



## 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, шумозащитные 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  $\rho_c$  – 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.

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

где  $k_{eq}^2$  – поправка на направление распространения волны,  $\omega$  – 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/м<sup>3</sup>, 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  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  – начальные фазы колебаний звуковых источников,  $\omega$  – 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  $\lambda$  – 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:

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

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

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos \Delta \varphi} \quad (8)$$

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

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  $\delta$  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  $\delta$  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.

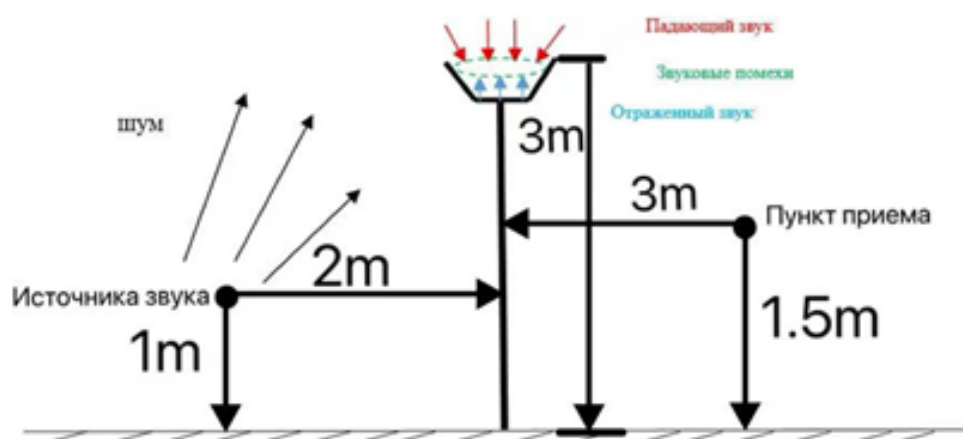




Рис. 1. – Принцип звукоизоляции экрана интерференционного типа

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  $50 \text{ кг/м}^3$ , коэффициент сопротивления  $8000 \text{ Н} \cdot \text{с/м}^4$  и пористость 95 %. Как видно из данных на рисунке 2, в диапазоне частот 50-100 Гц разница с этим материалом и без него незначительна. 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

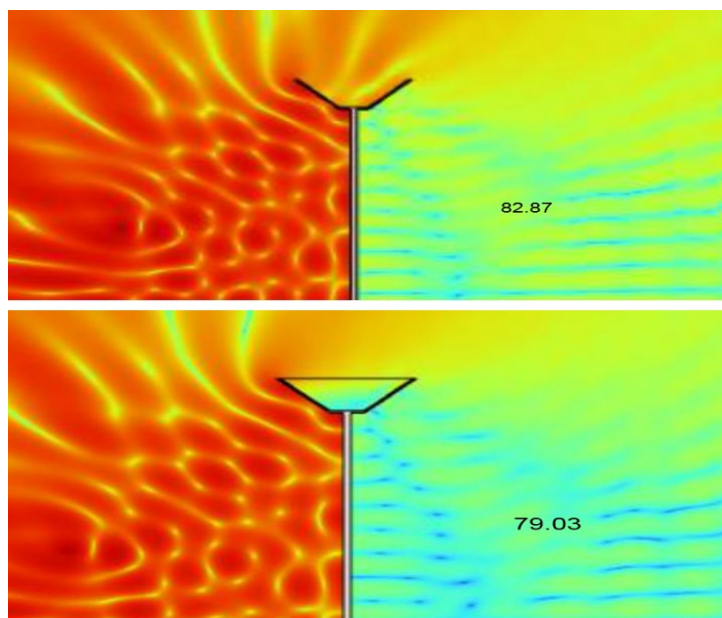


Рис. 3. – Поле уровней звукового давления экрана при частоте 630 Гц

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, Чэнь 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. Цзяян. 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 Инлун, Ся Чжаован. Анализ звукоизоляционных характеристик интерферометрического звукового барьера и оптимизация его характеристик // Контроль шума и вибрации, 2025, 45(2): с.267-272.

---





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 mezhdunarodny'm 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'. Teknika. 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., Nakonechny`j V. N., Rudikov D.N.,  
Finochenko T.A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2018. №1. URL:  
[ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4779](http://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](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2025/9752).

**Дата поступления: 8.11.2025**

**Дата публикации: 23.12.2025**