СТРОГИЙ МЕТОД ОЦЕНКИ АКУСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ШУМОПОДАВЛЯЮЩИХ БАРЬЕРОВ

И. В. ВОВК, Т. А. КОНЧЕНКО

Институт гидромеханики НАН Украины
ул. Желябова, 8/4, 03680, Київ-180, ГСП, Украина
тел. (044) 456-43-13, 456-69-83; e-mail: vovk@visti.com

В. Т. МАЦЫПУРА

Национальный технический университет "КПИ", Киев

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.

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия XX и начало XXI столетия наблюдается постоянный рост шумового загрязнение среды обитания человека. Вместе с 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. Осcновная 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, 11]). 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 доклада состоит в обобщении известного строгого метода частичных областей [8] на круг дифракционных задач, связанных с шумоподавляющими барьерами,

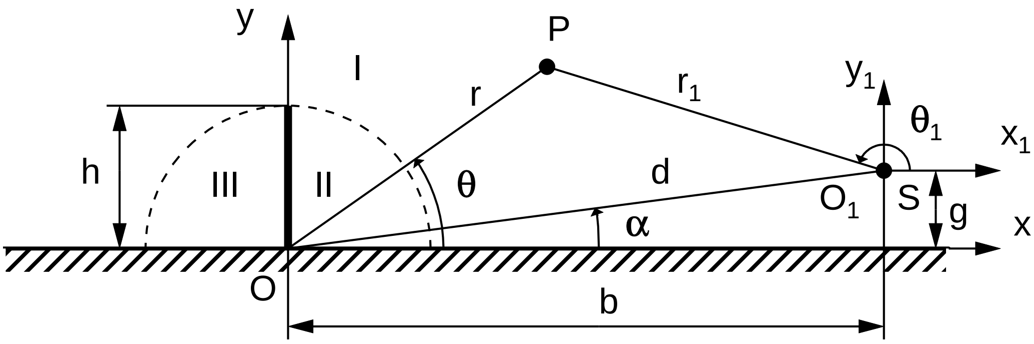

Рис. 1. Геометрия задачи

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

Будем полагать, что на бесконечной акустически жесткой поверхности, которая моделирует поверхность земли, в точке O установлен бесконечный (вдоль направления перпендикулярного плоскости рисунка) акустически жесткий тонкий барьер высотой h (рис. 1). 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 искомое 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. 1). Решение задачи будем строить на базе метода частичных областей [8]. 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 $r \leq h$, $\pi/2 \leq \theta \leq \pi$.

Поместим в точку размещения источника S центр O_1 второй полярной системы координат (r_1, θ_1) (см. рис. 1). Как известно, поле давления элементарного линейного источника определяется выражением $p_0 = GH_0^{(1)}(kr_1)$ [9]. 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

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

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:

$$p_{\mathrm{II}} = \sum_{m=0}^{\infty} B_m \frac{J_{2m}(kr)}{J'_{2m}(kh)} \cos(2m\theta). \tag{2}$$

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:

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

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:

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

$$-\frac{\partial p_{\mathrm{I}}}{\partial r} = -\frac{\partial p_{\mathrm{II}}}{\partial r}, \qquad r = h, \qquad \theta \in [0, \pi/2], \tag{5}$$

$$-\frac{\partial p_{\mathrm{I}}}{\partial r} = -\frac{\partial p_{\mathrm{III}}}{\partial r}, \qquad r = h, \qquad \theta \in [\pi/2, \pi]. \tag{6}$$

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 [10]. 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):

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

$$d > h$$

или

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

$$d < h,$$

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

С учетом ортогональности соответствующих наборов функций нетрудно провести стандартную алгебраизацию функциональных соотношений (4) – (6), которая порождает бесконечную систему линейных алгебраических уравнений второго рода относительно неизвестных коэффициентов A_n, B_m, C_q, являющуюся исходной для получения количественных данных об акустических свойствах рассматриваемых барьеров.

3 АНАЛИЗ ЧИСЛЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проанализируем пространственное распределения звукового поля вокруг барьера как наиболее наглядной и информативной характеристики поля. На рис. 2 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 барьером, что обусловлено взаимодействием прямых волн от источника и отраженных от барьера волн в обратном направлении.

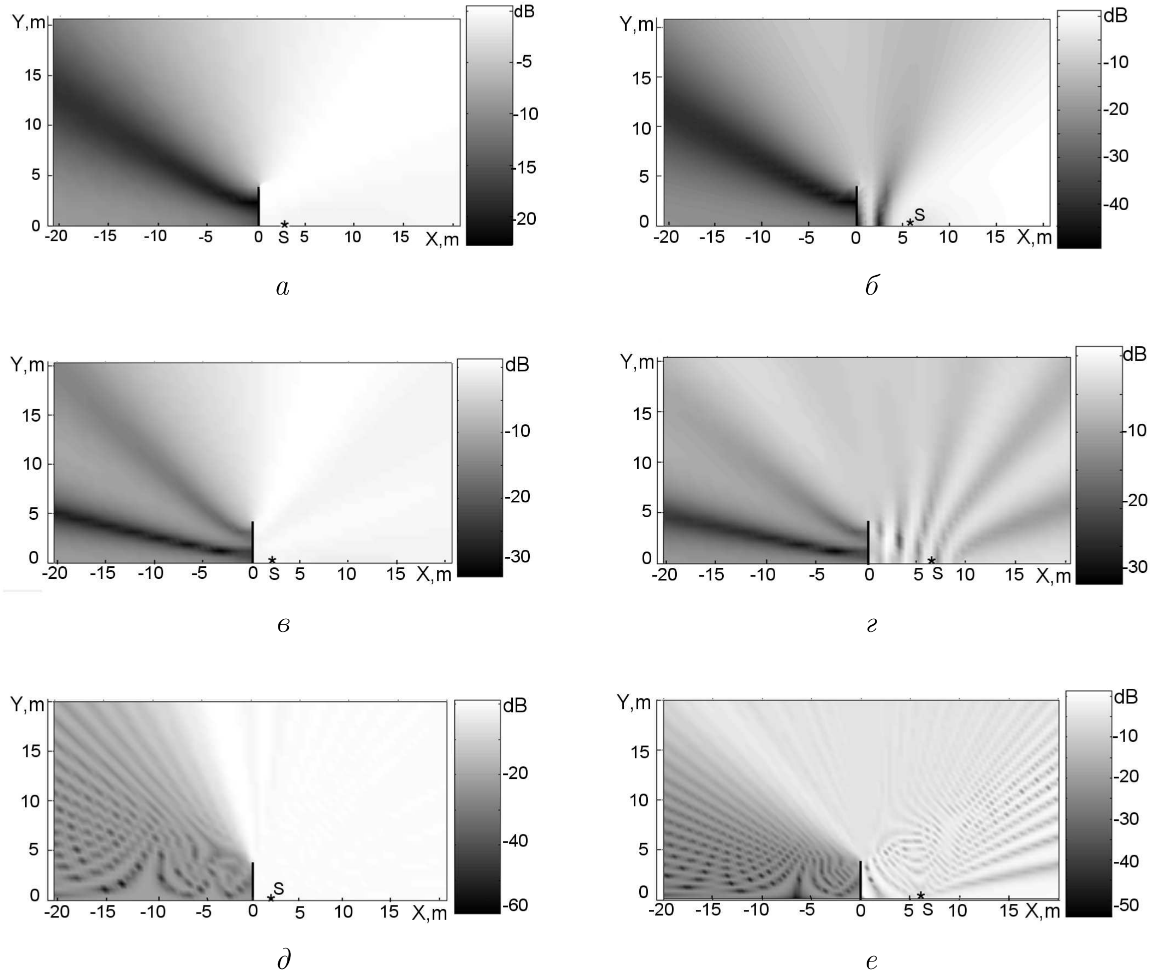

Рис. 2. Распределения звукового поля вокруг четырехметрового барьера:
а – f=34 Гц, b=2 м; *б* – f=34 Гц, b=6 м; *в* – f=85 Гц, b=2 м;
г – f=85 Гц, b=6 м; *д* – f=850 Гц, b=2 м; *е* – f=850 Гц, b=6 м

Выявленные закономерности позволяют сделать практический вывод, суть которого сводиться 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.

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 двух интересных для практики случаев их использования.

ЛИТЕРАТУРА

1. *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.

2. *Осипов Л. Г., Бобылев В. И., Борисов Л. А. и др.* Звукоизоляция и звукопоглощение.– М.: Изд-во АСТ и Астрель, 2004.– 450 с.

3. *Kurze U. J.* Noise reduction by barriers // J. Acoust. Soc. Amer.– 1974.– **55**, N 3.– P. 504–518.

4. *Medwin H.* Shadowing by finite noise barriers // J. Acoust. Soc. Amer.– 1981.– **69**, N 4.– P. 1060–1064.

5. *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.

6. *Pierce A. D.* Diffraction of sound around corners and over wide barriers // J. Acoust. Soc. Amer.– 1974.– **55**, N 5.– P. 941–955.

7. *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.

8. *Вовк И. В.,Гринченко В. Т.* Волновые задачи рассеяния звука на упругих оболочках.– Киев: Наукова думка, 1986.– 240 с.

9. *Шендеров Е. Л.* Излучение и рассеяния звука.– Л.: Судостроение, 1989.– 301 с.

10. *Ватсон Г. Н.* Теория бесселевых функций.– М.: ИИЛ, 1949.– 798 с.

11. *Keller J. B.* Geometrical theory of diffraction // J. Opt. Soc. Amer.– 1962.– **52**, N 2.– P. 116–130.