

УДК: 502.3:621.311.1

OECD: 02.07. IH

Влияние опорной поверхности на акустическую эффективность экрана

Тупов В.Б.^{1*}, Мухаметов А.Б.²¹ д.т.н., профессор, профессор² ассистент^{1,2} ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», г. Москва, РФ

Аннотация

В статье представлены результаты математического моделирования акустических экранов в программе COMSOL Multiphysics. Выполнена верификация математической 2D модели с расчётными данными по формуле Курце. Показано, что при учёте влияния опорной поверхности наблюдаются явления конструктивной и деструктивной интерференции, которые существенно влияют на затухание шума. Получены зависимости затухания шума на экране при его различных высотах и различных высотах расположения источника шума над землей. Определено, что изменение акустической эффективности экрана как от его высоты, так и высоты расположения источника шума имеет сложный характер, который вследствие отражения от опорной поверхности характеризуется резкими изменениями затухания шума на различных среднегеометрических частотах. Получено, что максимальной акустической эффективностью обладает экран, расположенный на твердой поверхности.

Ключевые слова: шум, акустические экраны, опорная поверхность, математическое моделирование, акустическая эффективность.

The influence of the supporting surface on the acoustic efficiency of the barrier

Tupov V.B.¹, Mukhametov A.B.²¹ Doctor of Sc. Professor, Professor² Assistant^{1,2} MPEI, Moscow, Russia

Abstract

The article presents the results of mathematical modeling of acoustic barriers in the COMSOL Multiphysics program. The verification of the mathematical 2D model with the calculated data according to the Kurze formula was carried out. It is shown that when the influence of the supporting surface is considered, the phenomena of constructive and destructive interference are observed, which significantly affect the noise attenuation. Dependences of noise attenuation on the barrier are obtained for its different heights and different heights of the noise source above the ground. It is determined that the change in the acoustic efficiency of the barrier, both on its height and the height of the noise source, has a complex character, which, due to reflection from the supporting surface, is characterized by sharp changes in noise attenuation at various octave band frequencies. It was found that the barrier located on a solid surface has the maximum acoustic efficiency.

Keywords: noise, acoustic barriers, supporting surface, math modeling, acoustic efficiency.

*E-mail: TupovVB@mpei.ru (Тупов В.Б.)

Введение

Акустические экраны широко используются для снижения шума различного типа оборудования, как автомобильного и железнодорожного [1-2], так и энергетического [3]. Исследованию акустических свойств экранов посвящено большое количество работ [1-12], а по расчетам – выпущены нормативные документы [13-15].

Под акустическим экраном согласно [13] понимается протяженная искусственная преграда, которая устанавливается на пути распространения шума от реального источника. Свойство экранов снижать шум основано на отражении и рассеивании падающих на него звуковых волн. За экраном образуется «звуковая тень», если его размеры больше длины звуковой волны. Наибольшей эффективности экраны достигают в области высоких частот, наименьшей – в области низких частот.

На акустическую эффективность экрана влияют различные факторы: конструктивные (длина, высота), акустические (звукоизоляция и звукопоглощение), расположение экрана в пространстве между источником шума и расчётной точкой, наличие и вид надстройки на свободном ребре экрана, акустические свойства опорной поверхности и др. [4, 5]. Для наиболее точной оценки эффективности экрана необходимо в совокупности учитывать данные факторы.

Для оценки затухания шума на экране обычно используют подходы З. Маекавы или Курце [6], полученные в результате экспериментальных исследований. Они позволяют достаточно просто рассчитать акустическую эффективность экрана на основе числа Френеля [6]. Однако, стоит отметить, что данные подходы не учитывают акустические свойства опорной поверхности, наличие надстройки на свободном ребре.

Для оценки эффективности экрана используют также математические модели и численные методы решения поставленной задачи. К примеру, в статье [7] приведены результаты математического моделирования акустических экранов с целью определения их эффективности. Расчёты выполнены в программном пакете COMSOL Multiphysics. Исследовано влияние Т-образной надстройки и надстройки в виде восьмиугольника на акустическую эффективность экрана. Определено, что использование надстройки позволяет увеличить эффективность экрана на 2-4 дБ.

В работе [8] в программе COMSOL Multiphysics проанализировано изменение эффективности экрана с учетом акустических свойств опорной поверхности. Исследована эффективность Т-образной и Г-образной надстройки на свободное ребро акустического экрана. Получено, что наиболее целесообразным является применение Т-образной надстройки.

В статье [9] представлены результаты моделирования экранов в программе Ansys. Проанализировано влияние толщины и материала на затухание шума на экране. Определено, что экран из бетона имеет наибольшую акустическую эффективность. В [10, 11] с помощью 2D модели, построенной в программе COMSOL Multiphysics, выполнено сравнение результатов моделирования с расчётами по формуле Маекавы. Представлены зависимости затухания шума на экране от его высоты, положения источника шума и расчётной точки с учетом акустических свойств опорной поверхности.

В данной статье проведен расчет значений затухания шума на экране с учётом и без учёта акустических свойств опорной поверхности. В целях выполнения сравнения изначально определено изменение эффективности экрана от его высоты и высоты расположения источника шума без учёта опорной поверхности. Для решения указанных задач перед проведениями исследований выполнена верификация расчётной модели с результатами, полученными по формуле Курце.

1. Верификация математической модели и результаты расчётов

Для выполнения поставленных задач в программе COMSOL Multiphysics выполнено математическое моделирование тонкого экрана бесконечной длины с целью определения его акустической эффективности. Под акустической эффективностью экрана согласно [13] понимается разность уровней звукового давления (УЗД) (уровней звука (УЗ)) в одной и той же расчётной точке до и после установки акустического экрана:

$$\Delta L = L_1 - L_2, \quad (1)$$

где L_1 – УЗД (УЗ) в расчётной точке до установки акустического экрана, дБ (дБА); L_2 – УЗД (УЗ) в расчётной точке после установки акустического экрана, дБ (дБА).

Для оценки акустической эффективности экрана бесконечной длины использована 2D модель, которая представляет собой акустический домен в виде сферы диаметром 20 м (рис. 1). Источник звуковых волн расположен на расстоянии 2 м (l_1) от акустического экрана. Точка приёмника (расчётная точка (РТ)) находится на расстоянии 2 м (l_2) от экрана на высоте 0,2 м. При выполнении расчётов высота расположения источника шума меняется от 0,2 до 2 м. Высота экрана изменяется от 1 до 5 м (красная линия). В расчёте моделируется распространение воздушного шума. Для этого задаются основные свойства воздуха: плотность 1,2 кг/м³ и скорость звука 343 м/с.

Как правило, источники шума располагаются на уровне земли, поэтому звуковая энергия от них излучается по полусфере. Во избежание влияния звуковых волн, распространяющихся с нижней части сферы, на значения УЗД (УЗ) в расчётной точке в модели предусмотрена установка дополнительного экрана (желтая линия).

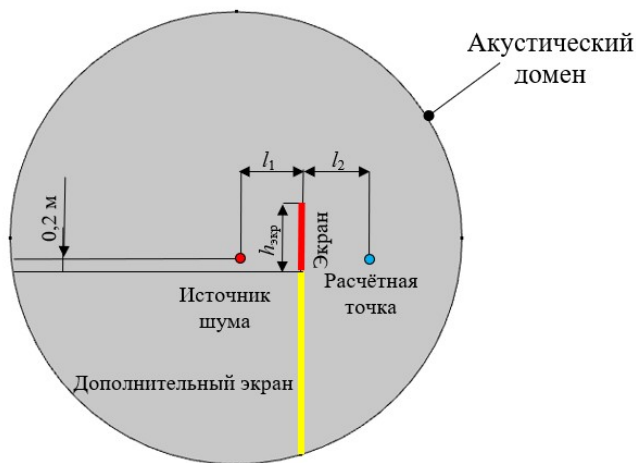


Рис. 1. Расчётная модель

Для задания источника звуковых волн использовано граничное условие монополюсного точечного источника. Свойства экрана описаны с помощью условия акустическая жесткая стенка. На внешних границах сферы задано условие поглощения (условие импеданса), предполагающее отсутствие отражения звуковых волн от внешних границ акустического домена [7, 10, 11].

Расчёты выполнены для октавной полосы со среднегеометрическими частотами 31,5-4000 Гц. Размер элементов сетки выбран по рекомендациям [7-11], согласно которым необходимо принимать 5 элементов на одну длину волны. Максимальная среднегеометрическая частота составляет 4000 Гц, поэтому размер элемента сетки выбран равным 0,01 м с учётом запаса.

Выполнена верификация расчётной модели с известной формулой Курце [6, 14]:

$$\Delta L = 20 \cdot \lg \left(\frac{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot N}}{th \sqrt{2 \cdot \pi \cdot N}} \right) + 5, \quad (2)$$

где $N = \frac{(2 \cdot \delta)}{\lambda}$ – число Френеля ($N \geq -0,2$); δ – разность длин звукового луча, м. Разность длин звукового луча определяется по формуле (см. рис. 2):

$$\delta = a + b - c, \quad (3)$$

где a – кратчайшее расстояние между источником шума и верхней кромкой акустического экрана, м; b – кратчайшее расстояние от верхней кромки экрана до расчётной точки, м; c – кратчайшее расстояние от источника шума до расчётной точки, м.

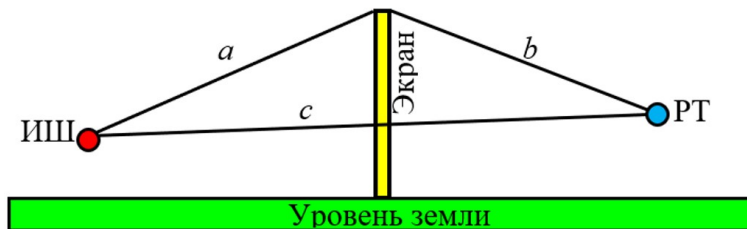


Рис. 2. Схема определения разности длин звукового луча

В результате математического моделирования получены значения акустической эффективности экрана высотой 1 и 2 м. На рис. 3-4 представлено сравнение результатов математического моделирования и расчётных данных согласно формуле (2).

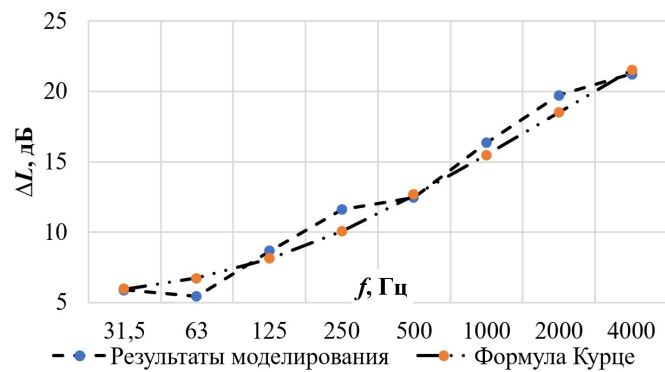


Рис. 3. Сравнение результатов расчёта для акустического экрана высотой 1 м ($l_1=2\text{м}, l_2=2\text{м}$)

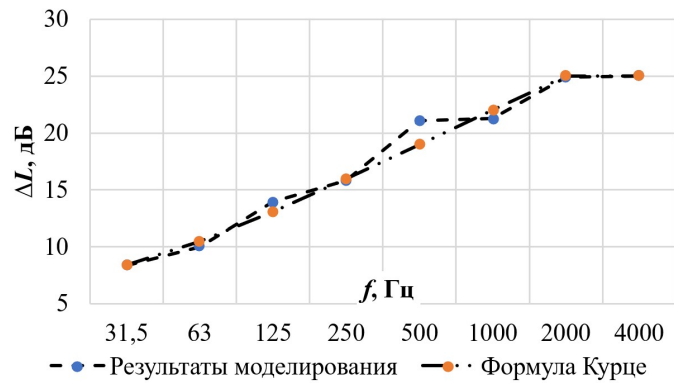


Рис. 4. Сравнение результатов расчёта для акустического экрана высотой 2 м ($l_1=2\text{м}$, $l_2=2\text{м}$)

Полученные результаты показывают хорошую сходимость. Максимальная разница между расчётными данными в диапазоне среднегеометрических частот 31,5-4000 Гц не превышает 2 дБ, что подтверждает правильность полученных результатов.

В качестве примера на рис. 5 представлено изменение уровня звукового давления на среднегеометрической частоте 500 Гц без экрана и при его установке. Высота экрана составляет 2 м.

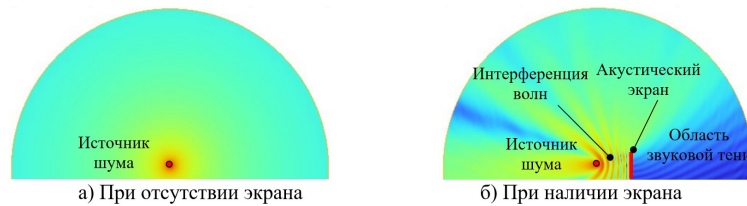


Рис. 5. Изменение УЗД на среднегеометрической частоте 500 Гц

При наличии экрана возникает наложение падающих на препятствие волн, распространяющихся от источника шума с волнами, отраженными от поверхности экрана, в результате чего наблюдается явление интерференции. За акустическим экраном возникает область звуковой тени вследствие того, что размеры препятствия больше длины звуковой волны на среднегеометрической частоте 500 Гц.

На рис. 6 представлено изменение акустической эффективности экрана для диапазона среднегеометрических частот 31,5-4000 Гц при различных высотах преграды (1, 2 и 5 м).

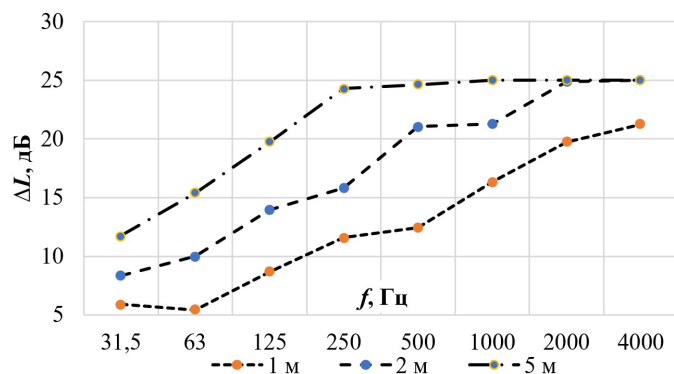


Рис. 6. Изменение акустической эффективности экрана при различных его высотах

При увеличении высоты экрана от 1 до 5 м наблюдается значительный рост затухания шума (от 3 до 12 дБ) во всем спектре частот. Стоит отметить, что при высоте 5 м акустическая эффективность экрана в диапазоне среднегеометрических частот 250-4000 Гц достигает максимального значения и составляет 25 дБ.

На рис. 7 представлено изменение акустической эффективности экрана для диапазона среднегеометрических частот 31,5-4000 Гц при различной высоте расположения источника шума (0,2-2 м).

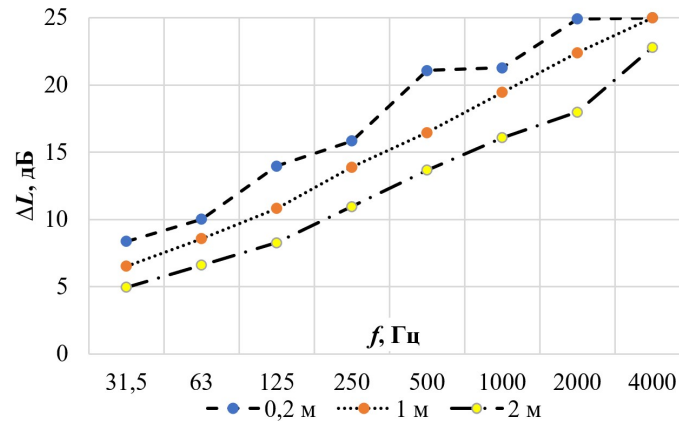


Рис. 7. Изменение акустической эффективности экрана при различных расстояниях от ИШ до преграды

Максимальная акустическая эффективность во всём диапазоне изменения среднегеометрических частот от 31,5 до 4000 Гц наблюдается при высоте расположения источника шума, равной 0,2 м. При дальнейшем увеличении высоты расположения уменьшается разность хода звукового луча и, как следствие, акустическая эффективность экрана. Полученные результаты согласуются как с результатами, полученными по формуле Курце, так и с результатами, полученными в [3].

2. Влияние опорной поверхности на акустическую эффективность экрана

На эффективность экрана влияют акустические свойства опорной поверхности [4, 5]. Методики З. Маекавы или Курце [6, 14] не учитывают акустические свойства опорной поверхности. С целью определения влияния земли на акустическую эффективность экрана в данном разделе проведено математическое моделирование и определены значения затухания шума на экране.

Для исследования влияния земли в модели, представленной на рис. 1, построена опорная поверхность. Для описания свойств земли использовано граничное условие импеданса с заданием коэффициента звукопоглощения. Изначально в качестве опорной поверхности рассмотрена поверхность с низким коэффициентом звукопоглощения, что характерно для твердой поверхности с низкой пористостью [15].

На рис. 8-9 представлены результаты акустической эффективности экрана с учётом влияния земли для октавной полосы со среднегеометрическими частотами 31,5-4000 Гц. Результаты представлены для двух значений высот источника шума и расчётной точки над уровнем земли: 0,2 и 1 м. Высота экрана составляет 2 м. Для сравнения на график добавлена кривая акустической эффективности экрана без учёта влияния земли.

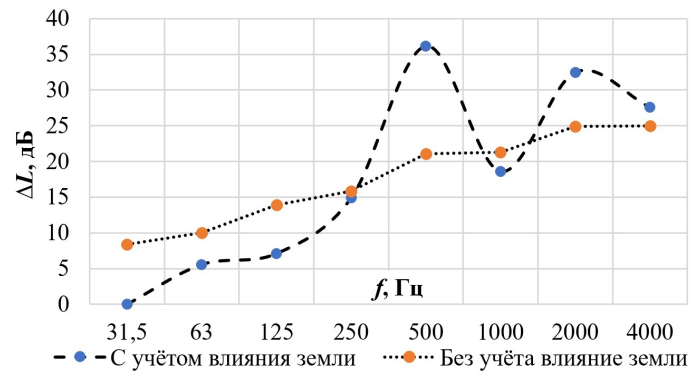


Рис. 8. Акустическая эффективность экрана для среднегеометрических частот 31,5-4000 Гц с учетом и без учёта влияния земли (высота расположения ИШ – 0,2 м, РТ – 0,2 м)

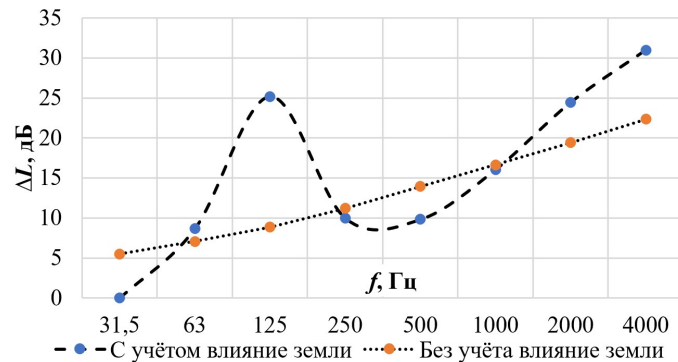


Рис. 9. Акустическая эффективность экрана для среднегеометрических частот 31,5-4000 Гц с учетом и без учёта влияния земли (высота расположения ИШ – 1 м, РТ – 1 м)

При отсутствии отражения от земли затухание шума на экране неуклонно растёт с увеличением частоты. При учёте влияния земли к спектру добавляются дополнительные помехи. В данном случае интерференция вызвана волнами, достигающими точки наблюдения (расчётной точки) двумя разными путями: непосредственно от экрана или путем отражения от земли. К примеру, при расположении ИШ и РТ на высоте 0,2 м, на среднегеометрических частотах 500, 2000 и 4000 Гц наблюдается явление деструктивной интерференции, а акустическая эффективность экрана с учётом влияния земли растёт по сравнению с результатами без её учета. Напротив, на среднегеометрических частотах 31,5-250 и 1000 Гц наблюдается конструктивная интерференция, которая снижает акустическую эффективность экрана с учётом влияния земли на 2-8 дБ по сравнению с затуханием шума без учёта земли.

На рис. 10 представлено изменение акустической эффективности экрана от высоты для октавной полосы со среднегеометрическими частотами 31,5-4000 Гц с учетом влияния земли. Расстояние от ИШ до экрана и от экрана до РТ составляет 2 м.

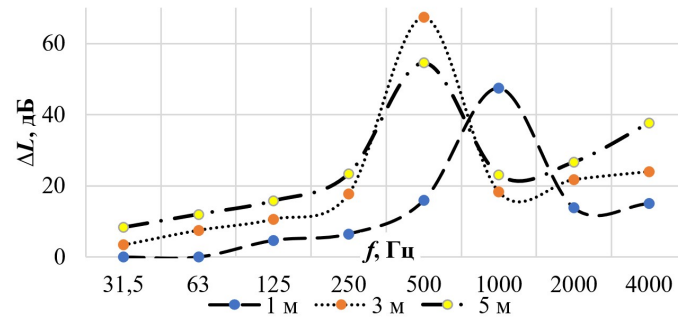


Рис. 10. Акустическая эффективность экрана для среднегеометрических частот 31,5-4000 Гц при его различных высотах

Определено, что при изменении высоты экрана от 1 до 5 м характер изменения кривой акустической эффективности на среднегеометрических частотах 31,5-250 Гц соответствует результатам, полученным по формуле Курце. Однако, из-за влияния земли и явления деструктивной интерференции, на среднегеометрических частотах 500-1000 Гц наблюдаются резкий прирост акустической эффективности. Причем для экрана высотой 1 м максимальное значение затухания шума наблюдается на среднегеометрической частоте 1000 Гц и составляет 47 дБ. Для экрана высотой 3 и 5 м значения максимальной акустической эффективности наблюдаются на среднегеометрической частоте 500 Гц и составляют 54 и 67 дБ соответственно. Для более наглядной оценки на рис. 11 показано изменение эффективности экрана от его высоты для среднегеометрических частот 125, 1000, 2000 и 4000 Гц.

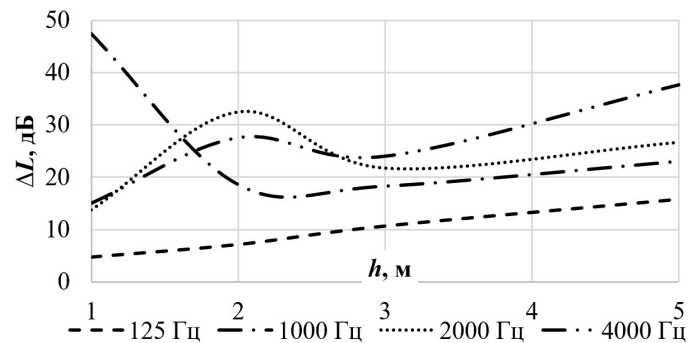


Рис. 11. Акустическая эффективность экрана от высоты для среднегеометрических частот 125, 1000, 2000 и 4000 Гц

Для среднегеометрической частоты 125 Гц увеличение высоты экрана от 1 до 5 м приводит к росту затухания шума. Однако, для среднегеометрических частот 1000, 2000, 4000 Гц изменение эффективности экрана от высоты имеет более сложный характер. Например, для среднегеометрической частоты 1000 Гц максимальная эффективность наблюдается на высоте 1 м. Изменение высоты до 2 м приводит к резкому снижению затухания шума. Однако при дальнейшем росте высоты до 5 м эффективность экрана снова растёт. Таким образом, изменение акустической эффективности экрана от высоты с учётом опорной поверхности имеет сложный характер, который вследствие отражения от земли характеризуется резкими приростами затухания шума на различных частотах.

Изменение эффективности экрана при различных высотах расположения источника шума над землей представлено на рис. 12. Высота расположения источника шума изменяется от 0,2 до 2 м. Расчётная точка расположена на высоте 0,2 м. Расстояние ИШ и РТ до экрана равно 2 м.

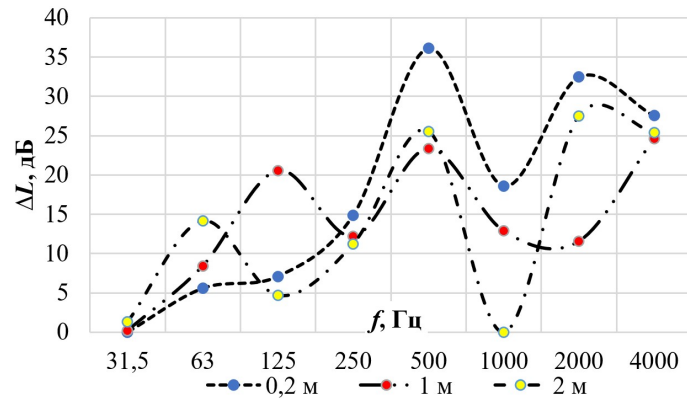


Рис. 12. Акустическая эффективность экрана для среднегеометрических частот 31,5-4000 Гц при различных высотах расположения ИШ над землей

Изменение кривых эффективности экрана при различной высоте расположения источника шума также имеет немонотонный характер. Максимальная эффективность экрана в диапазоне среднегеометрических частот 250-4000 Гц наблюдается при высоте источника шума, равной 0,2 м над уровнем земли. На среднегеометрической частоте 125 Гц большая эффективность наблюдается при высоте расположения ИШ 1 м, на среднегеометрической частоте 63 Гц – при высоте 2 м. На среднегеометрической частоте 31,5 Гц затухания шума на экране примерно одинаковы и не зависят от высоты расположения источника шума.

Далее выполнено сравнение акустической эффективности экрана при различных акустических свойствах опорных поверхностей, в качестве которых рассматриваются твердая, пористая и смешанная поверхности [15]. Акустические характеристики опорной поверхности заданы с помощью коэффициента звукопоглощения, который меняется от 0,1 до 0,9. Высота расположения источника шума и расчетной точки составляет 0,2 м. Расстояние от ИШ и РТ до экрана, и высота экрана равны 2 м.

Результаты моделирования акустической эффективности экрана при различных опорных поверхностях представлены на рис. 13. Определено, что в диапазоне среднегеометрических частот 250-2000 Гц максимальной акустической эффективностью обладает экран, расположенный на твердой поверхности. На среднегеометрических частотах 31,5-125 и 4000 Гц значения затухания шума на экране примерно одинаковы и не зависят от вида опорной поверхности. Примечательно, что при пористой поверхности вследствие уменьшения отражения волн от земли кривая акустической эффективности имеет монотонный характер.

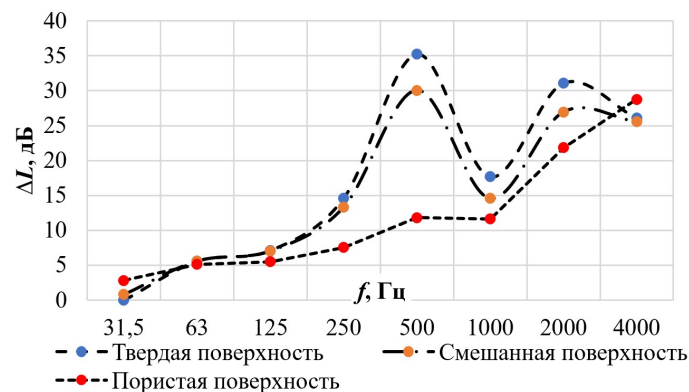


Рис. 13. Акустическая эффективность экрана при различных опорных поверхностях

В целях визуализации результаты расчётов при различных свойствах опорной поверхности представлены в виде изолиний изменения уровня звукового давления на среднегеометрической частоте 4000 Гц (рис. 14).

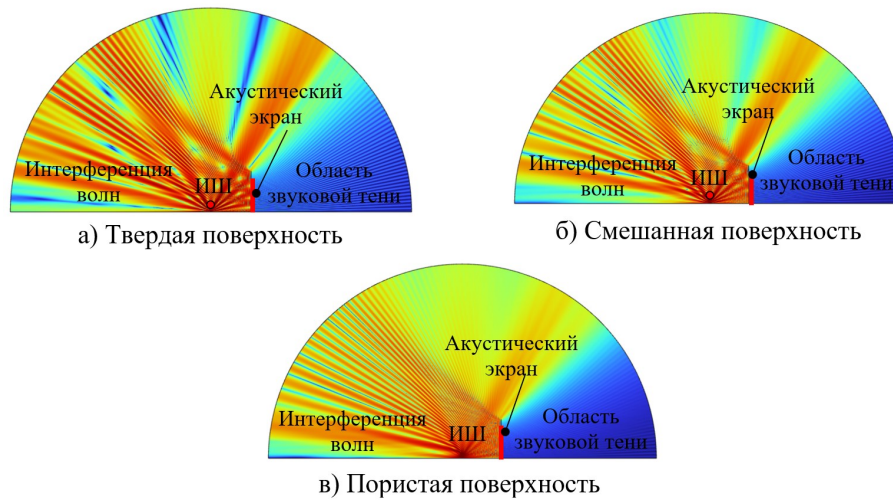


Рис. 14. Изменение УЗД на среднегеометрической частоте 4000 Гц

Из приведенных результатов видно, что при твердой поверхности заметно увеличивается отражение звука от земли, вследствие чего интерференционная картина при наличии акустического экрана заметно усложняется. При пористой поверхности отражение звука в основном происходит только от акустического экрана. Приведенные результаты необходимо учитывать при проектировании мероприятий по снижению шума различных источников.

Заключение

Выполнена верификация расчётной модели акустического экрана в программе COMSOL Multiphysics с результатами расчёта по формуле Курце. Максимальная разница между расчётными данными не превышает 2 дБ, что подтверждает высокую сходимость численного и аналитического расчётов.

Показано, что при учёте влияния опорной поверхности наблюдаются явления конструктивной и деструктивной интерференции, которые существенно влияют на затухание шума. Получены зависимости затухания шума на экране при его различных высотах и различных высотах расположения источника шума над землей. Определено, что изменение акустической эффективности экрана как от его высоты, так и высоты расположения источника шума имеет сложный характер, который вследствие отражения от опорной поверхности характеризуется резкими изменениями затухания шума на различных среднегеометрических частотах.

Из анализа влияния различных видов опорной поверхности на эффективность экрана получено, что максимальной акустической эффективностью обладает экран, расположенный на твердой поверхности. Приведенные результаты необходимо учитывать при проектировании мероприятий по снижению шума.

**Работа выполнена в рамках проекта «Повышение эффективности мер по снижению шума вентиляторных градирен» при поддержке гранта НИУ «МЭИ» на реализацию программы научных исследований «Приоритет 2030: Технологии будущего» в 2022-2024 гг.».*

Список литературы

1. Иванов Н.И. Защита от шума и вибрации: учебник / Н.И. Иванов // СПб.: НИЦ АРТ., 268 с, 2017.
2. Тупов В.Б. Факторы физического воздействия ТЭС на окружающую среду. М.: МЭИ, 284 с, 2012.
3. Акустические экраны для снижения шума от энергетического оборудования / Тупов В.Б., Семин С.А., Тупов Б.В., Тараторин А.А., Розанов Д.А. // Электрические станции, 2016, №10, с. 48-52.
4. Тюрина Н.В., Бобровских В.П. Новые методики расчета эффективности акустических экранов // Защита населения от повышенного шумового воздействия: Сб. докладов Всерос. науч.-практ. конф. с международным участием. СПб., 2015. С. 323–325
5. Акустические экраны для снижения шума в жилой застройке / Иванов Н.И., Семенов Н.Г., Тюрина Н.В. // Приложение к журналу «Безопасность жизнедеятельности». 2012, №4, с. 1-24.
6. Безверхая Е.А., Чеботарева Е.Ю. Анализ методик расчёта эффективности шумозащитных экранов // Noise. Theory and Practice, № 2(12), 2018, с. 30-39.
7. D. Saliunas, V. Volkovas. Investigation of noise barriers enhancement efficiency for attenuation of low frequency traffic noise // Mechanika, 2015 Volume 21(1), ISSN 1392-1207, pp. 56-63.
8. Patrick Grahn, Mads Herring Jensen. Optimizing noise barriers with COMSOL Multiphysics // AKUSTIIKKARÄIVÄT 2019, Lokakuuta, Oulu, pp. 346-355.
9. Numerical analysis of transmission loss through various noise barrier / Kuan Lin Jie, Teoh Choe Yung, Ko Ying Hao, Goh Yeh Huann // Proceedings of the International Conference on Vibration, Sound and System Dynamics, Penang, 2017, pp. 60-64.
10. В.А. Кулькина, А.И. Комкин, А.И. Быков. Исследование акустических характеристик шумозащитных экранов // Четвертая Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов Акустика среды обитания (АСО), МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019, с. 99-107.
11. Д.Е. Непряхин. Исследование акустической эффективности шумозащитного экрана при наличии подстилающей поверхности // Шестая Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов Акустика среды обитания (АСО), МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021, с. 208-213.
12. Samaneh M.B. Fard, Nicole Kessissoglou, Stephen Samuels, Marion Burgess. Numerical study of noise barrier designs // Proceedings of Acoustics 2013 – Victor Harbor, Australia, 2013, pp. 1-4.
13. ГОСТ 33329-2015. Межгосударственный стандарт. Экраны акустические для железнодорожного транспорта. Технические требования // Принят: Росстандартом 10.09.2015.
14. СП 276.1325800.2016. Свод правил. Здания и территории. Правила проектирования защиты от шума транспортных потоков // Принят: Министерством строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации 03.12.2016.
15. ГОСТ 31295.2–2005 (ИСО 9613–2:1996) Шум. Затухание звука при распространении на местности.

References

1. Ivanov N.I. Protection from noise and vibration: textbook / N.I. Ivanov // St. Petersburg: SIC ART., 268 pp., 2017.
2. Tupov V.B. Factors of physical impact of thermal power plants on the environment. Moscow: MEI, 284 pp., 2012.
3. Acoustic barriers for noise reduction from power equipment / Tupov V.B., Semin S.A., Tupov B.V., Taratorin A.A., Rozanov D.A. // Electric stations, No. 10, pp. 48-52, 2016.
4. Tyurina N.V., Bobrovskikh V.P. New methods for calculating the effectiveness of acoustic barriers // Protection of the population from increased noise exposure: Collection of reports of the All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation. SPb., 2015. pp. 323–325.
5. Acoustic barriers for noise reduction in residential buildings / Ivanov N.I., Semenov N.G., Tyurina N. V. // Appendix to the journal "Life safety". 2012, No.4, pp. 1-24.
6. Bezverkhaya E.A., Chebotareva E.Yu. Analysis of methods for calculating the effectiveness of noise-proof barriers // Noise. Theory and Practice, No. 2(12), 2018, pp. 30-39.
7. D. Saliunas, V. Volkovas. Investigation of noise barriers enhancement efficiency for attenuation of low frequency traffic noise // Mechanika. 2015 Volume 21(1), ISSN 1392-1207, pp. 56-63.
8. Patrick Grahn, Mads Herring Jensen. Optimizing noise barriers with COMSOL Muliphysics, AKUSTIIKKAPÄIVÄT 2019, Lokakuuta, Oulu, pp. 346-355.
9. Numerical analysis of transmission loss through various noise barrier / Kuan Lin Jie, Teoh Choe Yung, Ko Ying Hao, Goh Yeh Huann // Proceedings of the International Conference on Vibration, Sound and System Dynamics, Penang, 2017, pp. 60-64.
10. V.A. Kulkina, A.I. Komkin, A.I. Bykov. Research of acoustic characteristics of noise-proof barriers // The Fourth All-Russian Conference of young scientists and specialists Acoustics of the habitat (ASO), Bauman Moscow State Technical University, 2019, pp. 99-107.
11. D.E. Nepryakhin. Investigation of acoustic efficiency of a noise-proof barrier in the presence of an underlying surface // Sixth All-Russian Conference of Young Scientists and specialists Acoustics of the habitat (ASO), 2021, pp. 208-213.
12. Samaneh M.B. Fard, Nicole Kessissoglou, Stephen Samuels, Marion Burgess. Numerical study of noise barrier designs // Proceedings of Acoustics 2013 – Victor Harbor, Australia, 2013, pp. 1-4.
13. GOST 33329-2015. Interstate standard. Acoustic screens for railway transport. Technical requirements // Accepted by: Rosstandart on 10.09.2015.
14. SP 276.1325800.2016. Set of rules. Buildings and territories. Rules for the design of traffic noise protection.
15. GOST 31295.2–2005 (ISO 9613–2:1996) Noise. Sound attenuation during propagation on the ground.