

УДК 534.1

ОБ ОДНОМ СТРОГОМ МЕТОДЕ ОЦЕНКИ АКУСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ШУМОПОДАВЛЯЮЩИХ БАРЬЕРОВ

И. В. ВОВК*, Т. А. КОНЧЕНКО*, В. Т. МАЦЫПУРА**

*Институт гидромеханики НАН Украины, Киев

**Национальный технический университет Украины "КПИ", Киев

Получено 30.11.2004

Методом частичных областей решена задача о рассеянии звука на шумоподавляющем барьере и разработан эффективный алгоритм для численного анализа звукового поля в освещенной, переходной и теневой зонах. Проведены расчеты звукового поля вдали и вблизи барьера в широком диапазоне частот и при разных размещениях источника относительно барьера. Даны два примера оценки эффективности барьеров для интересных с практической точки зрения случаев.

Методом часткових областей розв'язано задачу про розсіяння звуку на шумозаглушуючому бар'єрі та розроблено ефективний алгоритм для чисельного аналізу звукового поля в освітленій, перехідній та тінювій зонах. Проведені розрахунки звукового поля на віддалі та поблизу бар'єра у широкому діапазоні частот, а також при різних розміщеннях джерела відносно бар'єра. Наведені два приклади оцінки ефективності бар'єрів для цікавих з практичної точки зору випадків.

A problem of sound scattering on the noise reduction barrier is solved and an efficient algorithm for numerical analyzing the sound field in the illuminated, transitive, and shadow zones is developed by the method of partial domains. The sound field is computed far from and near the barrier in a wide frequency range and at different displacement of the source with respect to the barrier. Two examples of the barrier efficiency estimation are considered, being interesting from the practical point of view.

ВВЕДЕНИЕ

Последние десятилетия XX и начало XXI столетия ознаменовались небывалой динамикой научно-технического развития. Однако наряду с позитивными последствиями этого процесса, к большому сожалению, ему сопутствуют и негативные явления. К таким примерам можно отнести и постоянно растущее шумовое загрязнение среды обитания человека, обусловленное, прежде всего, увеличением плотности и скорости потоков транспорта, ростом интенсивности работы различных промышленных механизмов и т. д. Между тем, хорошо известно, что воздействие шума с уровнем более 65 дБ может приводить к полной или частичной потере слуха человека [1, 2]. Вот почему в развитых странах много внимания уделяется научным программам, направленным на изучение шумового загрязнения городов и разработку мер по его снижению. Об этом свидетельствует непрекращающийся поток публикаций в ведущих зарубежных научных и технических журналах по акустике за последние 40 лет (см., например, [3–7] и библиографию в них).

Особое место в этих публикациях занимает метод шумоподавления с помощью барьеров (акустических экранов), располагаемых между источниками шума и зоной, которую нужно защитить

от его воздействия. Такими зонами могут быть жилые дома, тротуары около транспортных магистралей, рабочие места на производстве и пр. Причина популярности барьеров очевидна и связана с их относительной дешевизной и простотой использования. Вместе с тем, оценка эффективности барьеров оказалась весьма непростым делом, поскольку получение достоверных оценок распределения звуковых полей в защищаемых зонах приводит к необходимости решения соответствующих дифракционных задач в достаточно строгой постановке. Дело в том, что в большинстве практических случаев львиная доля звуковой энергии транспортных и производственных шумов лежит в области относительно низких частот. В качестве примера на рис. 1 представлены заимствованные из [8] усредненные экспериментальные спектры шумов транспортных потоков. Из графика видно, что максимум энергии шумов приходится на область 50÷200 Гц (т. е. на звуковые волны длиной около 1.5÷6 м).

Поскольку реальная высота возводимых около транспортных магистралей шумоподавляющих барьеров колеблется от 3 до 8 м [7], нетрудно убедиться, что их волновой размер будет составлять примерно от 0.5 до 5. Хорошо известно (см., например, [9, 10]), что при изучении рассеяния звука на телах, сравнимых с длиной звуковой волны, не-

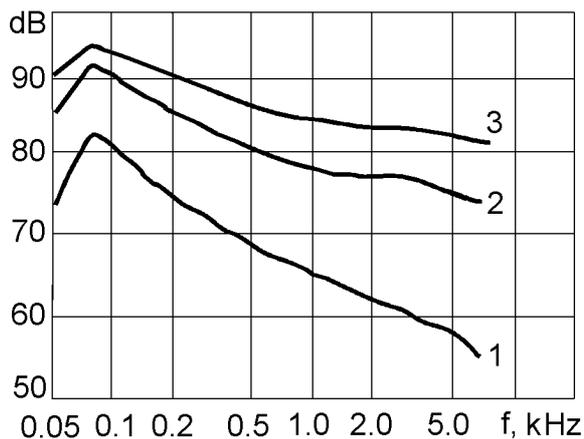


Рис. 1. Усредненные треть-октавные спектры шумов транспортных потоков:

1–3 – интенсивности движения 250, 1000 и 8000 транспортных единиц в час соответственно

обходимо использовать строгие методы при постановке и решении соответствующих задач дифракции. В противном случае результаты оценок рассеянного поля могут оказаться далекими от истины.

К сожалению, основная масса публикаций, посвященных оценкам рассеянных барьерами звуковых полей, выполнена на основе использования приближенных подходов, в частности методов лучевой акустики, методов Келлера и других асимптотических методик (подробности см. в [3, 5, 13]). Как известно, указанные методы позволяют получать хорошие оценки полей за барьером (в области его акустической тени) в основном для случаев, когда высота барьера значительно превышает длину падающей на него звуковой волны.

Цель данной статьи состоит в обобщении известного строгого метода частичных областей [9] на круг дифракционных задач, связанных с шумоподавляющими барьерами, и получении на этой основе эффективных решений, позволяющих проводить исчерпывающий анализ рассеянных барьерами звуковых полей во всем диапазоне частот, интересном с практической точки зрения.

1. ФИЗИЧЕСКАЯ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛИ БАРЬЕРА

Рассмотрим следующую идеализированную физическую модель барьера. Будем полагать, что на бесконечной акустически жесткой поверхности, которая моделирует поверхность земли, в точке O установлен бесконечный (вдоль направления пер-

пендикулярного плоскости рисунка) акустически жесткий тонкий барьер высотой h (рис. 2). Справа параллельно барьеру на расстоянии b от него и на высоте g от поверхности земли ($y=0$) находится линейный гармонический источник звука S в виде бесконечной пульсирующей нити, моделирующий звук, создаваемый транспортным потоком. Как принято, буквой P обозначена точка наблюдения. Все полупространство, где может существовать возбуждаемое источником поле, заполнено идеально сжимаемой средой с плотностью ρ и скоростью звука c . В дальнейшем будем полагать, что этой средой является воздух.

Описанная физическая модель с точки зрения математики эквивалентна плоской задаче, когда звуковое поле не зависит от одной из координат (в данном случае от координаты, нормальной к плоскости рисунка). Принятые акустические свойства поверхностей означают, что нормальная составляющая колебательной скорости звукового поля на них равна нулю. Кроме того, при выбранных свойствах источника звука и окружающей среды искомого поле давления должно удовлетворять уравнению Гельмгольца. Принятые модели, с одной стороны, в самых общих чертах вполне адекватны ситуациям, встречающимся на практике, а с другой (как будет показано ниже) – позволяют построить строгое аналитическое решение о рассеянии звука на таком препятствии как барьер.

2. ПОСТРОЕНИЕ АНАЛИТИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Для построения 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 [9]. В соответствии с основной идеей этого метода все пространство существования звукового поля естественным образом разобьем на три области: область I представляет собой внешность полукруга радиусом h , т. е. $r \geq h, 0 \leq \theta \leq \pi$; область II занимает четверть круга радиусом h , т. е. $r \leq h, 0 \leq \theta \leq \pi/2$; область III определяется другой четвертью круга $r \leq h, \pi/2 \leq \theta \leq \pi$.

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

Поместим в точку размещения источника S центр O_1 второй полярной системы координат

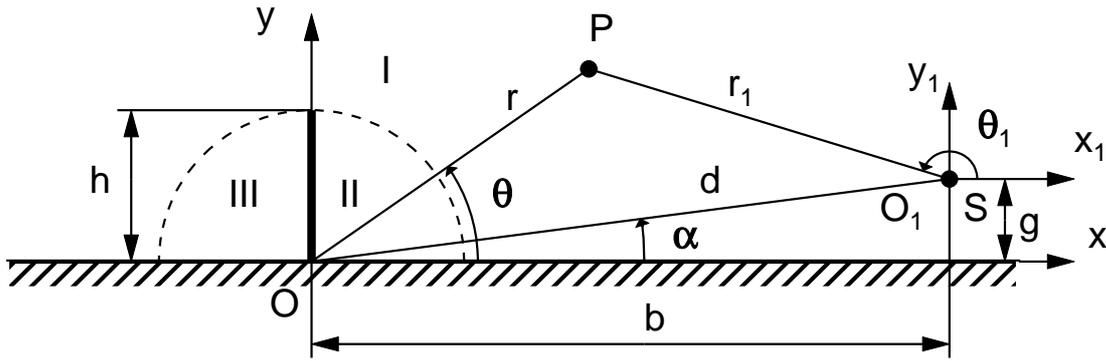


Рис. 2. Геометрия задачи

(r_1, θ_1) (см. рис. 2). Как известно, поле давления элементарного линейного источника определяется выражением $p_0 = GH_0^{(1)}(kr_1)$ [10]. Здесь G – амплитуда, которую примем равной единице; $H_0^{(1)}(kr_1)$ – функция Ханкеля нулевого порядка; $k = \omega/c$; $\omega = 2\pi f$; c – скорость звука в среде; f – частота. Если $d > h$, то источник звука располагается в области I, а если $d < h$ – то в области II (здесь $d = (b^2 + g^2)^{1/2}$).

Пусть для определенности $d > h$. Тогда звуковое поле в области I следует записать в виде

$$p_I = H_0^{(1)}(r_1) + \sum_{n=0}^{\infty} A_n \frac{H_n^{(1)}(kr)}{H_n^{(1)'}(kh)} \cos(n\theta), \quad (1)$$

где угловые функции $\cos(n\theta)$ выбраны таким образом, чтобы автоматически удовлетворять граничным условиям на жесткой поверхности при $\theta = 0$ и $\theta = \pi$. 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:

$$p_{II} = \sum_{m=0}^{\infty} B_m \frac{J_{2m}(kr)}{J_{2m}(kh)} \cos(2m\theta). \quad (2)$$

Здесь угловые функции $\cos(2m\theta)$ выбраны согласно граничным условиям на жестких поверхностях плоскости и экрана (при $\theta = 0$ и $\theta = \pi/2$). Если выполняется неравенство $d < h$, то выражение для поля источника $H_0^{(1)}(kr_1)$ следует перенести из формулы (1) в правую часть формулы (2). Последовательность коэффициентов B_m обеспечивает выполнение условий сопряжения на границе с областью I.

Аналогично, для области III звуковое поле запишем следующим образом:

$$p_{III} = \sum_{q=0}^{\infty} C_q \frac{J_{2q}(kr)}{J_{2q}'(kh)} \cos[2q(\theta - \pi/2)]. \quad (3)$$

В выражениях (1)–(3) приняты стандартные обозначения для функций Бесселя и Ханкеля.

Сформируем систему функциональных уравнений, определяющую условия неразрывности звукового поля на границах областей I и II, III:

$$p_I = \begin{cases} p_{II}, & r = h, \quad \theta \in [0, \pi/2], \\ p_{III}, & r = h, \quad \theta \in [\pi/2, \pi], \end{cases} \quad (4)$$

$$-\frac{\partial p_I}{\partial r} = -\frac{\partial p_{II}}{\partial r}, \quad r = h, \quad \theta \in [0, \pi/2], \quad (5)$$

$$-\frac{\partial p_I}{\partial r} = -\frac{\partial p_{III}}{\partial r}, \quad r = h, \quad \theta \in [\pi/2, \pi]. \quad (6)$$

При подстановке выражений (1)–(3) в систему (4)–(6) следует записать поле линейного источника $H_0^{(1)}(kr_1)$ в системе координат (r, θ) . Для этого воспользуемся теоремой сложения цилиндрических функций [11]. Учитывая, что источник может быть расположен как в области I, так и в области II, необходимо использовать два варианта разложения функции $H_0^{(1)}(kr_1)$ по системе функций в координатах (r, θ) :

$$H_0^{(1)}(kr_1) = \sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon_n H_n^{(1)}(kd) \times J_n(kh) \cos[n(\theta - \alpha)], \quad (7)$$

$$d > h$$

или

$$H_0^{(1)}(kr_1) = \sum_{m=0}^{\infty} \varepsilon_m H_m^{(1)}(kh) \times \\ \times J_m(kd) \cos[m(\theta - \alpha)], \quad (8) \\ d < h,$$

где $\varepsilon_0 = 1$, $\varepsilon_n = 2$ при $n > 0$; $\alpha = \arctan g/b$.

С учетом ортогональности соответствующих наборов функций проведем стандартную алгебраизацию функциональных соотношений (4)–(6), которая порождает бесконечную систему линейных алгебраических уравнений второго рода относительно неизвестных коэффициентов A_n , B_m , C_q . Вследствие громоздкости такой системы конечный ее вид приводить в данной статье считаем нецелесообразным.

Остановимся на некоторых вопросах, связанных с решением системы алгебраических уравнений и оценки возможной точности получения численных результатов. Вопрос о построении алгоритмов решения бесконечных систем уравнений, порожденных выполнением условий сопряжения в методе частичных областей, многократно обсуждался в различных публикациях (см. [9, 12]). Логическую стройность таких алгоритмов можно обеспечить за счет учета того, что звуковые поля обладают известными сингулярностями в окрестности угловых точек (в нашем случае это верхний край барьера). Это дает возможность получить количественные оценки характеристики звуковых полей в областях, сколь угодно близких к угловым точкам. Если же основной интерес представляют характеристики поля в точках, удаленных от угловых, то, как подсказывает опыт, достаточную точность результатов можно обеспечить с помощью метода простой редукции, удерживая в системе определенное количество уравнений. Именно так и будем поступать, имея в виду, что нашей целью является анализ звукового поля, рассеянного барьером.

Построенные в рамках метода частичных областей аналитические представления звукового поля всегда точно удовлетворяют волновому уравнению при любом количестве удерживаемых в рядах слагаемых. Поэтому в основу оценок точности решения задачи в целом следует положить оценку точности выполнения условий сопряжения на границах частичных областей, т. е. на кривой $r = h$, $0 \leq \theta \leq \pi$. Очевидно, что для повышения точности оценки звуковых полей, рассеянных барьером, необходимо увеличивать количество удерживаемых неизвестных комплексных коэффици-

ентов при конкретном решении полученной алгебраической системы уравнений методом редукции. Особенно это важно для высокочастотной области спектра шумов, где поле, как правило, сильно изрезано. Поэтому нами проведены численные эксперименты, в результате которых установлено, что вполне удовлетворительные результаты, пригодные для большинства практических целей, можно получить, если общее количество N_{Σ} удерживаемых неизвестных комплексных коэффициентов будет составлять примерно $120 \div 240$.

В качестве примера на рис. 3 приведены значения давления и колебательной скорости на границах частичных областей для частоты 850 Гц, высоты барьера 4 м, расстояния от барьера до источника 2 м при $g=0$ ($N_{\Sigma} = 243$). Как видно из графика, и модули, и фазы компонент звукового поля с графической точностью совпадают во всех точках границы частичных областей, за исключением точек, лежащих в ближайшей окрестности ребра барьера. Это дает достаточно серьезное основание считать полученные ниже оценки рассеянного барьером поля (в рамках принятой математической модели) вполне корректными.

3. АНАЛИЗ ЧИСЛЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Начнем с анализа общего пространственного распределения звукового поля вокруг барьера как наиболее наглядной и информативной характеристики поля. На рис. 4 представлены такие данные, рассчитанные для различных частот и расстояний от источника до барьера при его фиксированной высоте, равной 4 м. Здесь и ниже рассмотрен случай, когда источник расположен на поверхности $y=0$ ($g=0$).

Анализ представленных данных о распределении звукового поля вокруг барьера позволил установить ряд наиболее общих закономерностей рассматриваемой системы источник – барьер:

- 1) с ростом частоты увеличивается общая глубина звуковой тени за барьером, чего и следовало ожидать ввиду возрастания волновой высоты барьера;
- 2) с ростом частоты растет общая неравномерность поля за барьером, что обусловлено увеличением здесь количества тенеобразующих лепестков, вызванных более жесткой интерференцией прямого поля от источника и дифрагированных полей от кромки барьера;
- 3) с удалением источника от барьера становится заметной интерференция волн и перед барье-

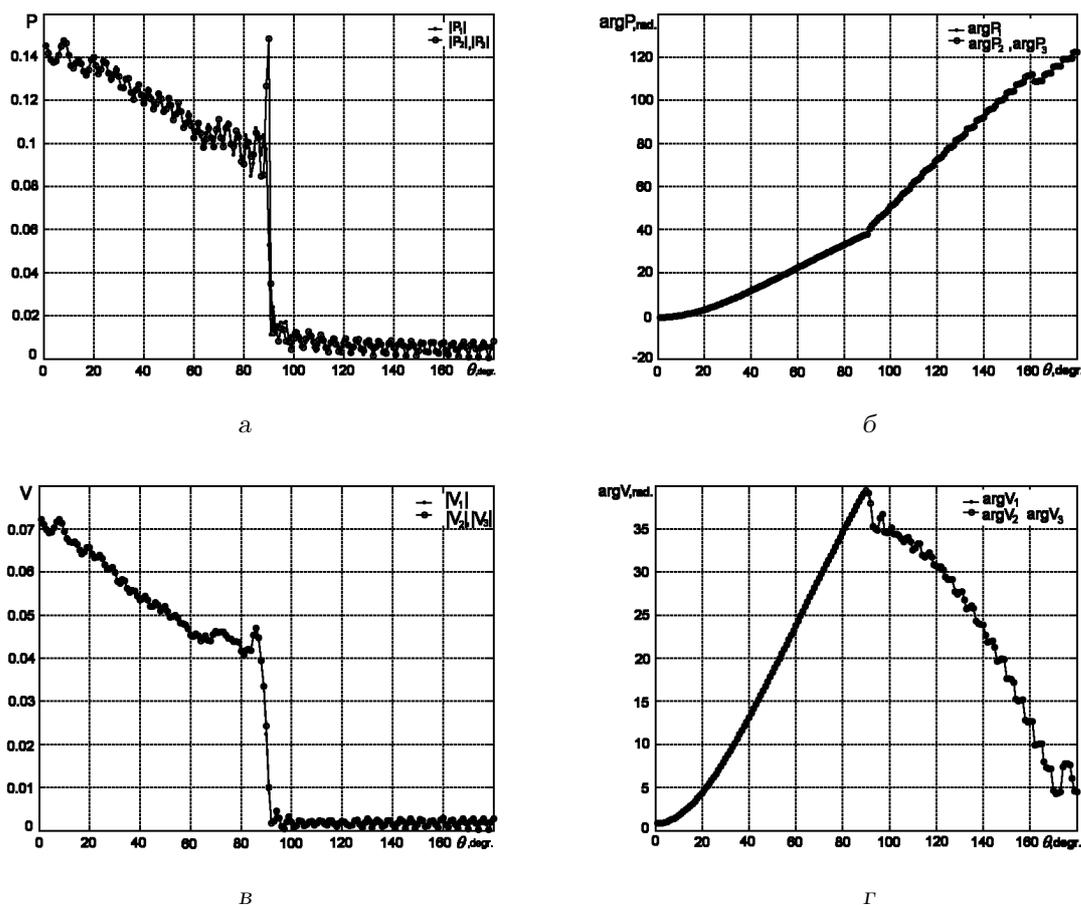


Рис. 3. Звуковые поля на границах частичных областей:
 а – модуль давления, б – фаза давления, в – модуль скорости, г – фаза скорости

ром, что обусловлено взаимодействием прямых волн от источника и отраженных от барьера волн в обратном направлении.

Выявленные закономерности позволяют сделать практический вывод, суть которого сводится к следующему. Эффективность подавления барьером шумов существенным образом зависит от характерных особенностей спектра источника шумов, а также от взаимного расположения источника, барьера и защищаемой от шумов области пространства. Помимо этого, из анализа литературы, посвященной защите от шума, следует, что эффективность барьеров также в значительной мере зависит от формы и физических свойств их поверхностей. Поэтому, учитывая многопараметричность рассматриваемой задачи и весьма сложный характер поля за барьерами, уверенно прогнозировать их эффективность можно только на основе постановки и решения строгих задач дифракции, тесно увязанных с конкретными практическими

целями, условиями и обстановкой.

Чтобы проиллюстрировать эти выводы, рассмотрим простой пример. Предположим, что необходимо защитить пешеходов,двигающихся по тротуару рядом с автострадой, от шумов транспортного потока. Пусть для решения этой задачи между тротуаром и автострадой решено установить бетонный барьер четырехметровой высоты. Приняв эти исходные данные, оценим (по крайней мере на некоторых характерных частотах) эффективность такого барьера, т. е. рассчитаем, насколько он способен снизить шум, исходящий от транспортного потока в зоне тротуара. Для определенности будем полагать, что при движении по тротуару люди располагаются в среднем на расстоянии 2 м от барьера. На рис. 5 представлены уровни звукового давления (относительно давления в точке наблюдения при отсутствии барьера), рассчитанные вдоль оси y на расстоянии 2 м от барьера в зоне тени. При этом были рассмотрены два варианта удаления источника от барьера: $b=2$ м (рис. 5, а)

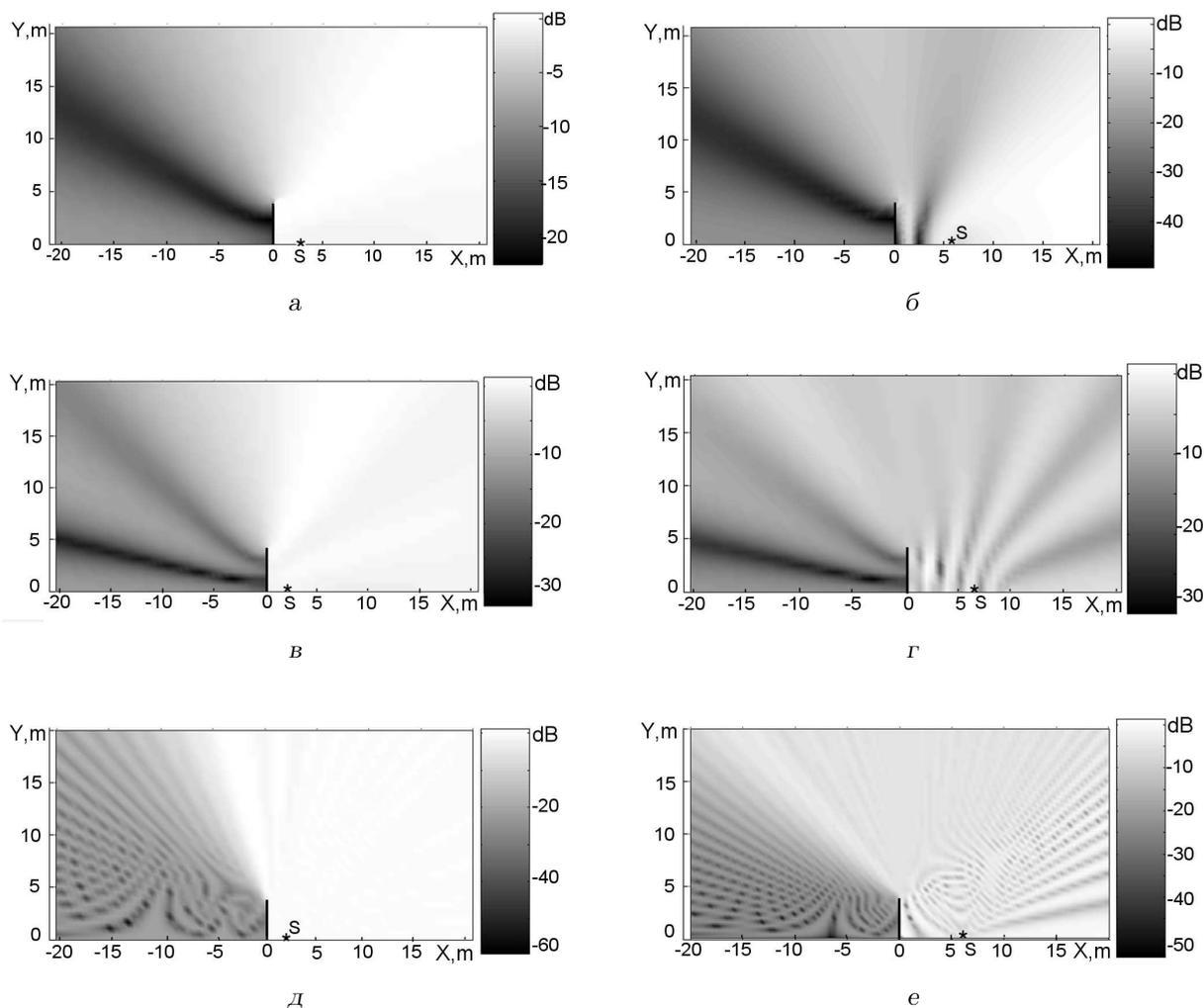


Рис. 4. Распределения звукового поля вокруг четырехметрового барьера:

а - $f = 34$ Гц, $b = 2$ м; б - $f = 34$ Гц, $b = 6$ м; в - $f = 85$ Гц, $b = 2$ м;
 г - $f = 85$ Гц, $b = 6$ м; д - $f = 850$ Гц, $b = 2$ м; е - $f = 850$ Гц, $b = 6$ м

и $b = 6$ м (рис. 5, в). С учетом того, что рост человека не превосходит 2 м, из графиков следует, что барьер может ослабить шум транспортного потока в зоне тротуара не менее, чем на 12 дБ при $b = 2$ м и на 6 дБ при $b = 6$ м в диапазоне частот от 34 до 850 Гц.

Второй пример связан с защитой многоэтажного здания высотой 20 м, расположенного на расстоянии 20 м от барьера. Высота барьера и местоположение источников остаются теми же, что и в предыдущем случае. На рис. 5, б и 5, г показаны уровни звукового давления, рассчитанные вдоль оси y , соответственно для $b = 2$ м и $b = 6$ м. Как видно, одинаково защитить от шума все этажи здания в широком диапазоне частот достаточно проблематично. Естественно, проще всего обеспечить защиту здания с помощью барьера на относитель-

но высоких частотах. Что касается более низких частот, то, как видно, защищенность от шума разных этажей существенно отличаться.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе применения метода частичных областей дано строгое решение задачи о рассеянии звука на шумоподавляющем барьере и разработан эффективный алгоритм для проведения численного анализа звукового поля в освещенной, переходной и теневой зонах. Проведены расчеты звукового поля в дальней и ближней окрестностях барьера для широкого диапазона частот при разных размещениях источника относительно барьера. Проанализированы полученные количественные данные, позволившие оценить эффективность барьеров для

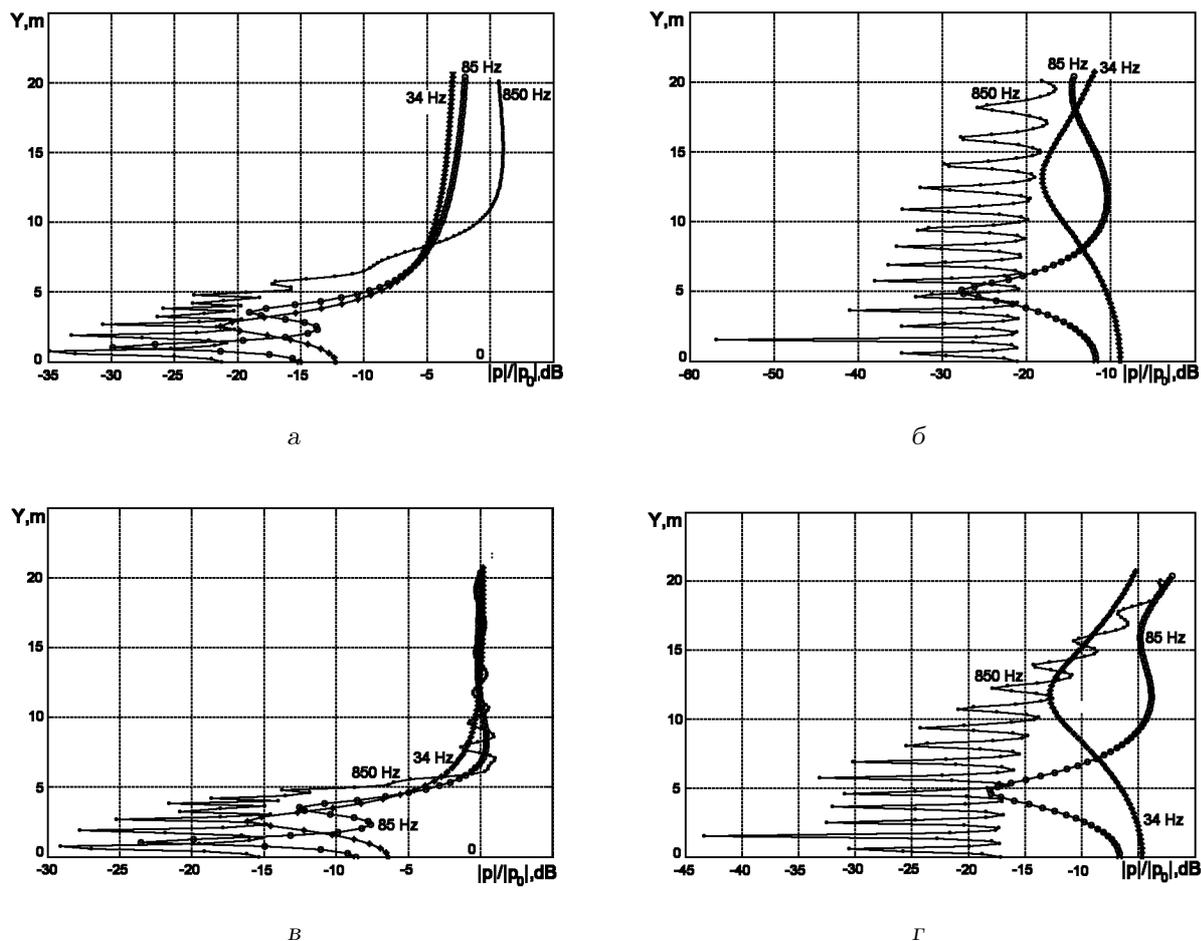


Рис. 5. Вертикальное распределение звукового давления на расстоянии L от барьера в зоне его тени:

$a - L=2$ м и $b=2$ м, $б - L=20$ м и $b=2$ м, $в - L=2$ м и $b=6$ м, $г - L=20$ м и $b=6$ м

двух интересных для практики случаев их использования.

- Дідковський В. С., Акименко В. Я., Запорожець О. І., Савін В. Г., Токарев В. І. Основи акустичної екології.– Кіровоград: ТОВ "Імекс ЛТД", 2003.– 517 с.
- Осипов Л. Г., Бобылев В. И., Борисов Л. А. и др. Звукоизоляция и звукопоглощение.– М.: Изд-во АСТ и Астрель, 2004.– 450 с.
- Kurze U. J. Noise reduction by barriers // J. Acoust. Soc. Amer.– 1974.– **55**, N 3.– P. 504–518.
- Medwin H. Shadowing by finite noise barriers // J. Acoust. Soc. Amer.– 1981.– **69**, N 4.– P. 1060–1064.
- Isei T., Embleton T. F. W., Piercy J. E. Noise reduction by barriers on finite impedance ground // J. Acoust. Soc. Amer.– 1980.– **67**, N 1.– P. 46–58.
- Pierce A. D. Diffraction of sound around corners and over wide barriers // J. Acoust. Soc. Amer.– 1974.– **55**, N 5.– P. 941–955.
- Okubo Tomonau, Kyoji Fujiwara Efficiency of a noise barrier with an acoustically soft cylindrical edge for practical use // J. Acoust. Soc. Amer.– 1999.– **105**, N 6.– P. 3326–3335.
- Осипов Л. Г., Прутков Б. Г., Карагодина И. Л. Градостроительные методы борьбы с шумом.– М.: Стройиздат, 1975.– 215 с.
- Вовк И. В., Гринченко В. Т. Волновые задачи рассеяния звука на упругих оболочках.– Киев: Наукова думка, 1986.– 240 с.
- Шендеров Е. Л. Излучение и рассеяния звука.– Л.: Судостроение, 1989.– 301 с.
- Ватсон Г. Н. Теория бесселевых функций.– М.: ИИЛ, 1949.– 798 с.
- Вовк И. В., Мацьшура В. Т. Излучение звука решеткой, образованной соосными цилиндрическими пьезокерамическими оболочками с торцевыми экранами. Часть 1. Теория // Акуст. вісн.– 2001.– **4**, N 2.– С. 11–17.
- Keller J. B. Geometrical theory of diffraction // J. Opt. Soc. Amer.– 1962.– **52**, N 2.– P. 116–130.