

Моделирование интерферометрических шумозащитных экранов для железнодорожного транспорта Китая

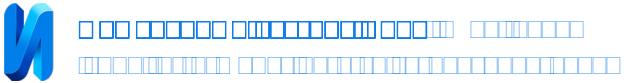
Шибо Син, Н.Р. Туркина, Минсюй Го

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»
им. Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург

Аннотация: Для оценки эффективности шумоподавления экранов железнодорожного транспорта в данной статье использовался программный комплекс COMSOL Multiphysics (модуль «Акустика давления, частотная область»). С помощью метода конечных элементов были проведены расчеты и оценены звукоизоляционные характеристики шумозащитных экранов, также проведен сравнительный анализ характеристик различных моделей экранов. На основе эффектов акустической интерференции предлагается устройство шумоподавления интерференционного типа, в котором заполнение верхней части пористым материалом улучшает дифракционное поглощение звука шумозащитного экрана, тем самым повышая его акустические характеристики.

Ключевые слова: программа COMSOL, метод конечных элементов, транспорт, шумоизоляционные экраны, акустическая интерференция, акустические характеристики.

С ускорением урбанизации в Китае система метро стала основным видом общественного транспорта в крупных городах. Проблемы шума и вибрации окружающей среды, вызванные работой поездов городского железнодорожного транспорта, становятся все более заметными, что привлекает большое внимание со стороны всех соответствующих ведомств в КНР. Последствия шума и вибрации, а также степень воздействия на окружающую среду требуют разработки и реализации различных мер по их снижению. Это обеспечивает исходную основу для последующей оценки воздействия на окружающую среду, а также инженерного проектирования и



строительства метрополитена [1, 2]. Таким образом, именно темой снижения вибрации и шума в городском железнодорожном транспорте является поиск целенаправленных мер и способов снижения и ослабления шума, защиты существующего шума и минимизации вреда, наносимого организму человека [3, 4].

Моделирование конструкций экранов и аналитические расчеты в работе были проведены в COMSOL Multiphysics — это программное обеспечение для мультифизического моделирования. В данной статье для расчета акустических характеристик звуковых экранов железнодорожного транспорта используется модуль «Акустика давления, частотная область», а моделирование проводится с помощью модулей частотного диапазона и акустических конечных элементов. Внешнее бесконечное звуковое поле моделируется с помощью акустических граничных элементов. Конечные условия по длине и форма поперечного сечения шумозащитного экрана являются однородными. Трехмерная модель звукового поля может рассматриваться как двумерная модель для вычислений, и, соответственно, линейные источники, параллельные экрану, могут быть преобразованы в точечные источники.

В данной статье для акустического моделирования звукоизоляционного экрана были использованы следующие управляющие уравнения программы COMSOL (1) – (3):

$$\nabla \cdot \left(-\frac{1}{\rho_c} (\nabla p_t - q_d) \right) - \frac{k_{eq}^2 p_t}{\rho_c} = Q_m \quad (1)$$

где ρ_c – эквивалентная плотность, p_t – полное звуковое давление, q_d – источник импульса, k_{eq}^2 – поправка на направление распространения волны, Q_m – источник звука.

$$p_t = p + p_b \quad (2)$$

где p_t – полное звуковое давление; p – падающая (инцидентная) волна; p_b – отражённая или рассеянная волна.

$$\kappa_{eq}^2 = \left(\frac{\omega}{c_c}\right)^2 - k_z^2, \quad (3)$$

где k_{eq}^2 – поправка на направление распространения волны ω – угловая частота, c_c – скорость звука в среде, k_z – продольная компонента волнового числа.

В данном исследовании для эквивалентной обработки использован точечный источник мощностью 1 Вт. Поверхность земли и экрана определены как жесткие граничные условия, без учета их звукопоглощающих свойств. Для акустической вычислительной модели экрана диапазон частот источника установлен от 50 до 5000 Гц, плотность воздуха составляет 1,225 кг/м³, а скорость звука в воздухе $c = 340$ м/с.

В работе были использованы уравнения колебаний звуковых источников:

$$\begin{cases} y_1 = A_1 \cos(\omega t + \varphi_1) \\ y_2 = A_2 \cos(\omega t + \varphi_2) \end{cases} \quad (4)$$

где φ_1 и φ_2 – начальные фазы колебаний звуковых источников, ω – угловая

частота колебаний звуковых источников, A_1 и A_2 – амплитуды колебаний звуковых источников.

Пусть две волны создают в произвольной точке Р колебательные составляющие:

$$\begin{cases} y_{1p} = A_1 \cos(\omega t + \varphi_1 - 2\pi \frac{r_1}{\lambda}) \\ y_{2p} = A_2 \cos(\omega t + \varphi_2 - 2\pi \frac{r_2}{\lambda}) \end{cases} \quad (5)$$

где λ – длина волны, r_1 – расстояние от источника S_1 до точки Р, r_2 – расстояние от источника S_2 до точки Р.

Тогда суммарное колебание двух волн в точке Р можно записать как:

$$y_p = y_{1p} + y_{2p} = A \cos(\omega t + \varphi) \quad (6)$$

$$\tan \varphi = \frac{A_1 \sin\left(\varphi_1 - 2\pi \frac{r_1}{\lambda}\right) + A_2 \sin\left(\varphi_2 - 2\pi \frac{r_2}{\lambda}\right)}{A_1 \cos\left(\varphi_1 - 2\pi \frac{r_1}{\lambda}\right) + A_2 \cos\left(\varphi_2 - 2\pi \frac{r_2}{\lambda}\right)} \quad (7)$$

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 \cos \Delta \varphi} \quad (8)$$

$$\Delta \varphi = \varphi_2 - \varphi_1 - 2\pi \frac{r_2 - r_1}{\lambda} \quad (9)$$

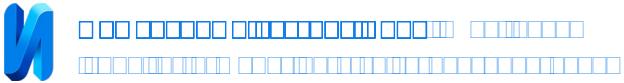
Если разность фаз двух звуковых источников равна:

$$\Delta \varphi = -2\pi \frac{r_2 - r_1}{\lambda} \quad (10)$$

Когда разность фаз двух звуковых волн постоянна или их колебания находятся в одинаковой фазе, то:

$$\varphi_1 = \varphi_2 \quad (11)$$

Пусть δ обозначает разность хода волн двух звуковых источников, тогда:



$$\delta = r_2 - r_1 \quad (12)$$

Тогда $\delta = \pm k\lambda, k = 0, 1, 2 \dots$

$$A = A_1 + A_2 \quad (13)$$

В точке Р амплитуда колебаний увеличивается, возникает интерференция в фазе (усиление волн).

Тогда $\delta = \pm(2k + 1)\lambda$, $k = 0, 1, 2, \dots$

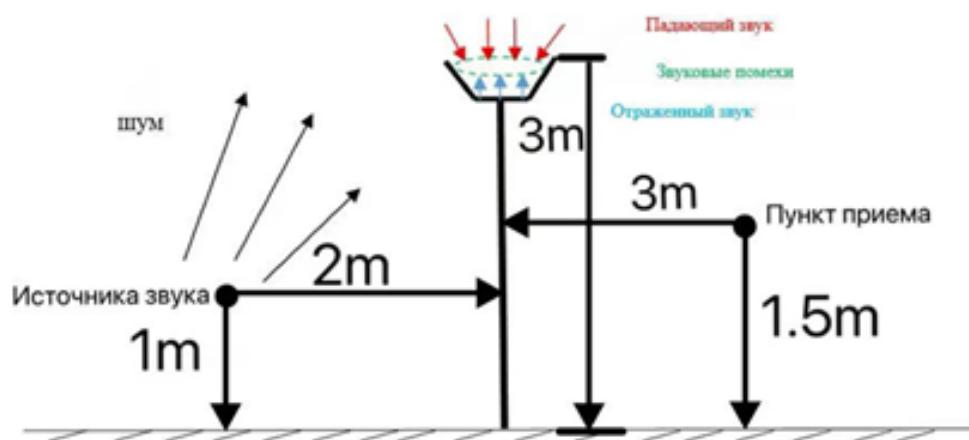
$$A = |A_1 - A_2| \quad (14)$$

В точке Р амплитуда колебаний уменьшается, возникает интерференция противофазная (гашение волн), тогда δ принимает значения из интервала:

$$|A_1 - A_2| < A < A_1 + A_2 \quad (15)$$

Учитывая представленные расчеты (4-15), в данной работе предлагается конструкция звукового экрана интерференционного типа, основанного на принципах интерференции акустических волн и преимуществах Y-образных звуковых экранов, как показано на рисунке 1, его верхняя конструкция состоит из стеновой панели и внутренней полости. Источник шума и точка приема расположены на противоположных сторонах шумозащитного экрана. Источник шума расположен на высоте 1 м, на расстоянии 2 м от экрана по горизонтали. Точка приема расположена на противоположной стороне экрана на высоте 1,5 м и на расстоянии 3 м по горизонтали от экрана. Высота экрана составляет 3 м, толщина конструкции 0,05 м. Такие исходные данные соответствуют принципам акустических измерений в КНР, приведенным в источниках [5, 6].

В работе использовано явление акустической интерференции, заключающееся в том, что когда две звуковые волны с одинаковой фазой, одинаковой частотой или разностью фаз остаются постоянными, а направление распространения волн параллельным, то вибрация в одних областях усиливается, в то время как вибрация в других областях уменьшается. Когда звуковые волны определенной частоты попадают в полость смоделированного в работе экрана, происходит отражение от дна полости. При распространении к полости амплитуда падающей звуковой волны равна амплитуде отраженной волны, но их фазы инвертированы, что приводит к взаимному гашению. Это явление интерференции создает специфический эффект подавления шума, что приводит к более выраженному ослаблению энергии дифрагированного шума. В результате шумозащитный экран интерференционного типа демонстрирует выдающиеся звукоизоляционные характеристики.



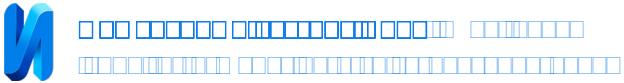


Рис. 1. – Принцип звукоизоляции экрана интерференционного типа

В широком диапазоне частот пористые материалы демонстрируют отличные звукопоглощающие свойства [7-9]. Когда пористый материал заполняет полость в верхней части шумозащитного экрана интерференционного типа, дифрагированные звуковые волны, попадающие в пористый поглотитель при достижении вершины экрана, приводят к преобразованию части акустической энергии во внутреннюю энергию. Это усиливает затухание дифрагированного звука и снижает уровень звукового давления в точке приема.

В качестве материала для заполнения верхней части звукоизоляционного экрана в данной работе использовалась минеральная вата. Минеральная вата имеет плотность $50 \text{ кг}/\text{м}^3$, коэффициент сопротивления $8000 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{м}^4$ и пористость 95 %. Как видно из данных на рисунке 2, в диапазоне частот 50-100 Гц разница с этим материалом и без него несущественна. Однако в диапазоне 100-5000 Гц при использовании минеральной ваты характеристики значительно улучшаются, уровень звукового давления в точке приема снижается примерно на 6,3 дБ по сравнению с отсутствием звукоизоляции. На рисунке 3 показан уровень звукового давления для экрана с заполнением минеральной ватой и без него при частоте 630 Гц.

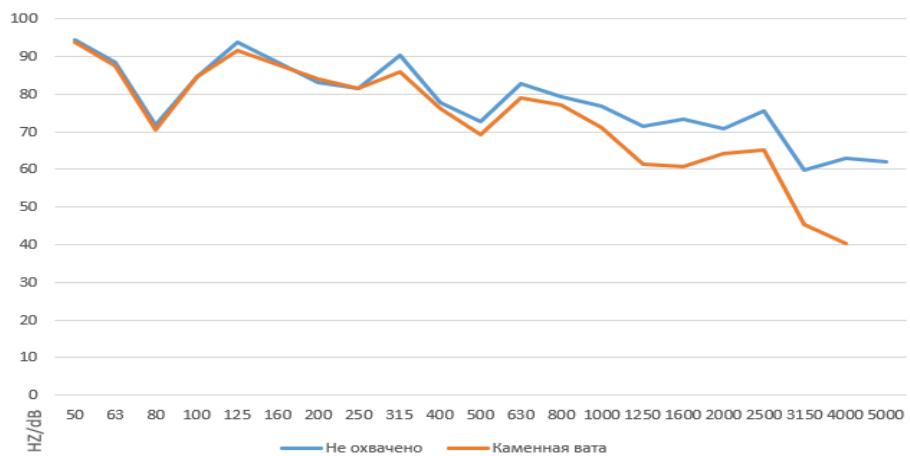


Рис. 2. Уровни звукового давления в Y-образном экране с заполнением и без него для разных частот

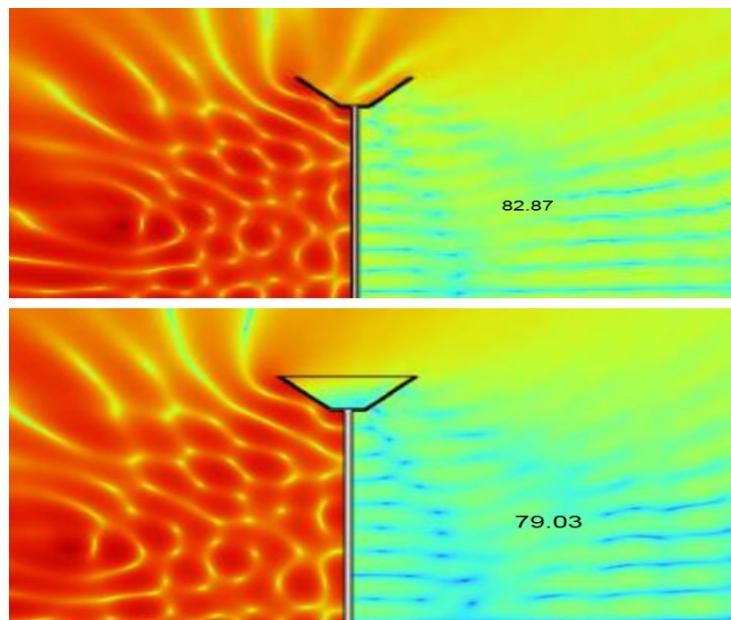
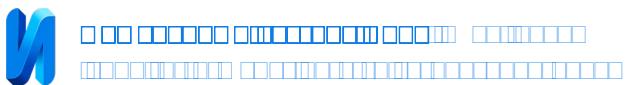


Рис. 3. – Поле уровней звукового давления экрана при частоте 630 Гц

В работе использовалась программа COMSOL Multiphysics для



создания модели оценки акустических характеристик шумозащитных экранов городского железнодорожного транспорта в Китае. На основе принципа акустической интерференции предлагается новый тип шумозащитного экрана интерференционного типа, в котором заполнение полости верхней части конструкции пористым материалом улучшает звукоизоляционные характеристики предлагаемого в работе экрана [10,11]. Экран интерференционного типа продемонстрировал превосходную звукоизоляцию в среднем и низком частотном диапазоне. Эффективность значительно улучшилась в диапазоне 100–5000 Гц при заполнении минеральной ватой, что снизило уровень звукового давления в точке приема примерно на 6,3 дБ по сравнению с такими конструкциями без заполнения ватой.

Литература

1. Li Xiaoxia, Zhang Wei. Analysis of key factors influencing the design of sound barrier for urban rail transport // Scientific and Technical Journal of Railway Transport. 2023.20(3):736-743.
 2. Хэ Цзюньфэн, Чэн Ган. Анализ экономической эффективности и технической осуществимости проектирования звукового барьера для городского железнодорожного транспорта // Инновации в области железнодорожных технологий.2021(4):32-36с.

3. Wang Feng, Liu Ming. Study of acoustic characteristics and environmental factors in the design of sound barriers for urban rail transport. // Noise and vibration control. 2022.42(2): pp.176-180.

4. Туркина, Н. Р., С. Шусинь, Ч. Цзыян. Моделирование и прогноз пассажиропотока на железнодорожном транспорте // Сборник статей VIII Международной научно-практической конференции, Пенза, 14–15 октября 2024 года. – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2024. – С. 510-514.

5. Cai Gelong, Wang Guangxian, Tu Kong Xian. "Acoustic Principles, Noise Measurement and Control (Fifth Edition)": Qinghua Book Co., Ltd. Ltd. 2023.05. pp. 9-10.

6. Туркина Н.Р., Г. Минсюй, С. Шибо. Моделирование шумоизоляционных экранов транспортных магистралей // Сборник статей XI Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых и студентов с международным участием. – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2025. – С. 302-306.

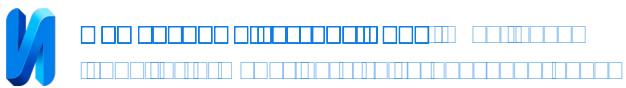
7. Хуан Пэн, У Сянцзюнь, Цинь Цзяхэ, Ху Цзяньлун, Сяо Илун, Ся Чжаован. Анализ звукоизоляционных характеристик интерферометрического звукового барьера и оптимизация его характеристик // Контроль шума и вибрации, 2025, 45(2): с.267-272.

8. Ma Dayu. Design of microperforated plate structure. // Journal of Acoustics, 1988; 13(3): c.174–180.
9. Шусинь, С. Оценка и снижение шума вагонов метрополитена в КНР. // Молодежь. Техника. Космос: XVII Международная молодежная научно-техническая конференция – СПб: "Балтийский государственный технический университет "ВОЕНМЕХ" имени Д.Ф. Устинова", 2025. – С. 125-128.
10. Середа П.О., Лебедева И.В., Наконечный В.Н., Рудиков Д.Н., Финоченко Т.А. К вопросу оценки безопасности движения на автомобильных дорогах при возникновении чрезвычайных ситуаций // Инженерный вестник Дона, 2018, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4779.
11. Дергунова М.А., Пиневич Е.В., Алтынов Д.С. Применение цифровых ресурсов в целях обеспечения транспортной безопасности // Инженерный вестник Дона, 2025, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2025/9752.

References

1. Li Xiaoxia, Zhang Wei. Scientific and Technical Journal of Railway Transport. 2023.20(3):736-743.
2. Xe` Czzyun`fe`n, Che`n` Gan. Innovacii v oblasti zheleznodorozhny`x texnologij.2021 (4): pp.32-36.

3. Wang Feng, Liu Ming. Study of acoustic characteristics and environmental factors in the design of sound barriers for urban rail transport. Noise and vibration control. 2022.42(2): pp.176-180.
 4. Turkina, N. R., S. Shusin', Ch. Czzy'yan. Sbornik statej VIII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Penza, 14–15 oktyabrya 2024 goda. Penza: Penzenskij gosudarstvenny'j agrarny'j universitet, 2024. pp. 510-514.
 5. Cai Gelong, Wang Guangxian, Tu Kong Xian. "Acoustic Principles, Noise Measurement and Control (Fifth Edition)": Qinghua Book Co., Ltd. Ltd. 2023.05. pp. 9-10.
 6. Turkina N. R., G. Minsyuj, S. Shibo. Sbornik statej XI Vserossijskoj nauchno-texnicheskoy konferencii molody'x ucheny'x i studentov s mezdunarodnym uchastiem. Penza: Penzenskij gosudarstvenny'j agrarny'j universitet, 2025. pp. 302-306.
 7. Huang Peng, Wu Xiangjun, Qin Jiahe, Hu Jianlong, Xiao Yinglong, Xia Zhaowan. Noise and vibration control, 2025, 45(2): pp.267-272.
 8. Ma Dayu Design of microperforated plate structure. Journal of Acoustics, 1988; 13(3): pp.174–180.
 9. Shusin', S. Molodezh'. Texnika. Kosmos: XVII Mezhdunarodnaya molodezhnaya nauchno-texnicheskaya konferenciya. SPb: Baltijskij gosudarstvenny'j texnicheskij universitet VOENMEX imeni D.F. Ustinova, 2025. pp. 125-128.
-



10. Sereda P.O., Lebedeva I.V., Nakonechnyj V. N., Rudikov D.N., Finochenko T.A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2018. №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4779.

11. Dergunova M.A., Pinevich E.V., Alty'nov D.S. Inzhenernyj vestnik
Dona. 2025. №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2025/9752.

Дата поступления: 8.11.2025

Дата публикации: 23.12.2025