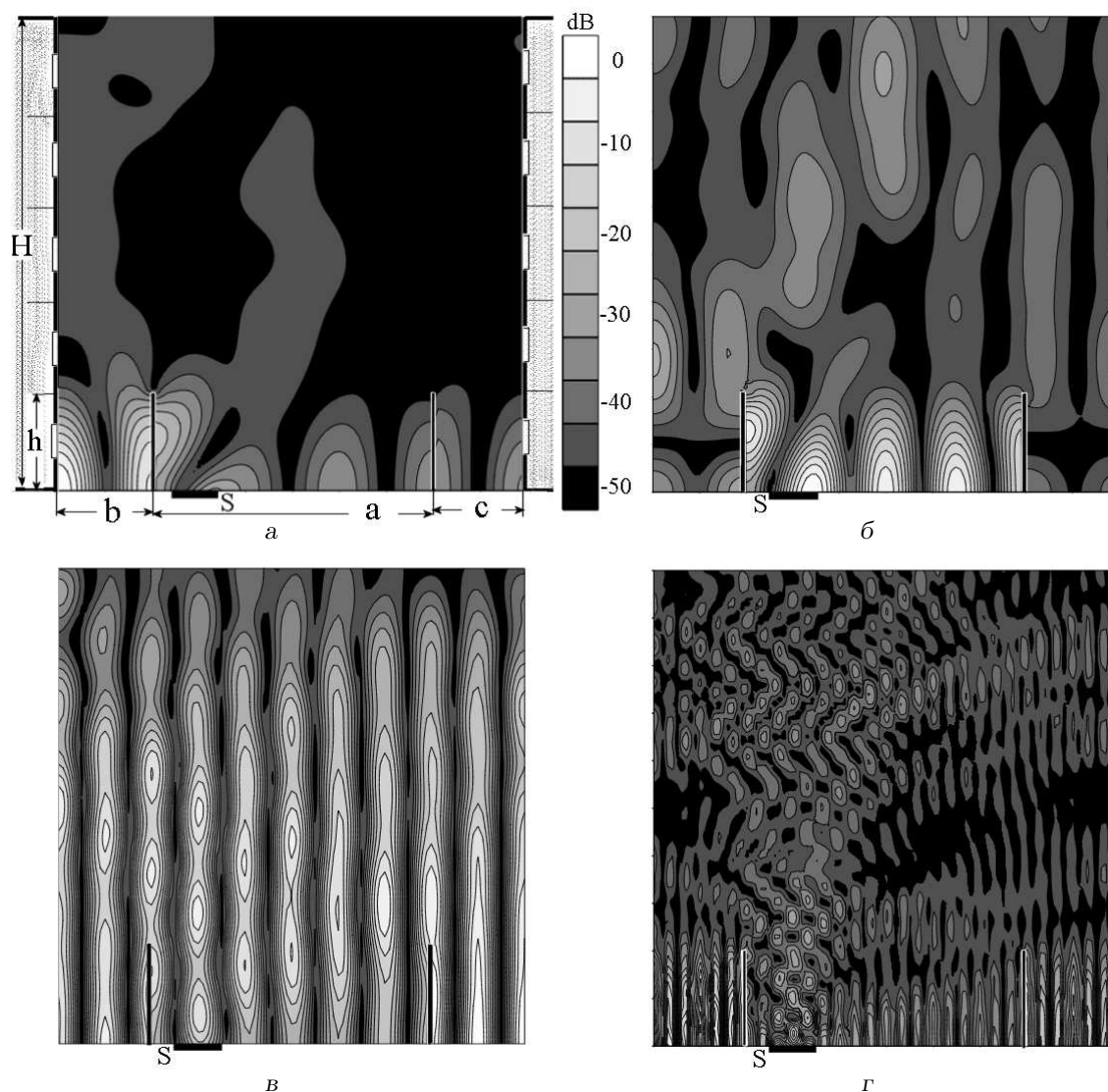


Рис. 6. Поле амплитуды давления в области между домами при частоте источника звука:
 а – 45 Гц; б – 58 Гц; в – 83 Гц; г – 249 Гц

$a/\lambda = m/2$, где $m = 1, 2, 3, \dots$).

Весьма нагляден рис. 6, в, рассчитанный для частоты 83 Гц. Здесь на одной частоте одновременно во всех областях (между домами, между барьерами и между барьерами и домами) возникают резонансные явления. Это соответствует случаю, когда одновременно $(b+a+c)/\lambda = 5$, $a/\lambda = 3$ и $b/\lambda = c/\lambda = 1$. При этом создается иллюзия, что звуковое поле как бы “не замечает” присутствия барьеров (ср. рис. 4, б и рис. 6, в). Естественно, такой “глобальный” резонанс охватывает всю область между обоими домами и доминирует на всех их этажах (см. рис. 5). Аналогичным образом обстоит дело и на частоте 249 Гц (рис. 6, г). Здесь также имеет место “глобальный” резонанс,

однако не столь эффективный, как при 83 Гц. Это связано с тем, что на частоте 249 Гц волновой размер источника звука составляет $(a_2 - a_1)/\lambda = 1.54$, т. е. превышает длину волны. Из-за возрастания волнового размера такой источник становится направленным и уже не может достаточно равномерно озвучить все пространство между домами. Из рис. 6, г хорошо видно, что от источника действительно исходит относительно узкий звуковой конус, который постепенно расширяется и “размывается”. Именно поэтому пик на частоте 249 Гц хорошо просматривается лишь в зоне первого этажа, а выше его уровень существенно снижается.

Подводя итог проведенному анализу, можно заключить, что в условиях городских улиц приме-

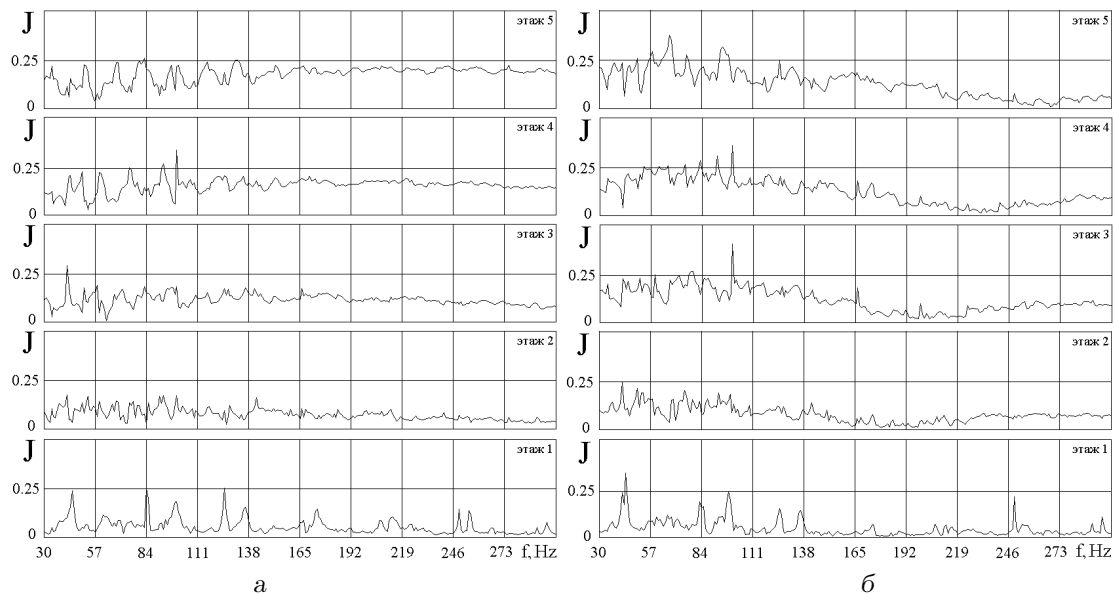


Рис. 7. Частотные зависимости параметра J при наличии барьеров, у которых поверхности, обращенные к проезжей части улицы, – идеально поглощающие, а обращенные к домам, – акустически жесткие:

а – дом слева от проезжей части; б – дом справа от проезжей части

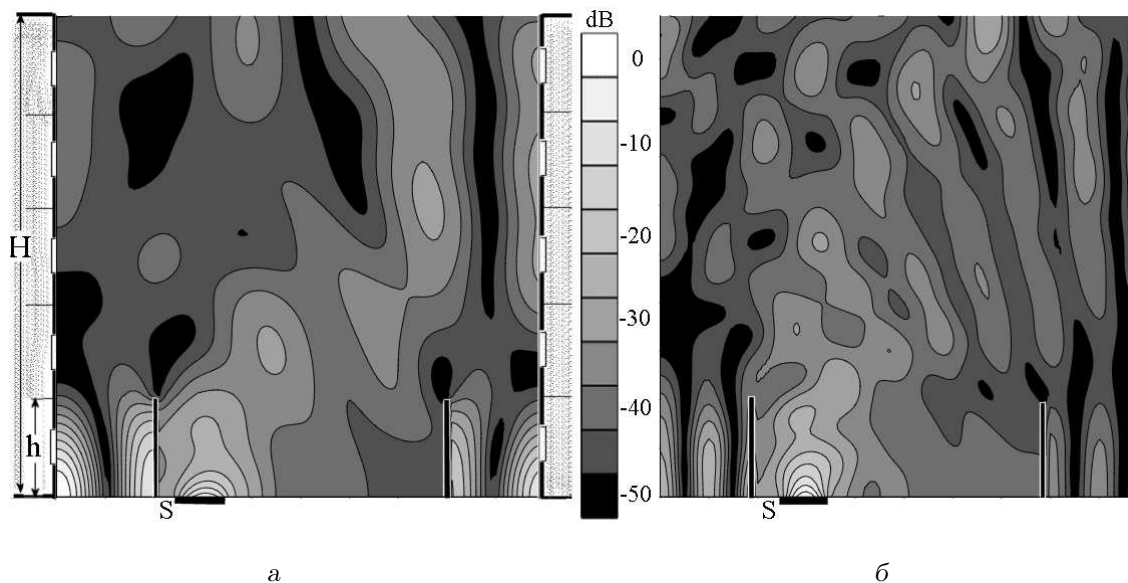


Рис. 8. Поле амплитуды давления в области между домами (поверхности барьеров, обращенные к проезжей части улицы, – идеально поглощающие, а обращенные к домам, – акустически жесткие) при частоте источника звука:

а – 45 Гц; б – 84 Гц

нение для ослабления воздействия транспортного шума на окна жилых домов и зоны тротуаров барьеров с акустически жесткими поверхностями может не дать ожидаемого эффекта из-за возникновения резонансных явлений между домами, самими барьерами, а также между барьерами и фа-

садами домов. Есть основания предположить, что применение барьеров со стенками, поглощающими звуковую энергию, может существенно улучшить шумозащиту [8, 9].

В качестве иллюстрации на рис. 7 представлены зависимости частотной функции J для барьеров

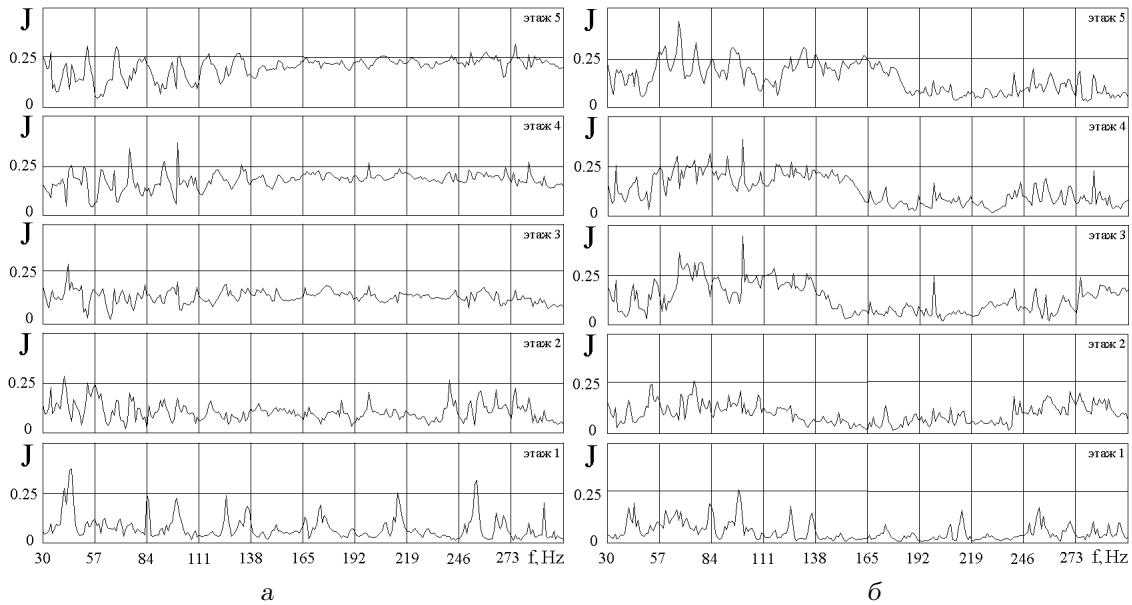


Рис. 9. Частотные зависимости параметра J при наличии барьеров, у которых поверхности, обращенные к проезжей части улицы, покрыты решеткой резонансных поглотителей, а обращенные к домам, – акустически жесткие:
а – дом слева от проезжей части; б – дом справа от проезжей части

с идеально поглощающими поверхностями ($Y=1$) со стороны проезжей части улицы. Действительно, сравнивая графики на рис. 7 с аналогичными зависимостями с рис. 3 и рис. 5, легко убедиться в существенном снижении уровня всех резонансных пиков и общем снижении среднего уровня параметра J во всем рассматриваемом диапазоне частот. И хотя отдельные резонансные пики присутствуют и здесь, их уровень мал и не превышает (0.25...0.3). Если же обратиться к рис. 8, на котором представлена структура поля амплитуды давления для барьеров с идеально поглощающими стенками со стороны проезжей части улицы, то можно убедиться, что “глобальные” резонансы исчезли, а остались только резонансы между барьерами и фасадами домов, характеризующиеся относительно низкими уровнями. Совершенно очевидно, что для их устранения необходимо наделить свойством поглощать звуковую энергию также и стенки барьеров, обращенные к фасадам домов.

Рассмотрим рис. 9, на котором представлены частотные зависимости параметра J для барьеров, покрытых решеткой из резонаторов Гельмгольца. Они представляют собой так называемые резонансные поглотители звука, широко используемые на практике для решения различных задач шумозащиты [5–7, 11, 12].

Напомним, что параметры отдельно взятого ре-

зонатора Гельмгольца зависят от его геометрических размеров, а именно, глубины b_1 и ширины b_2 камеры резонатора, диаметра $2r_0$ и длины l горла резонатора. Мы неявно полагаем, что сечение горла резонатора – круг с площадью $\sigma_1 = \pi r_0^2$, а сечение камеры – квадрат с площадью $\sigma_2 = b_1 b_2$. Определив эти величины, можно записать формулы для собственной частоты резонатора Гельмгольца в воздухе [11]:

$$f_0 \approx \frac{93r_0}{b_2 \sqrt{b_1(l + \Delta l)}} \quad (26)$$

и импеданса, выраженного в долях ρc и рассчитанного на единицу площади основания камеры резонатора ($\sigma_2 = b_1 b_2$):

$$\bar{Z} = \frac{n\tilde{r}}{\rho c} + i \left(\operatorname{ctg} \left(\frac{\omega b_1}{c} \right) - \frac{\omega n}{c} (l + \Delta l) \right). \quad (27)$$

Здесь \tilde{r} – коэффициент трения в элементах конструкции резонатора Гельмгольца (обычно это мелкая сетка или ткань, которая размещается у горла резонатора, [10, 11]); $n = \sigma_2 / \sigma_1$. Величина $\Delta l = \pi r_0 / 2$ обусловлена наличием так называемой присоединенной массы на концах горла резонатора.

Как и в работах [8, 9], выберем следующие параметры резонатора Гельмгольца: $b_1 = 0.4$ м, $b_2 = 0.05$ м, $2r_0 = 4 \cdot 10^{-3}$ м, $l = 0.5 \cdot 10^{-3}$ м, $\tilde{r} = 2$. Они

соответствуют собственной частоте резонатора $f_0 \approx 97$ Гц.

Как видно, частотные зависимости параметра J для барьеров со стенками в виде решеток резонаторов Гельмгольца мало отличаются от таковых для барьеров с идеально поглощающими стенками (ср. соответствующие графики на рис. 9 и рис. 7). Это дает основание утверждать, что барьеры с поглощающими стенками вполне реализуемы на практике. Следовательно, достаточно эффективную шумозащиту на улицах современных городов вполне можно обеспечить.

В заключение остается добавить, что рассмотренная задача легко обобщается на более сложный случай, когда все стенки барьеров поглощают звуковую энергию.

ВЫВОДЫ

1. Решена задача о дифракции звуковых волн на шумозащитных барьерах, размещенных по обеим сторонам городской улицы. Математическая модель учитывает наличие многоэтажных домов по обеим сторонам улицы. Предполагается, что поверхности стенок барьеров со стороны проезжей части могут быть акустически жесткими или поглощающими.
2. Проведено обоснование выбора критерия эффективности шумозащитных свойств барьеров в условиях городской улицы.
3. Получены численные результаты для широкого диапазона частот, проведен их анализ и установлены связи между шумозащитными свойствами барьеров и акустическими свойствами их стенок. В частности:
 - установлено, что при отсутствии барьеров на ряде частот возможно резкое увеличение акустического давления на окнах всех этажей зданий и в зоне троту-

ара, что обусловлено резонансной структурой звукового поля;

- выяснено, что присутствие барьеров с акустически жесткими поверхностями не позволяет существенно улучшить шумозащищенность окон домов и зоны тротуаров;
- показано, что использование барьеров со звукопоглощающими стенками приводит к эффективному ослаблению резонансных эффектов, что обеспечивает значительное улучшение шумозащищенности окон зданий и зон тротуаров.

1. Kotzen B., English C. Environmental noise barriers.– London/New York: Spon Press, 2009.– 257 p.
2. Ming K., Kwok M. P., Law M. K. A ray model for hard parallel noise barriers in high-rise cities // J. Acoust. Soc. Amer.– 2008.– **123**.– P. 121–132.
3. Li K. M., Tang S. H. The predicted barrier effect in the proximity of tall buildings // J. Acoust. Soc. Amer.– 2003.– **114**.– P. 821–832.
4. May D. N., Osman M. M. Highway noise barriers: New shapes // J. Sound Vib.– 1980.– **71**.– P. 73–101.
5. 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.
6. Защита от шума в градостроительстве / Под ред. Г. Л. Осипова.– М.: Стройиздат, 1993.– 96 с.
7. Иванов Н. И. Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом.– М.: Логос, 2008.– 424 с.
8. Вовк И. В., Мацьпура В. Т. Влияние свойств поверхностей шумозащитного барьера на его эффективность // Акуст. вісн.– 2010.– **13**, № 1.– С. 3–10.
9. Вовк И. В., Мацьпура В. Т. Шумозащитные свойства барьеров, размещенных вдоль обеих сторон транспортной магистрали // Акуст. вісн.– 2010.– **13**, № 4.– С. 3–14.
10. Грінченко В. Т., Вовк І. В., Мацьпура В. Т. Основы акустики.– К.: Наук. думка, 2007.– 640 с.
11. Звукоизоляция и звукопоглощение / Под ред. Г. Л. Осипова, В. Н. Бобылева.– М.: Астрель, 2004.– 450 с.
12. Ржевкин С. Н. Курс лекций по теории звука.– М.: Изд-во МГУ, 1960.– 336 с.