

Мероприятия по снижению акустического шума в городской среде



А. А. Локтев,
*д-р физ.-мат. наук,
заведующий кафедрой
транспортного
строительства
Российского
университета
транспорта
(РУТ (МИИТ)),*



Л. А. Илларионова,
*канд. техн. наук,
доцент кафедры зданий
и сооружений
на транспорте
РУТ (МИИТ),*



Р. Р. Хакимзянов,
*д-р техн. наук, профессор
кафедры транспортного
строительства
РУТ (МИИТ)*

Шумовое загрязнение стало серьезной экологической проблемой в условиях растущей урбанизации. Среди его основных источников дорожное движение является ключевым фактором, влияющим не только на ближайшее окружение, но и на фасады зданий, расположенных вдоль оживленных магистралей. Моделирование шумового загрязнения от автомобильных дорог и его воздействия на здания позволяет предложить эффективные стратегии шумозащиты.

Автомобильный шум составляет значительную часть общего шумового фона в городах, негативно влияя на качество жизни населения. Основные источники звукового загрязнения от транспортных средств и их воздействие представлены в табл. 1.

Таблица помогает лучше понять, какие факторы влияют на уровень шума от автомобильной дороги, и как они могут воздействовать на окружающую среду и качество жизни людей.

Рост городских агломераций и увеличение транспортного потока требуют

расширения дорожной сети, что часто приводит к размещению магистралей вблизи жилых районов и деловых центров. Это вызывает ряд проблем, включая повышенный уровень шума, загрязнение воздуха и снижение качества жизни горожан [1, 2].

Шум не распространяется по прямой линии, а рассеивается в окружающей среде под влиянием следующих факторов: топографии (холмы и долины могут отражать или поглощать звуковые волны); погодных условий (дождь, ветер и температура могут влиять на распространение звука); строительных конструкций (здания могут служить как барьерами, так и усилителями шума).

Понимание этой динамики имеет решающее значение для моделирования шумового загрязнения. Для систематизации расчетов уровней звука в застройке территория разделена на зоны, позволяющие выделить все возможные пути поступления звука к расчетной точке как прямого, так и экранированного.

В вертикальном сечении представлены расчетные схемы распространения звука в открытом пространстве и при наличии экранирующих препятствий (рис. 1).

Для создания комфортной городской среды необходимо учитывать не только транспортные потоки, но и их влияние на качество жизни людей, а также разрабатывать стратегии по снижению негативных последствий транспортной деятельности. К таким мерам относятся: применение шумопоглощающих материалов; создание зеленых зон и озеленение придорожных территорий; внедрение современных технологий для снижения экологического воздействия.

Таблица 1. Источники звукового загрязнения транспортных средств и их влияние на акустическую среду

Источник шума	Звук	Влияние
Двигатели транспортных средств	Звуки, производимые моторами легковых автомобилей, грузовиков и автобусов (включают как работу двигателя, так и шум выхлопной системы)	Может вызывать стресс, ухудшать качество сна и снижать общую жизнедеятельность людей, живущих вблизи дорог
Шины	Звуки, возникающие при контакте шин с поверхностью дороги. Вибрации и трение создают различные звуковые эффекты	Может мешать звуковому комфорту, особенно в жилых зонах, и ухудшать акустическую среду
Тормозные системы	Визжащие и скрежещущие звуки, возникающие при замедлении или остановке транспортных средств	Влияет на комфорт и здоровье людей, вызывая раздражение и повышенный уровень стресса
Аэродинамические шумы	Звуки, возникающие при движении транспортных средств на высоких скоростях, включая свист и рев	Может способствовать повышенному уровню шума на автострадах, влияя на привычки поведения животных и людей
Дорожная инфраструктура	Звуки от работы светофоров, дорожных знаков и других элементов инфраструктуры, а также от толпы пешеходов и развлекательных мероприятий	Негативно влияет на акустическую среду, может создавать дополнительные раздражающие факторы для местных жителей

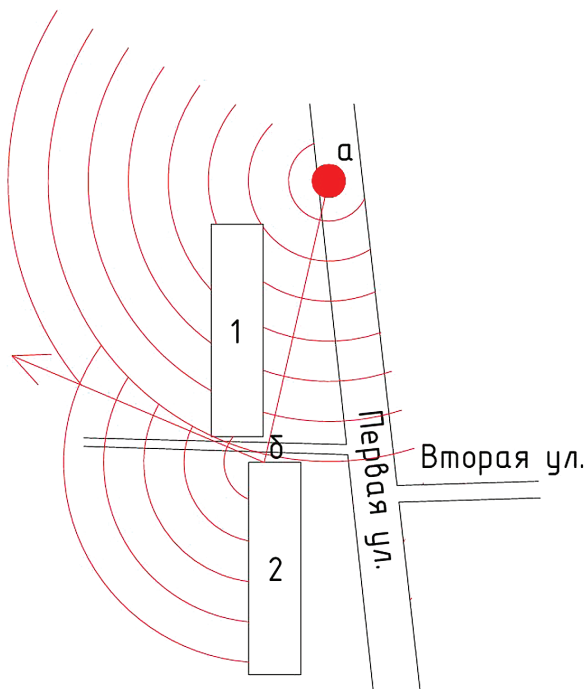


Рис. 1. Цилиндрическая волна от движущего автомобильного потока

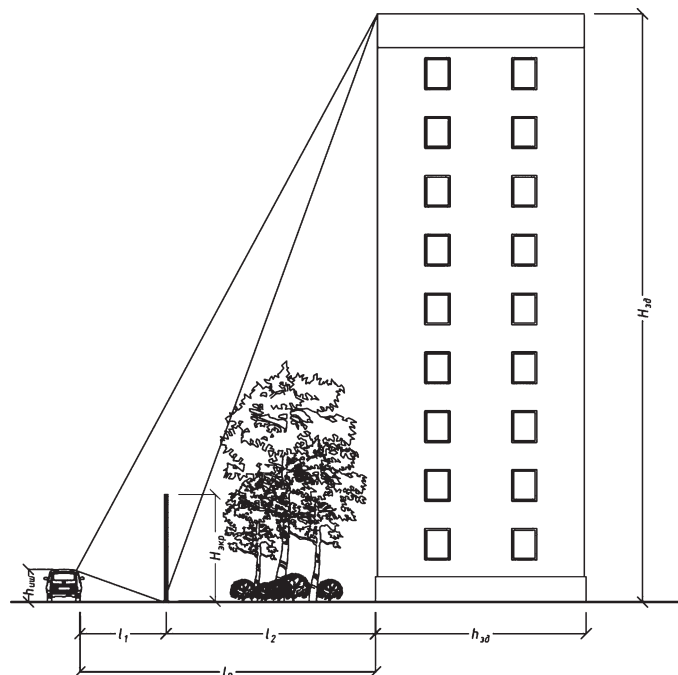


Рис. 2. Границы звуковой тени

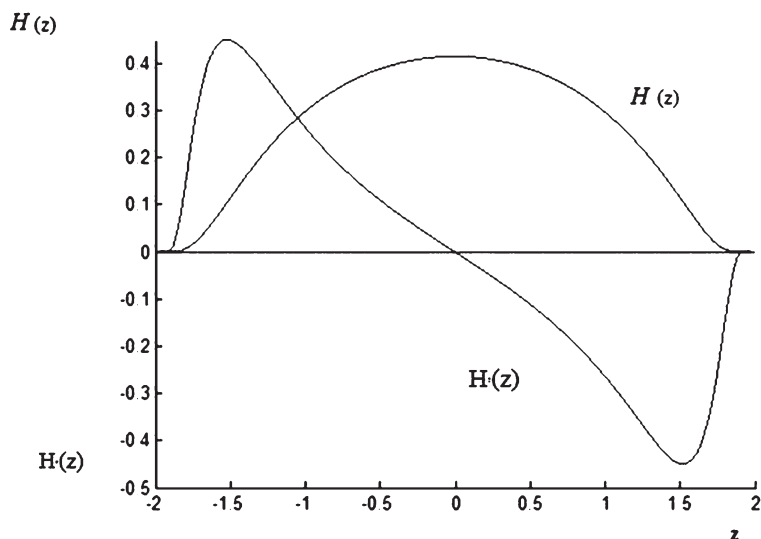


Рис. 3. Функция Соболева и ее первая производная при $C_s = 2$

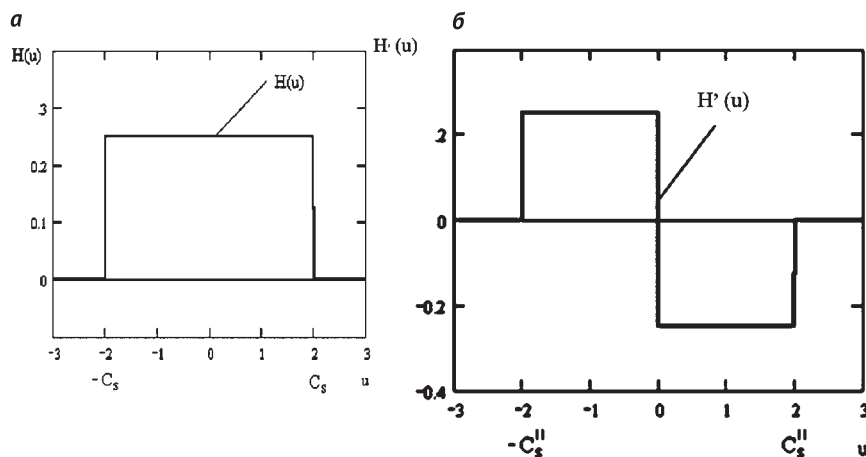


Рис. 4. Кусочно-постоянная ядерная функция $H(u)$ (а) и кусочно-постоянный аналог первой производной функции Соболева $H'(u)$ (б) для случая $u_i = 0$, $C_s = 2$

Использование малозернистых покрытий с мелкозернистым наполнителем позволяет снизить акустическое воздействие до 3 дБА, а плотная посадка деревьев с сомкнутыми кронами и густым подкroновым кустарником может уменьшить уровень шума до 8 дБА (рис. 2). Такой комплексный подход способен значительно улучшить условия жизни горожан и обеспечить гармоничное развитие городской среды [3].

Согласно современным нормативным требованиям, проектирование транспортных магистралей вблизи жилых, общественных и промышленных зданий обязательно включает экологический раздел. Он содержит анализ акустических воздействий на окружающую среду и предусматривает расчетное моделирование объекта исследования.

Для эффективного анализа акустических воздействий и их влияния на окружающую среду необходимо детально изучить процесс взаимодействия звука с объектами, расположенными вблизи источников шума.

Если рассматривать шум как реакцию окружающей среды на внешние воздействия, то можно сформулировать задачу исследования процессов возникновения и распространения акустических воздействий. В этом случае шум представляет собой преобразование между входным $u(t)$ (вблизи источника шума) и выходным воздействием $x(t)$ (вблизи исследуемого здания или сооружения).

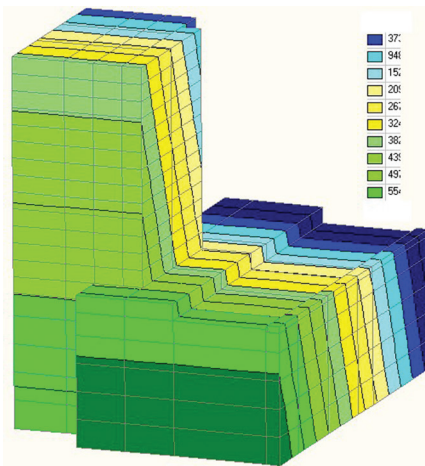


Рис. 5. Перемещения точек среды вдоль переулка от распространения акустических воздействий автотранспорта по проезжей части улицы

Из теории акустических систем и, в более широком смысле, теории распространения сигналов известно, что причинно обусловленная система (в частности, ее линейная стационарная разновидность) может быть описана импульсной переходной функцией $g(t)$. Она представляет собой реакцию системы при нулевых начальных условиях на входное воздействие в виде дельта-функции Дирака. Импульсная переходная функция связана с передаточной функцией системы $F(p)$ через обратное преобразование Лапласа [4]:

$$g(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{-j\infty}^{j\infty} \Phi(p) e^{pt} dp.$$

Все передаточные и частотные характеристики линейной системы связаны с импульсной переходной функцией, которая входит в интегральное представление модели линейной динамической системы [5]:

$$x(t) = h(0)u(t) + \int_0^t g(\tau)u(t-\tau)d\tau,$$

где $h(t)$ — переходная функция системы (в данном случае окружающей среды).

Импульсная переходная функция системы соответствует первой производной от переходной функции $h(t)$. В рассматриваемой задаче $h(t)$ представляет собой реакцию окружающей среды на единичное акустическое воздействие. Зная переходную функцию, можно определить импульсную переходную функцию $g(t)$.

В теории непараметрических систем есть способ оценивания производной зависимости выходной переменной X объекта от входной U [6, 7]. Пусть функ-

ция ядра $H(z)$ является дифференцируемой, тогда оценкой первой производной регрессионной зависимости $x = x(u)$ будет определяться следующим соотношением:

$$x'_s(u, C_s) = \frac{\Delta u}{C_s^n} \sum_{i=1}^s x_i H' \left(\frac{u - u_i}{C_s^n} \right),$$

где $H'(z)$ — первая производная по u функции $H(z)$; C_s^n — параметр, показывающий отклонение используемой производной функции от ее точного значения.

В задачах оценивания производной в качестве функции ядра $H(z)$ предлагается принять функцию Соболева. Она дифференцируема на всей области определения; функция $H(z)$ и ее первая производная $H'(z)$ принимают ненулевые значения в ограниченной области функции и ее производная равны нулю; функция Соболева и ее первая производная изображены на рис. 3.

В кусочно-постоянном виде данную функцию можно представить иначе (рис. 4).

Такая неравнозначная аппроксимация позволяет рассматривать каждый реальный и виртуальный источник шума отдельно и при ограничении времени воздействия выделять отдельные частоты, вносящие значительный вклад в общий портрет шумового загрязнения окружающей среды, а также упростить вычислительные процедуры с сохранением асимптотических свойств оценки акустического воздействия.

Таким образом, возможность выделения отдельных частот и оценки акустического воздействия через аппроксимацию источников шума создает основу для оптимизации проектных решений. Имитационное моделирование распространения шума становится ключевым инструментом для выявления необходимых инженерных решений по регулированию уровня акустического воздействия.

Для этого удобно применять специализированные проектно-вычислительные комплексы, в основе которых лежит метод конечных элементов. Такой подход способствует более эффективному управлению шумовыми рисками и позволяет разрабатывать меры по снижению их негативного воздействия на жителей и окружающую среду.

Кроме того, применение методов имитационного моделирования позволяет разработать оптимальные решения для шумоизоляции и создания шумозащитных экранов, а также улуч-

шить проектирование дорог с учетом акустических аспектов. В результате это не только минимизирует негативное воздействие транспортного шума на население, но и способствует повышению качества жизни в городских и пригородных территориях. Успешная реализация таких мер может значительно улучшить общую экологическую обстановку и обеспечить гармоничное сосуществование различных функций городской инфраструктуры [8].

Оценим воздействие звуковой нагрузки на здание. Поскольку при решении поставленной задачи конструкции здания необходимо рассматривать совместно с основанием, то необходимо представить грунт и иные элементы основания как непосредственно у здания, так и у проезжей части улицы в виде характерных конечных элементов.

Распространение фронтов акустических волн от автотранспортных средств при их перемещении по прямолинейной траектории с точки зрения воздействия на объекты окружающей упругой среды можно представить в виде рис. 5, который является результатом конечно-элементного моделирования.

Акустическое воздействие представляется в виде перемещений узловых точек упругой среды и изополями градиентных перемещений между ними. Рассматриваются изменения градиентов линейных, угловых и суммарных перемещений в направлении, перпендикулярно распространению акустических волновых и колебательных процессов от подвижных источников (автотранспорта). Сравнение значений соседних изополей и изолиний позволяет провести оценку интенсивности внешних воздействий и агрегированный результат воздействий в различных частотных диапазонах [9].

Если отходить от прямолинейной траектории движения автомобиля — на перекрестках, остановочных пунктах, при перестроении между полосами движения и т. д., используя алгоритмы агрегирования результатов динамического воздействия, в незначительной постановке можно получить результаты на примере реально существующего здания, находящегося рядом с реконструированной транспортной магистралью, а также оценить акустическое воздействие как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскости (рис. 6).

Построенные изолинии для перемещений позволяют не только визуаль-

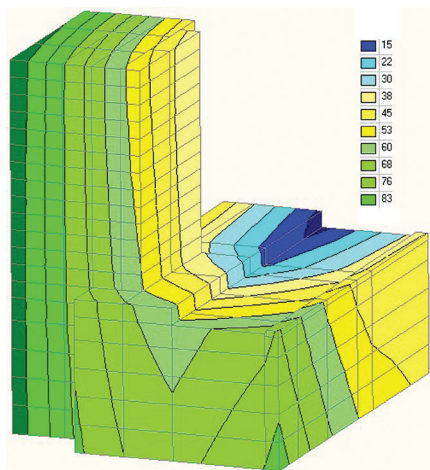


Рис. 6. Суммарные перемещения точек среды от распространения акустических воздействий от проезжающего автотранспорта по проезжим частям улицы и переулка

оценить эффект затухания волновых и колебательных процессов, но и понять, каким образом влияют дорожные знаки, разметка, расположение остановочных пунктов, зеленых насаждений и шумозащитных экранов.

В дальнейшем, продолжая исследования в этой области, можно рассмотреть влияние различных факторов, таких как скорость движения транспортных средств или геометрические особенности

дороги, на уровень акустического загрязнения. Это позволит получить более глубокое понимание процессов, связанных с акустическим воздействием, и разработать целенаправленные меры по его снижению.

Источники

1. Илларионова Л. А., Локтев А. А., Локтев Д. А. Способы защиты от шумового воздействия на железнодорожном и трамвайном транспорте // Наука и техника транспорта. 2024. № 3. С. 18–22. EDN: JPYTQY.
2. Илларионова Л. А., Локтев А. А., Локтев Д. А. Моделирование воздействия городского рельсового транспорта на окружающую среду // Транспортные сооружения. Экология. 2023. № 1. С. 52–60. DOI: 10.15593/24111678/2023.01.07.
3. Балакин В. В. Основные подходы к решению проблемы снижения негативного воздействия транспорта на городскую среду // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. 2007. № 6. С. 41–45. EDN: IAMHJX.
4. Солодовников В. В., Плотников В. Н., Яковлев А. В. Теория автоматического управления техническими системами:

учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ, 1993. С. 492.

5. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя / пер. с англ. под ред. Я. З. Цыпкина. М.: Наука, 1991. С. 432.
6. Дмитриев Ю. Г., Тарасенко Ф. П. Об оценивании функционалов от плотности вероятности и ее производных // Теория вероятностей и ее применение. 1973. Вып. 18, № 3. С. 662–668.
7. Добровидов А. В., Кошкин Г. М. Непараметрическое оценивание сигналов. М.: Наука. Физматлит, 1997. С. 336.
8. Безгодов М. А., Бобров И. А., Шенкман Р. И. Использование компьютерного моделирования при определении уровня шума на городских территориях // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Урбанистика. 2011. № 3(3). С. 25–29. EDN: OJGGZ.
9. Кошурников Д. Н., Максимова Е. В. Обзор зарубежной и отечественной практики шумового картирования (Noise Mapping) в условиях плотной городской застройки // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. 2018. № 3. С. 27–43. EDN: YARSLR.



Общероссийская общественная организация РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ ТРАНСПОРТА

Общественная академия наук

(ФЗ от 23 августа 1996 г. N 127-ФЗ "О науке и государственной научно-технической политике")

Некоммерческая организация

(ФЗ от 12 января 1996 г. N 7-ФЗ «О некоммерческих организациях»)

Академия включает:

51 РЕГИОНАЛЬНОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

СОСТАВ АКАДЕМИИ
В 2025 ГОДУ

> 700 УЧЕНЫХ-ТРАНСПОРТНИКОВ
(ДОКТОРОВ И КАНДИДАТОВ НАУК)



- 6 ОТРАСЛЕВЫХ КОМИТЕТОВ
- НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
- ОБЪЕДИНЕННЫЙ УЧЕНЫЙ СОВЕТ
- ЦЕНТР ЭКСПЕРТИЗЫ ВСМ РАТ