

ОСОБЕННОСТИ ДИФРАКЦИИ ЗВУКА НА ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩЕМ ЭКРАНЕ

© 2021 г. А. И. Комкин^а, *, Г. М. Назаров^а

^аФедеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)”,
ул. 2-ая Бауманская 5, стр. 1, Москва, 105005 Россия

*e-mail: akomkin@mail.ru

Поступила в редакцию 26.01.2021 г.

После доработки 03.02.2021 г.

Принята к публикации 08.02.2021 г.

Приводятся результаты компьютерного моделирования поглотительной способности полубесконечного акустического экрана в зависимости от угла падения на него плоской звуковой волны. Определена акустическая эффективность экрана в зависимости от частоты и угла падения звука. Проанализировано влияние на акустическую эффективность экрана размеров звукопоглощающего слоя. Показано, что существует оптимальное заполнение площади экрана поглощающей облицовкой, при котором поглотительная способность экрана будет максимальна. Статья подготовлена по материалам доклада на 3-й Всероссийской акустической конференции (21–25 сентября 2020 г., г. Санкт-Петербург).

Ключевые слова: акустический экран, конечно-элементная модель, поглощающая облицовка

DOI: 10.31857/S0320791921030072

ВВЕДЕНИЕ

Акустические экраны находят все большее применение для защиты от шума. В связи с этим в течение многих лет эффективность акустических экранов была и остается предметом теоретических и экспериментальных исследований. Первый шаг в моделировании экрана с целью практической оценки его акустической эффективности был осуществлен Маекавой [1] в терминах числа Френеля для тонкостенного полубесконечного экрана. За этим последовал целый ряд работ [2–6], которые уточняли предложенные Маекавой расчетные формулы.

Вместе с тем разрабатывались более сложные модели экранов, в которых учитывалась толщина экрана, его конечная длина, наличие подстилающей поверхности. Эти модели использовали в основном аналитические решения дифракционной задачи на полуплоскости с идеальными граничными условиями. Обзоры такого рода моделей для расчета экранов приведены в [7, 8].

Наряду с этими задачами предметом повышенного интереса является вопрос целесообразности применения на стенках экрана звукопоглощающих материалов с целью повышения его эффективности. До настоящего времени нет однозначного ответа на этот вопрос, так как получа-

емые разными авторами результаты часто противоречат друг другу. Остановимся на этой проблеме более подробно.

Интенсивные исследования звукопоглощающих экранов начались в 70-х годах прошлого века. Джонассон [9] рассчитал вносимые потери, обеспечиваемые поглощающей поверхностью экрана и дорожным покрытием, на котором он установлен. При рассмотрении потерь от дорожного покрытия он использовал подход, предложенный Ингардом [10]. В результате делается вывод, что вообще не имеет большого значения, является ли тонкий экран звукопоглощающим или нет. Хотя такой вывод не следует с очевидностью из этой работы. В 1974 г. Батлер [11] провел расчеты дифракции на полуплоскости с граничными условиями, соответствующими твердой, мягкой и поглощающей поверхностям, которые показали, что поглощающая поверхность дает некоторый эффект при больших углах дифракции. Кроме того, им было высказано предположение, что улучшенное затухание для поглощающего экрана может быть получено просто путем обработки области вблизи кромки звукопоглощающим материалом. Это предположение подтверждено экспериментами в безэховых условиях, которые показали, что абсорбирующая обработка поверхности экра-

на необходима только на расстоянии порядка одной длины волны от его верхней кромки со стороны источника, что приводит к повышению эффективности экрана до 5 дБ (по сравнению с теоретическим максимумом 6 дБ).

Аналогичные результаты получены Роулинсом [12], который расчетами показал, что полоса звукопоглощающего материала шириной в одну длину волны на верхнем краю экрана приводит к тому же самому дифрагированному полю, которое создается полностью закрытым барьером. К сожалению, Роулинс не рассмотрел эффект размещения этой поглощающей полосы только на стороне источника или на стороне приемника или на обеих сторонах барьера. Фудзивара с соавторами представили [13] теоретическое исследование эффективности полубесконечного звукопоглощающего экрана, которое показало, что звукопоглощающая облицовка поверхности экрана, обращенной к источнику, может существенно увеличить эффективность экрана. В работе не исследовалась облицовка обратной стороны экрана, поскольку по утверждению авторов экспериментально установлено, что это лишь незначительно влияет на эффективность экрана. Несколькими позднее, Исэй [14] также определил эффективность звукопоглощающего экрана, но уже установленного на земле с конечным импедансом. При этом, в отличие от Фудзивары, полученные им теоретические и экспериментальные результаты показали, что поглощающие свойства барьера существенно не изменяют его эффективность.

Важным этапом в исследовании звукопоглощающих экранов явилось появление в 1989 г. статьи Есперанса с соавторами [15], где рассмотрен расчет звукопоглощающего экрана, размещенного на земле. Используемый метод сочетал классическую теорию распространения звука над землей с приближенным решением задачи дифракции над поглощающим клином. Результаты расчета показали, что при значительных углах дифракции облицовка поверхности экрана звукопоглощающим материалом может существенно повысить его эффективность. При этом поглощающий слой должен располагаться на поверхности экрана, соответствующей наибольшему углу дифракции. Также установлено, что при покрытии обеих сторон барьера увеличение вносимых потерь за счет поглощающего материала будет вдвое больше по сравнению с односторонним покрытием. Позднее аналогичные результаты при моделировании поглощающих экранов были получены в [8].

Вместе с тем результаты расчетов Хайека [16] были не столь однозначны и позволили предположить, что поглощение грунта, а не барьера, по-видимому, является наиболее доминирующим фактором в формировании акустических харак-

теристик экрана. И все-таки, как показывает практика [17], поглощающие экраны обладают потенциалом для повышения эффективности их эффективности на величину порядка 2 дБ.

Вследствие неоднозначности получаемых результатов весьма актуальной представляется задача совершенствования методов оценки эффективности звукопоглощающих экранов. В последнее время при решении акустических задач все большее применение находят численные методы расчета [18–21]. В данной работе с помощью конечно-элементного моделирования исследуются особенности дифракции звука на экране со звукопоглощающей облицовкой.

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНАЯ МОДЕЛЬ ЭКРАНА

В программной среде COMSOL Multiphysics строилась двумерная конечно-элементная модель полубесконечного звукопоглощающего экрана. Область построения ограничивалась окружностью диаметром 70 м с центром в начале системы координат. Граничные условия на этой окружности соответствовали согласованной (безэховой) нагрузке. Источник звука S располагался в начале системы координат и в соответствии с двумерностью данной модели являлся линейным. Рассматривалось симметричное расположение источника шума S и расчетной точки P относительно экрана, которое определялось углом α (рис. 1а). При этом при расчетах эффективная высота полубесконечного экрана h_e была постоянной, $h_e = 6$ м, а угол α регулировался изменением расстояния от точек S и P до экрана. В качестве базового принимался экран с абсолютно жесткими стенками толщиной 0.2 м. С ним сравнивались характеристики экранов с различными вариантами звукопоглощающих покрытий. Толщина звукопоглощающего слоя составляла 0.1 м, но общая толщина экрана при размещении на нем такого слоя оставалась неизменной (рис. 1б). Акустические характеристики волокнистого звукопоглощающего материала (ЗПМ) описывались эмпирическими формулами Делани-Базли, в которой основным параметром, помимо частоты звука, является удельное сопротивление продуванию r , определяемой формулой [22]

$$r = 1.2 \times 10^{-5} \frac{\mu \rho_m^2}{d_f^2 \rho_0^2}, \quad (1)$$

где μ – коэффициент динамической вязкости, $\mu = 1.81 \times 10^{-5}$ Па с; d_f – диаметр волокна ЗПМ, м; ρ_m – объемная плотность ЗПМ, кг/м³; ρ_0 – плотность воздуха, $\rho_0 = 1.2$ кг/м³. Для ЗПМ на основе стекловолокна с объемной плотностью 100 кг/м³ и диаметром волокна 10^{-5} м из (1) находим $r = 1.51 \times 10^4$ Н с/м.

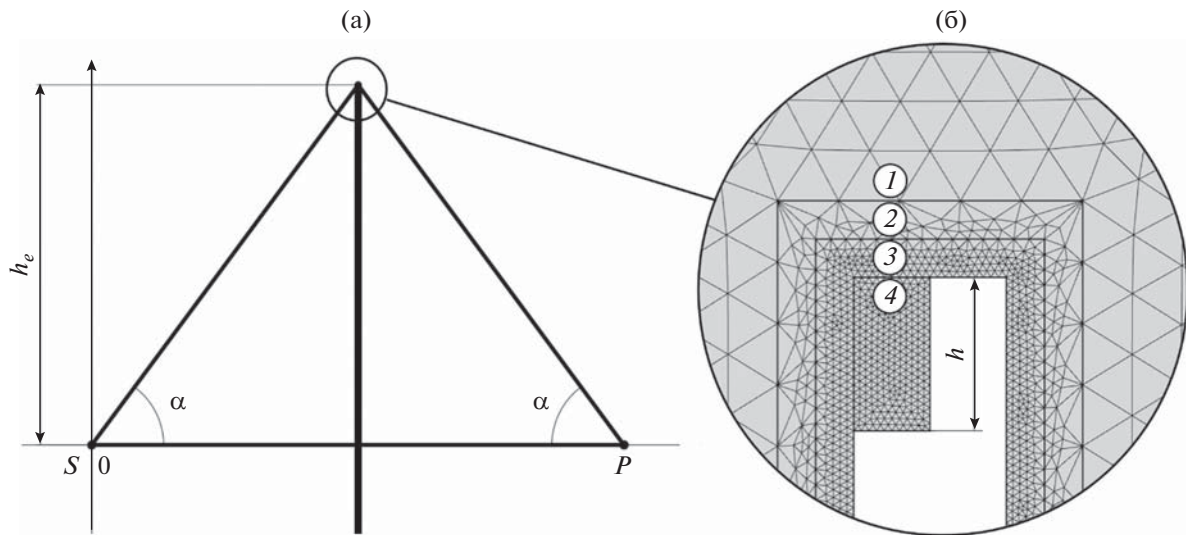


Рис. 1. Конечно-элементная модель экрана: (а) – расчетная схема; (б) – разбиение на конечные элементы.

Важный этап конечно-элементного моделирования – построение сетки. При этом максимальный размер конечного элемента Δ следует выбирать так, чтобы на исследуемой длине волны укладывалось не менее четырех элементов такого размера. В данной работе исследования ограничивались звуком с частотой 800 Гц (длиной волны 0.43 м), из чего следует, что необходимая величина максимального размера конечного элемента $\Delta = 0.11$ м. При моделировании использовалось неравномерное разбиение, более подробное в окрестности экрана. При этом все моделируемое пространство было разделено на четыре области, каждой из которых соответствовало свое значение Δ . Для областей с 1 по 4 (рис. 1б) Δ принимал соответственно следующие значения: 0.11, 0.08, 0.02, 0.01 м.

РЕЗУЛЬТАТЫ

При моделировании рассматривалась эффективность размещения слоя ЗПМ на поверхности полубесконечного экрана. Эта эффективность исследовалась в зависимости от длины слоя h , отсчитываемой от верхней кромки экрана, и определялась вносимыми потерями:

$$IL = L_1 - L_2, \quad (2)$$

где L_1, L_2 – уровни звукового давления в расчетной точке для экранов соответственно без ЗПМ и с ЗПМ.

На первом этапе моделирования рассматривался экран, у которого поверхность, обращенная к источнику, полностью покрыта слоем ЗПМ. Вносимые потери на частоте 400 Гц в зависимости от угла α принимают значения, указанные в табл. 1.

Как следует из представленных данных, при углах $\alpha < 20^\circ$ вносимые потери IL незначительны, менее 1 дБ. Однако с увеличением α происходит интенсивный рост потерь, так что при больших α они становятся больше 10 дБ. Кроме того, как показывают расчеты, эти вносимые потери слабо зависят от частоты звука. Так, при увеличении частоты в два раза, до 800 Гц, изменения вносимых потерь IL незначительны, менее 1 дБ.

На втором этапе моделирования исследовалось влияние длины звукопоглощающего слоя h , размещенного на стороне экрана, обращенной к источнику шума, на вносимые потери. При этом длина поглощающего слоя отсчитывалась от верхней кромки экрана. Представленные на рис. 2 графики показывают, что эффективность размещения слоя ЗПМ на экране сложным образом зависит как от длины слоя, так и от угла α . Вначале с ростом длины этого слоя вносимые потери передаются плавно возрастают, а затем при достижении некоторого максимального значения начинают снижаться, выходя на постоянный уровень. При этом разница между максимальным и установившимся значениями эффективности составляет 1–2 дБ. Заметим также, что длина слоя ЗПМ, который соответствует максимальному значению вносимых потерь IL_{\max} , зависит от угла α и от частоты звука (длины волны). Для угла $\alpha = 80^\circ$ и частоты 800 Гц эта длина составляет 3.2 м, а для ча-

Таблица 1. Вносимые потери на частоте 400 Гц в зависимости от угла α для экрана с полностью покрытой ЗПМ поверхностью, обращенной к источнику

α , град.	20	40	60	70	80
IL , дБ	0.5	1.5	3.5	5.7	10.3

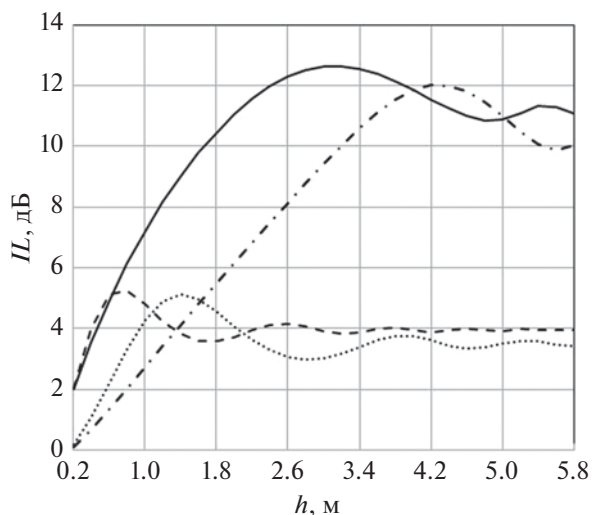


Рис. 2. Зависимость вносимых потерь от длины слоя ЗПМ для различных углов α и частоты f : (—) — $\alpha = 80^\circ, f = 800$ Гц; (---) — $\alpha = 80^\circ, f = 400$ Гц; (.....) — $\alpha = 60^\circ, f = 800$ Гц; (-••••) — $\alpha = 60^\circ, f = 400$ Гц.

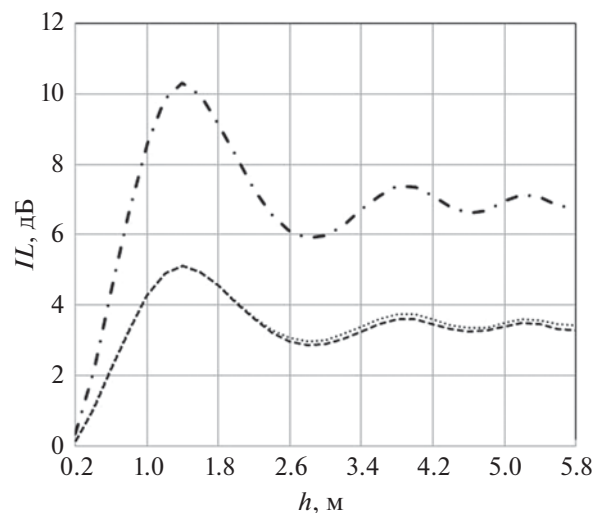


Рис. 3. Зависимость вносимых потерь от длины слоя ЗПМ на разных сторонах экрана: (---) — на стороне источника; (.....) — на стороне приемника; (-••••) — с обеих сторон.

стоты 400 Гц — 4.3 м. Установившееся значение эффективности для частоты 800 Гц лишь незначительно выше (порядка 0.5 дБ), чем для частоты 400 Гц. Для угла $\alpha = 60^\circ$ установившиеся значения эффективности при этом также заметно снижаются, общий характер изменения кривых такой же, что и для угла 80° . Основное отличие состоит в том, что здесь длина слоя ЗПМ, соответствующая IL_{\max} , уменьшается более чем в три раза. Кроме того, при данном α переход по частоте с 800 на 400 Гц смещает положение IL_{\max} также практически в два раза, от 0.75 к 1.4 м. При дальнейшем уменьшении α длина слоя ЗПМ, соответствующая IL_{\max} , по величине приближается к соответствующей длине волны, но все-таки продолжает превышать ее. Очевидно, положение IL_{\max} определяет оптимальную длину слоя ЗПМ. Таким образом, как показывают расчеты, оптимальная длина слоя ЗПМ всегда больше длины звуковой волны, а не равна ей, как отмечается в [12].

На рис. 3 показаны зависимости вносимых потерь IL от длины слоя ЗПМ, когда этот слой располагается со стороны источника, со стороны приемника и с обеих сторон экрана. Эти зависимости показывают, что для симметричного расположения источника и приемника относительно экрана вносимые потери не зависят от того, с какой стороны экрана размещен ЗПМ, а размещение ЗПМ на обеих сторонах экрана увеличивает вносимые потери вдвое, что согласуется с результатами аналитических расчетов, упомянутых в приведенном выше обзоре.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Конечно-элементное моделирование полубесконечного экрана в программной среде Comsol Multiphysics показало, что звукопоглощающая облицовка экрана может существенно увеличивать его акустическую эффективность при углах $\alpha > 20^\circ$. При этом существует некоторая оптимальная длина облицовки, при которой вносимые потери максимальны. Оптимальная длина слоя ЗПМ возрастает как с увеличением α , так и с увеличением длины звуковой волны. Также расчеты показали, что целесообразно размещение ЗПМ с двух сторон экрана, но только в верхней его части, примыкающей к верхней кромке экрана. Следует продолжить данное направление исследований с целью прояснения физической стороны явления дифракции звука на поглощающем экране.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Maekawa Z. Noise reduction by screens // Appl. Acoust. 1968. V. 1. P. 157–173.
2. Kurze U.J., Anderson G.S. Sound attenuation by barriers // Appl. Acoust. 1971. V. 4. P. 35–53.
3. Tatge R.B. Barrier-wall attenuation with a finite sized source // J. Acoust. Soc. Am. 1973. V. 53. P. 1317–1319.
4. Kawai T., Fujimoto K., Itow T. Noise propagation around a thin half-plane // Acta Acust. 1977. V. 38. P. 313–323.
5. Yamamoto K., Takagi K. Expressions of Maekawa's chart for computation // Appl. Acoust. 1992. V. 37. P. 75–82.

6. *Menounou P.* A correction to Maekawa's curve for the insertion loss behind barriers // *J. Acoust. Soc. Am.* 2001. V. 110. P. 1828–1838.
7. *Kurze U.J.* Noise reduction by barriers // *J. Acoust. Soc. Am.* 1974. V. 55. P. 504–514.
8. *Li K.M., Wong H.Y.* A review of commonly used analytical and empirical formulae for predicting sound diffracted by a thin screen // *Appl. Acoust.* 2005. V. 66. P. 45–76.
9. *Jonasson H.G.* Sound reduction by barriers on the ground // *J. Sound Vib.* 1972. V. 22. P. 113–126.
10. *Ingard U.* On the reflection of a spherical sound wave from an infinite plane // *J. Acoust. Soc. Am.* 1951. V. 23. P. 329–335.
11. *Butler G. F.* A note on improving the attenuation given by a noise barrier // *J. Sound Vib.* 1974. V. 32. P. 367–369.
12. *Rawlins A. D.* Diffraction of sound by a rigid screen with an absorbent edge // *J. Sound Vib.* 1976. V. 47. P. 523–541.
13. *Fujiwara K.* Noise control by barriers // *Appl. Acoust.* 1977. V. 10. P. 147–159.
14. *Isei T.* Absorptive noise barrier on finite impedance ground // *J. Acoust. Soc. Jpn. (E)*. 1980. V. 1. P. 3–9.
15. *L'Esperance A., Nicolas J., Daigle G.A.* Insertion loss of absorbent barriers on ground // *J. Acoust. Soc. Am.* 1989. V. 86. P. 1060–1064. <https://doi.org/10.1121/1.398097>
16. *Hayek S.I.* Mathematical modeling of absorbent highway noise barriers // *Appl. Acoust.* 1990. V. 31. P. 77–100.
17. *Cohn L.F., Harris R.A., Rolfer R.L., et al.* Special Noise Barrier Applications // *Transp. Resear. Rec.* 1416. 1993. P. 69–74.
18. *Yang C., Pan J., Cheng L.* A mechanism study of sound wave-trapping barriers // *J. Acoust. Soc. Am.* 2013. V. 134. P. 1960–1969.
19. *Li H.* Streamline computation study on rotation aerodynamic noise prediction of cross-flow fan // *Acoust. Phys.* 2019. V. 65. P. 418–431.
20. *Муравейко А.С.* Расчетное исследование газодинамических и аэроакустических характеристик вентилятора // *Акуст. журн.* 2020. Т. 65. С. 446–452.
21. *Kulkina V., Komkin A.* Study of acoustic characteristics of noise barriers // *MATEC Web of Conf. ASO-2020.* V. 320. № 00030.
22. *Komkin A.I., Lvov V.A., Nesterov N.S.* Measurement of blowout resistance of fibrous sound-proof materials // *Measur. Techn.* 2017. V. 57. P. 736–741.