

УДК: 534.28
OECD: 01.03.AA

Комплексное решение проблемы снижения шума железнодорожного транспорта

Борцова С.С.

Ст. преподаватель, БГТУ «ВОЕНМЕХ им. Д.Ф.Устинова, г. Санкт-Петербург, РФ

Аннотация

Для системного решения задачи снижения шума железнодорожного транспорта предложен алгоритм выбора комплекса шумозащитных мероприятий с подбором оптимальных конструктивных параметров входящих в его состав шумозащитных конструкций (ШЗК). Выделены области принятия решения в зависимости от расстояния до защищаемого объекта, этажности экранируемой застройки и значений требуемого снижения шума. Разработаны рекомендации по определению возможных средств защиты с учётом специфики каждой из областей. Отмечены отличия в снижении шума насыпями для защиты малоэтажных и многоэтажных зданий, возможности эффективного применения шумозащитной выемки и комбинаций ШЗК. Предложенный подход реализован на примерах снижения железнодорожного шума с применением шумозащитных конструкций протяжённой длины. Дана оценка полученных результатов, приводится сравнение и выбор оптимального комплекса шумозащиты с учётом задаваемых проектировщиком ограничений по параметрам ШЗК: высоты, формы (уклон, верхняя площадка), материала.

Ключевые слова: шумозащитная конструкция, снижение шума железнодорожного транспорта, шумозащитная выемка, шумозащитная насыпь, комплекс шумозащитных мероприятий.

A comprehensive solution to the problem of reducing the noise of railway transport

Bortsova S.S.

Baltic State Technical University 'VOENMEH' named after D.F. Ustinov, St.Petersburg, Russia

Abstract

For a systematic solution to the problem of reducing the noise of railway transport, an algorithm is proposed for selecting a set of noise protection measures with the selection of optimal design parameters of the noise protection structures included in its composition. The decision-making areas are highlighted depending on the distance to the protected object, the number of floors of the shielded building and the values of the required noise reduction. Recommendations have been developed to identify possible means of protection, taking into account the specifics of each of the areas. Differences in noise reduction by embankments for the protection of low-rise and multi-storey buildings, the possibility of effective use of noise-proof recesses and combinations of SLC are noted. The proposed approach is implemented using examples of reducing railway noise with the use of noise-proof structures of extended length. The evaluation of the results obtained is given, the comparison and selection of the optimal noise protection complex is given, taking into account the restrictions set by the designer on the parameters of the SLC: height, shape (slope, upper platform), material.

Keywords: *noise-proof structure, noise reduction of railway transport, noise-proof excavation, noise-proof embankment, a complex of noise-proof measures.*

Введение

Основные мероприятия для снижения акустического загрязнения железных дорог в черте городской застройки [1, 2] и их оценочная эффективность представлены в таблице 1. В зависимости от места применения они делятся по трём направлениям:

- 1) в источнике шума (ИШ);
- 2) на пути распространения от источника шума до объекта защиты, расчётной точки (РТ);
- 3) в объекте защиты.

На стадии проектирования железной дороги в качестве шумозащитного мероприятия рассматривается защита расстоянием, когда для обеспечения допустимых уровней шума целесообразнее проложить железнодорожный путь в обход защищаемой территории, чем использовать шумозащитные конструкции.

Таблица 1

Оценочная эффективность мероприятий по защите от шума железнодорожного транспорта

№ п/п	Наименование мероприятия (группы мероприятий)	Оценочная эффективность шумозащитного мероприятия
1) шумозащитные мероприятия в источнике образования		по экспериментальным данным
1	Ограничение скорости движения железнодорожного транспорта при прохождении жилой застройки (ОС)	до 3 дБА
2	Устройство накладок на шейку рельса (НШР)	до 4 дБА
3	Применение подбалластных матов (ПМ)	до 2 дБА
4	Бесстыковый путь (БП)	до 2 дБА
5	Устройство путей с разным основанием (УП)	до 2 дБА
2) шумозащитные конструкции (ШЗК) на пути распространения шума (при обеспечении требуемой протяженности)		расчёт по действующим нормативным документам
6	Устройство шумозащитных экранов (ШЭ), 4-8 м	15-20 дБА (до 22 дБА с изменённой формой верхней граничной поверхности)
7	Устройство земляных шумозащитных насыпей (ШН), 4-8 м	17-25 дБА (для малоэтажной застройки) и 15-20 дБА (для высокоэтажной застройки)
8	Устройство шумозащитных выемок (ШВ), 4-8 м	16-21 дБА (для малоэтажной застройки) и 10-15 дБА (для высокоэтажной застройки)

Продолжение таблицы 1

9	Размещение протяженных зданий и сооружений, входящих в инфраструктуру железной дороги, на пути распространения шума вдоль железной дороги (ШЗ)	до 20 дБА
10	Устройство шумозащитных зелёных насаждений (ШЗН)	5 - 10 дБА
11	Устройство шумозащитных галерей (ШГ)	до нормативных значений
12	Малые шумозащитные экраны (МШЭ)	до 5 дБА
3) мероприятия в объекте защиты		по нормативным документам
13	Шумозащитное остекление (ШО)	до 10 дБА (на нормируемой территории) и до нормативных значений (внутри нормируемых помещений)
14	Трассирование железной дороги на удалении от нормируемых объектов (защита расстоянием, ЗР)	до 3 дБА при каждом удвоении расстояния (от 3 дБА при расстоянии до 25 метров до 15 дБА при расстоянии 400 метров)

При этом мероприятия первого и третьего направлений снижают шум в ИШ и РТ непосредственно, их эффективность в ряде случаев зависит от частоты шума, а для оценки в дБА пользуются представленными в табл. 1 максимальными значениями.

Мероприятия по снижению шума в источнике являются обязательными при проектировании и строительстве новых железнодорожных путей в ряде Европейских стран и позволяют снизить уровень шума до 10 дБА. Для действующих железных дорог вследствие небольшого их значения, мероприятия этой группы применяются, когда невозможно добиться требуемого снижения шумозащитными конструкциями [2].

Шумозащитное остекление (ШО) объекта защиты, имея высокий показатель снижения шума, не обеспечивает его снижение до нормы на территории жилой застройки, требует согласований, в том числе с владельцами помещений, срок его службы и качество зависят от условий эксплуатации пользователями. Поэтому рекомендуется ограничивать применение ШО и использовать только при недостаточности экранирующих сооружений.

Шумозащитные конструкции (ШЗК) на пути распространения шума, второе направление, зависят, главным образом, от расположения защищаемого объекта: высоты и удаления от ИШ. Поэтому функцию акустической эффективности ШЗК можно «построить» для конкретной РТ, а в таблице 1 её значения имеют некий диапазон. Эти сооружения дают наибольшее снижение шума и являются приоритетными в области шумозащиты. Используя ШЗК в комплексе с мероприятиями первой и третьей группы, т.е. для высоких значений требуемого снижения шума, важно понимать какое максимальное снижение шума можно получить в результате их применения.

Для решения проблемы повышенного шума системно следует выделить условные области принятия решения в зависимости от расстояния до защищаемого объекта, этажности защищаемой застройки и значений требуемого снижения шума.

Разработать рекомендации по выбору возможных средств защиты в каждой области. С учётом задаваемых проектировщиком ограничений по параметрам ШЗК, определить оптимальный вариант шумозащиты.

1. Функция эффективности шумозащитных конструкций (ШЗК)

К шумозащитным конструкциям автор относит шумозащитные экраны (ШЭ), насыпи (ШН) и выемки (ШВ), а также шумозащитные зелёные насаждения (ШЗН). Принцип действия ШЗК основан на экранировании, когда верхняя поверхность сооружения находится выше прямого пути распространения шума к защищаемому объекту. Параметрами ШЗК, влияющими на её эффективность, являются высота (Н), шумопоглощающие и шумоотражающие свойства материала и форма. Ключевой параметр ШЗН - ширина посадки. Формулы расчёта ШЭ и ШЗН представлены в ГОСТ 31295.2-2005 [3]; ШН и ШВ в ГОСТ 33325-2015 [4].

Эффективность ШЭ вне зависимости от расположения РТ (ΔL°) определяется как [3]:

$$\Delta L^{\circ} = 10 \cdot \lg \left(3 + \frac{C_2}{\lambda} \cdot C_3 \cdot z \cdot K_{met} \right), \quad (1)$$

где ΔL° эффективность ШЭ, дБА; C_2 - константа, учитывающая эффект отражения от земли ($C_2 = 20$); λ - длина звуковой волны, м; C_3 - константа, учитывающая дифракцию на верхних кромках ШЗК, равна 1 при дифракции на одной кромке (для тонких ШЭ, ШВ); z - параметр, зависящий от высоты ШЗК и расположения РТ; K_{met} - коэффициент, учитывающий влияние метеорологических условий.

Для расчёта эффективности ШЗК по уровням звука, дБА, частота принимается равной 1000 Гц, поэтому принимаем $\lambda = 0,33$ м.

$$z = d_{SS} + d_{SR} - d; \quad (2)$$

$$d_{SS} = \sqrt{r^2 + (H - h_{иш})^2}; \quad (3)$$

$$d_{SR} = \sqrt{R^2 + (H - h_{рт})^2}; \quad (4)$$

$$d = \sqrt{R_3^2 + (h_{рт} - h_{иш})^2}; \quad (5)$$

$$R = R_3 - r, \quad (6)$$

где d_{SS} - расстояние от источника шума до дифракционной кромки (первой дифракционной кромки в случае дифракции на двух кромках), м; d_{SR} - расстояние от дифракционной кромки (второй дифракционной кромки в случае дифракции на двух кромках) до РТ, м; d - расстояние от ИШ до РТ (траектория распространения прямого звука), м; r - расстояние по горизонтали от ИШ до ШЗК, м; R - расстояние по горизонтали от ШЗК до РТ, м; R_3 - расстояние по горизонтали от ИШ до РТ; $h_{иш}$ - высота ИШ, м; $h_{рт}$ - высота РТ, м.

$$K_{met} = \exp \left[-\left(\frac{1}{2000} \right) \cdot \sqrt{d_{SS} \cdot d_{SR} \cdot d / (2 \cdot z)} \right] \quad \text{для } z > 0, \quad (7)$$

$K_{met} = 1$ для $z \leq 0$ или $R_3 < 100$, что не вносит в расчет ошибку более 1 дБА.

Для расчёта эффективности шумоотражающего ШЭ допускается принимать поправку на отражение ($K_{отр}$) - минус 3 дБА. Для учета Г, Т и У-образной формы

верхней граничной поверхности ШЭ к значению, рассчитанному по формуле (1), вводят коррекцию на форму (K_ϕ)- плюс 2 дБА.

Значение эффективности шумозащитных насыпи (ΔL^H) и выемки (ΔL^B), в т.ч. максимальной, будет зависеть от высоты защищаемой застройки.

Когда высота РТ ниже высоты насыпи имеет место двойная дифракция и применима формула [3]:

$$\Delta L^H = 10 \cdot \lg \left(3 + \frac{C_2}{\lambda} \cdot C_3 \cdot (z + e) \cdot K_{met} \right), \quad (8)$$

где ΔL^H – эффективность ШН, дБА; C_2, λ, K_{met} – то же, что в формуле (1), C_3 – константа, учитывающая дифракцию на верхних краях ШЗК, при дифракции на двух краях рассчитывается по формуле:

$$C_3 = \frac{1 + \left(\frac{5\lambda}{e}\right)^2}{\frac{1}{3} + \left(\frac{5\lambda}{e}\right)^2}, \quad (9)$$

z – то же, что в формуле (1) с отличием:

$$R = R_3 - r - e, \quad (10)$$

где e – ширина верхней площадки ШН, м.

Эффективность ШВ для защиты малоэтажной застройкой определяется как [4]:

$$\Delta L^B = 10 \cdot \lg \left(3 + \frac{C_2}{\lambda} \cdot C_3 \cdot z \cdot K_{met} \right) + DL, \quad (11)$$

где ΔL^B – эффективность ШВ, дБА; $C_2, C_3, \lambda, K_{met}$ – то же, что в формуле (1); DL – коррекция на склон, зависящая от уклона ШВ и равная 1 при внешнем угле выемки 255, 3 при угле 240, 5 при угле 225, 6 при угле 210, для остальных углов определяется интерполяцией; z – то же, что в формуле (1) с отличием:

$$d_{SR} = \sqrt{R^2 + h_{PT}^2}, \quad (12)$$

$$d = \sqrt{R_3^2 + (H + h_{PT} - h_{вш})^2}. \quad (13)$$

Эффективность ШН определяется как эффективность толстого экрана, вписанного под вершины насыпи. Снижение шума при проложении железной дороги в выемке определяется по эффективности ШЭ, вписанного под бровку откоса ШВ с учётом дополнительного влияния склонов. Поэтому в отличие от ШЭ для этих ШЗК:

$$r = x + y \cdot H, \quad (14)$$

где H – высота ШЗК; y – уклон откоса ШЗК, обращенного к ИШ; x – расстояние по горизонтали от ИШ до ШЗК.

Как правило, ШН и ШВ возводятся из грунтов, т.е. шумопоглощающих материалов.

Параметрами формы ШВ и ШН являются их уклон (y) и ширина площадки (e), верхней для насыпи и нижней для выемки. Для ШН оптимальная ширина $e = 2$ м. Для выемки e влияет на расстояние до ИШ и с увеличением «удаляет» его от РТ, снижая эффективность ШВ. Снижение уклона ШН и ШВ повышает их эффективность.

Автор сокращенно обозначает: ШН ($y; e$), так ШН (1; 2) – это шумозащитная насыпь с уклоном 1:1 и шириной верхней площадки 2 м; аналогично ШВ(1,5; 15) – это выемка с уклоном 1:1,5 и шириной земляного полотна 15 м.

Для высокоэтажной застройки (выше 4 м и высоты ШН), эффективность ШН и ШВ становится аналогичным действию тонкостенного экрана, достигая максимума 20 дБА, и рассчитывается по формуле (1). При этом высоты ШН и ШВ будут существенно превышать высоту ШЭ, обеспечивающего ту же, что и они эффективность. Максимальная эффективность ШН для низкоэтажной застройки ограничивается 25 дБА, а ШВ по расчётам не превышает 21 дБА. Рассчитанные по формулам (1, 8, 11) значения эффективности должны быть «ограничены» указанными значениями их максимума.

Для защиты высоко расположенной РТ применимы экранирующие сооружения в виде комбинаций: ШН+ШЭ, ШВ+ШЭ. Сооружение типа ШВ+ШН или ШВ+ШН+ШЭ рассматривать нецелесообразно, т.к. ШЭ, установленный в 4-5 метрах от железных путей даст большую эффективность, тем тот, который будет установлен на ШВ или на ШВ+ШН. Такие ШЗК можно рассматривать только для существующей выемки.

Эффективность комбинаций ШЗК, применяемой для защиты многоэтажной застройки рассчитывается формуле (1) с учётом данных, приведённых в таблице 2. Она не зависит от ширины площадки (e), но увеличивается с уменьшением уклона насыпи или выемки (y).

Таблица 2

Расчёт расстояний, отражающих расположение верхней дифракционной кромки комбинации ШЗК

Расстояние, м	Формула расчёта, в зависимости от типа конструкции	
	ШН+ШЭ	ШВ+ШЭ
r	$r = x_1 + y \cdot H^o + x_2$	
d_{SS}	$d_{SS} = \sqrt{r^2 + (H^{\text{ШЗК}} - h_{\text{инш}})^2}$	
d_{SR}	$d_{SR} = \sqrt{R^2 + (h_{\text{РТ}} - H^{\text{ШЗК}})^2}$	$d_{SR} = \sqrt{R^2 + (h_{\text{РТ}} - H^{\text{Э}})^2}$
d	$d = \sqrt{R_3^2 + (h_{\text{РТ}} - h_{\text{инш}})^2}$	$d = \sqrt{R_3^2 + (H^{\text{В}} + h_{\text{РТ}} - h_{\text{инш}})^2}$

где $h_{\text{инш}}, h_{\text{РТ}}, R_3$ – то же, что в формуле (1); x_1 и x_2 – расстояния до первой и второй ШЗК соответственно; $H^{\text{ШЗК}}$ – высота ШЗК; $H^{\text{Э}}$ и $H^{\text{В}}$ – высота ШЭ и ШВ соответственно.

Эффективность зелёных насаждений ($\Delta L^{\text{ШЗН}}$) можно рассчитывать как [3]:

$$\Delta L^{\text{ШЗН}} = 0,06 \cdot b_{\text{п}}, \quad (15)$$

где $\Delta L^{\text{ШЗН}}$ – эффективность шумозащитных насаждений, дБА; $b_{\text{п}}$ – ширина посадки, м.

Следует отметить, что полученные по формулам (1, 8, 11, 15) значения эффективности применимы для протяжённых ШЗК. Для сооружений ограниченной длины ΔL корректируется с учётом дифракции на боковых рёбрах.

2. Рекомендации по выбору различных вариантов шумозащиты

Для решения проблемы повышенного шума системно следует выделить следующие условные области принятия решения в зависимости от:

1) расстояния до защищаемого объекта:

- область близко расположенной застройки (условно до 50 м),
- область расположения застройки за пределами 50..100 м (области санитарно-защитной зоны (СЗЗ) железной дороги). Наиболее актуальна задача защиты жилой

застройки городов и посёлков на расстоянии от железнодорожных путей близком к 50 м. Ширину СЗЗ до границы садовых участков можно принимать равной 50 м; при размещении железных дорог в выемке, глубиной не менее 4 м, или при осуществлении специальных шумозащитных мероприятий ширина СЗЗ также может быть уменьшена со 100 м до 50 м.

2) этажности защищаемой застройки (высоты РТ):

– область малоэтажной застройки (1-2 этажа), а также мест пребывания и отдыха людей (высота РТ=1,5 м);

– область многоэтажной застройки: среднеэтажной (3-5 этажей, 9-15 м) и высокоэтажной (6-9 этажей, высота 18-27 м).

3) значений требуемого снижения шума ($\Delta L_{\text{треб}}$):

– находящиеся в пределах максимальных значения эффективности ШЗК (ΔL_{max}), когда применима одна ШЗК. В этом случае не требуется решение математической задачи, а оптимальный вариант находится перебором нескольких возможных;

– превышающие ΔL_{max} . В качестве шумозащиты здесь помимо ШЗК (и зелёных насаждений для СЗЗ) требуемое снижение достигается за счёт применения дополнительных вариантов шумозащитных мероприятий (в источнике шума и на объекте защиты) либо рассматривается вариант проектирования тоннеля или галереи. В качестве инструмента возможно использование математического моделирования и программирования.

Начинать выбор необходимо с выявления перечня возможных вариантов шумозащиты для рассматриваемой области принятия решения или руководствоваться таблицей 3.

Таблица 3

Возможные варианты применения ШЗК для защиты от транспортного шума

	Область принятия решения	Рекомендуемые мероприятия			Варианты ШЗК
		ШЗК	ШЗН	Д	
1	Малоэтажная застройка в пределах 50-100 м, требуемое снижение в пределах ΔL_{max}	+	+	-	ШЭ, ШН, ШВ
2	Малоэтажная застройка в пределах 50-100 м, требуемое снижение свыше ΔL_{max}	+	+	(+)	
3	Многоэтажная застройка в пределах 50-100 м, требуемое снижение в пределах ΔL_{max}	+	+	-	ШЭ, ШН, ШН+ШЭ, ШВ+ШЭ
4	Многоэтажная застройка в пределах 50-100 м, требуемое снижение свыше ΔL_{max}	+	+	+	
5	Близко расположенная застройка, требуемое снижение в пределах ΔL_{max}	+	-	-	ШЭ, ШН, ШН+ШЭ (при малых уклонах ШН)
6	Близко расположенная застройка, требуемое снижение свыше ΔL_{max}	+	-	+	

Обозначения:

Д – возможные дополнительные варианты шумозащиты

Для защиты малоэтажной застройки (области 1, 2) не применимы комбинации экранирующих сооружений (за исключением варианта с уже существующей выемкой, не обеспечивающей требуемое снижение шума). Эффективность каждой ШЗК имеет свою формулу расчета, для ШВ учитывается поправка ΔL а для насыпи – двойная

дифракция. При возможности выбора уклона ШВ, ШН, выбирается наименьший. Для дополнительного повышения эффективности насыпи рекомендуется увеличивать её верхнюю площадку до 2-3 м; выемки – использовать ближний к застройке путь, экрана – надстройку на верхней поверхности.

Для защиты многоэтажной застройки эффективность всех ШЗК рассчитывается по одной формуле (1), их высота не превышает высоту РТ, а звук дифрагирует через одну верхнюю поверхность. При наличии высокоэтажных зданий или существенных превышений норм (область 4) в качестве экранирующих сооружений рекомендуется применять их комбинации. ШВ как отдельный вариант не входит в число шумозащитных мероприятий данной области, т.к. с глубиной до 10 м является малоэффективной для указанных высот РТ (поправка DL не применяется, а уклон достаточно пологий для эффективного экранирования). Выемка глубиной 10 м только для $h_{\text{РТ}} = 9$ м на расстоянии 100 м едва достигнет 15 дБА, для той же высоты на расстоянии 50 м эффективность ШВ даст минимальные 4,8 дБА. ШЭ и ШН близких к максимальным высот (8 и 9 м) можно рассмотреть в этой области в качестве полноценных вариантов шумозащиты. Для РТ высотой 27 м на расстоянии 50 м шумопоглощающий экран высотой 7 м даст снижение 17,9 дБА, на расстоянии 100 м максимальные 20 дБА. Эффективность ШН ниже, но для РТ высотой 18 м на тех же расстояниях (50 и 100 м) её эффективность при высоте 9 м составит 15,4 и 19 дБА соответственно.

Следует иметь в виду, что для защиты от железнодорожного шума областей 1-4 не менее 50% ширины санитарно-защитной зоны должно иметь зеленые насаждения.

Если для достижения санитарных норм расчётом предусматривается устройство в комплексе более трёх различных шумозащитных конструкций, в таком случае применение шумозащитной галереи неизбежно.

Близко расположенную застройку рекомендуется защищать с помощью шумозащитного экрана. Для высоких этажей и при требуемом снижении шума большем, чем эффективность ШЭ (область 6) дополнительно использовать средства защиты в источнике и(или) объекте защиты. (пп. 1-5, 13-14 таблицы 1), в качестве альтернативы можно рассмотреть вариант возведения тоннеля или галереи. Применение шумозащитного озеленения и насыпи (в т.ч. с ШЭ) в большинстве случаев будет ограничено размерами площадей до застройки.

При использовании ШЗК для защиты высокоэтажной застройки на близком расстоянии к ИШ (области 3-6) функции их эффективности следует проверять на минимум в зависимости от высоты застройки и не использовать выше.

На основании приведённых данных, можно предложить следующий алгоритм выбора мероприятий, обеспечивающих требуемое снижение шума:

1) Определяется область принятия решения и перечень возможных средств защиты;

2) Выбирается методика и инструмент решения задачи, вводятся исходные данные для расчёта z , за исключением параметров ШЗК (H , y , e), частотные характеристики источника шума, поправочные коэффициенты. Рассчитывается минимально необходимая эффективность шумозащиты с условием: $\Delta L \geq \Delta L_{\text{треб}}$. В случае защиты застройки от железнодорожного шума с установлением СЗЗ (области 1-4 табл. 3) минимально необходимая эффективность шумозащиты определяется после снижения шума зелёными насаждениями как: $\Delta L \geq \Delta L_{\text{треб}} - \Delta L_{\text{шзн}}$;

3) Задаются ограничения (минимальные и максимальные значения, шаг перебора и т.п.) по конструктивным параметрам ШЗК и подбирается оптимальная высота ШЗК или комбинации ШЗК. В зависимости от постановки задачи (области принятия решения) высота подбирается минимально необходимой для обеспечения требуемого шумоглушения

(для областей 1, 3, 5) или максимальная (для областей 2, 4, 6). Если требуемое снижение не может быть достигнуто ШЗК или их комбинацией, подбираются дополнительные варианты, снижающие шум в источнике и в объекте защиты.

4) Анализируется результат.

Эффективность и параметры ШЗК должны анализироваться проектировщиком (лицом, принимающим решение) параллельно, т.к. помимо акустического эффекта существуют другие критерии выбора ШЗК. Подходящие варианты сравниваются по критериям, не влияющим на акустическую эффективность [5]:

- обеспечение снегопереноса или отсутствие снегоотложений,
- отсутствие влияния на безопасность движения,
- отсутствие необходимости устройства дополнительных элементов водоотведения,
- удобство обслуживания и эксплуатации как ШЗК, так и элементов и сооружений пути,
- обеспечение конструктивной прочности на весь период службы,
- способность противостоять агрессивности среды эксплуатации,
- выполнение требований пожарной безопасности конструкции,
- простота конструкции,
- транспортабельность и удобство монтажа,
- доступность и стоимость,
- эстетичный вид.

3. Выбор варианта снижения шума железнодорожного транспорта

Руководствуясь представленным алгоритмом, был осуществлен выбор оптимального шумозащитного комплекса для снижения железнодорожного шума (примеры 1-4) с использованием ШЗК протяжённой длины.

Пример 1. Малоэтажная застройка на удалении 50 м, требуемое снижение шума 19 дБА.

1) Определяется область принятия решения (обл.1) и перечень возможных средств защиты: ШЗН + (ШЭ, ШН ШВ).

2) Используется методика ГОСТов [3, 4], инструмент – МО Excel.

Исходные данные: $h_{\text{рп}} = 1,5$ м; $R_3 = 50$ м; $\Delta L_{\text{треб}} = 19$ дБА; $h_{\text{шш}} = 0,5$ м, $\lambda = 0,33$ м, $x = 4,5$ м (для ШЭ и ШН), $x = 10$ м (для ШВ).

Расчёт z осуществляется по формуле (2) с учётом формул (2-6, 10, 12-14) и табл.2.

Полученные данные: $\Delta L_{\text{ШЗН}} = 1,5$ дБА, $\Delta L \geq 17,5$ дБА.

Эффективность ШЗН рассчитывалась по формуле:

$$\Delta L^{\text{ШЗН}} = 0,06 \cdot \frac{R_3}{2}, \quad (16)$$

с учётом ширины посадки в половину санитарно-защитной зоны, равной R_3 .

3) Используя «Данные»-«Поиск решения» с ограничениями по высоте для ШЭ (4-8 м, целое), ШН (3-9 м), ШН (3-9 м); ШЭ: прямой поглощающий ШЭ и прямой отражающий ШЭ; ШН поглощающая, уклон 1 и 0,5 м, верхняя площадка 2 и 3 м, ШВ поглощающая, уклон 1,5; получены 6 вариантов ШЗК с параметрами, выделенными в таблице 4, обеспечивающие снижение шума, рассчитанное по формулам (1, 8, 11).

Таблица 4

Выбор шумозащитного комплекса для примера 1

параметр	ШЭ	ШЭо	ШН(1;2)	ШН(1;3)	ШН(0,5;2)	ШВ(1,5;15)
№ варианта	1	2	3	4	5	6
у	0	0	1	1	0,5	1,5
е			2	3	2	15
$DL/K_{отр}$	-	-3	-	-	-	5,8
C_3	1	1	1,66	2,05	1,66	1
г	4,5	4,5	7,9	7,6	6,1	17,1
R	45,5	45,5	40,1	39,4	41,9	32,9
Н	4	5	3,4	3,1	3,1	4,7
z	1,26	1,99	0,56	0,46	0,56	0,22
$\Delta L^{ШЗН}$	1,5					
$\Delta L_{треб}$	17,5					
ΔL	18,8	17,8	17,5	17,5	17,5	17,5

4) 6 вариантов ШЗК с представленными в табл. 4 параметрами решают задачу шумозащиты. Предпочтительны варианты 3-5.

Пример 2. Малоэтажная застройка на удалении 50 м, требуемое снижение шума 24 дБА.

1) Определяется область принятия решения (обл.2) и перечень возможных средств защиты: ШЗН+ (ШЭ+Д, ШН(+Д), ШВ+Д).

2) Методика, инструмент, промежуточные расчёты те же. Исходные данные аналогичны примеру 1, за исключением: $\Delta L_{треб}=24$, $x=10$ м и 5 м (для ШВ). Полученные данные: $\Delta L^{ШЗН}=1,5$ дБА, $\Delta L \geq 22,5$ дБА.

3) С ограничениями по высоте для ШЭ (4-8 м, целое), ШН (3-9 м), ШН (3-9 м), ШЭ: прямой поглощающий ШЭ, прямой отражающий ШЭо, "Т"-образный поглощающий ШЭф; поглощающие ШН и ШВ (уклоны и ширина площадок указаны в таблице 8), получены 9 вариантов ШЗК с параметрами, выделенными в таблице 5.

Таблица 5

Выбор шумозащитного комплекса для примера 2

параметр	ШЭ	ШЭФ	ШЭо	ШН (1;2)	ШН (1;3)	ШН (0,5;2)	ШВ (1,5;15)	ШВ (1,5;15)	ШВ (1;15)
№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9
y				1	1	0,5	1,5	1,5	1
e/K_ϕ	0	2	0	2	3	2	15	15	15
$DL/K_{отр}$			3				5,8	5,8	5
C_3	1	1	1	1,66	2,05	1,66	1	1	1
x	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	5	10	10
r	4,5	4,5	4,5	10,9	10,2	7,3	16,5	23,5	19,0
R	45,5	45,5	45,5	37,1	36,8	40,7	33,5	26,5	31,0
H	5	5	7	6,4	5,7	5,6	7,6	9,0	9,0
z	1,99	1,99	3,73	1,81	1,47	1,80	0,77	0,54	0,86
$\Delta L^{\text{ШЗН}}$	5								
$\Delta L_{\text{треб}}$	22,5								
ΔL	20,8	22,8	20,5	22,5	22,5	22,5	22,5	21,0	22,1
ΔL^{Δ}	2,5	0,0	2,5	0,0	0,0	0,0	0,0	1,5	0,4

4) Для вариантов ШЗК 1, 3, 8, 9 требуются дополнительные варианты шумозащиты с эффективностью ΔL^{Δ} (ШНР или ШО):

$$\Delta L^{\Delta} = \Delta L_{\text{треб}} - \Delta L, \quad (17)$$

варианты ШЗК 2, 4-7 снижают шум до требуемого значения. Предпочтительны варианты 2, 5, 6.

Пример 3. Многоэтажная застройка (15 м), на удалении 70 м, требуемое снижение шума 19 дБА.

1) Определяется область принятия решения (обл.3) и перечень возможных средств защиты: ШЗН + (ШЭ, ШН, ШН+Э, ШВ+Э),

2) Отличия от ранее рассмотренных примеров: $R_3 = 70$ м, $h_{\text{рТ}} = 15$ м, x_1 и x_2 .

Полученные данные: $\Delta L^{\text{ШЗН}} = 2,1$ дБА, $\Delta L \geq 16,9$ дБА.

3) с ограничениями по высоте для ШЭ (4-8 м, целое), Э (3-6 м, целое), ШН (3-9 м, шаг 0,1), ШН (3-9 м, шаг 0,1); ШЭ: прямой поглощающий ШЭ; поглощающие ШН(0,5 и 1; 2), в основании экрана ШН (1;2) и ШВ(1 и 1,5; 15); получены 10 вариантов ШЗК с параметрами, выделенными в таблице 6.

Таблица 6

Выбор шумозащитного комплекса для примера 3

параметр	ШЭ	ШН (0,5;2)	ШН (1;2)	ШН+ Э	ШВ+ Э	ШВ+ Э	ШВ+ Э	ШВ+ Э
№ варианта	1	2	3	6	7	8	9	10
y	0	0,5	1	1	1,5	1	1	1,5
x_1	4,5	4,5	4,5	4,5	10	10	5	5
x_2	0	0	0	1	1	1	1	1
r	4,5	7,3	11,8	8,6	17,4	15,8	10,8	13,2
R	65,5	62,7	58,2	61,4	52,6	54,2	59,2	56,8
$H^{н/в}$		5,6	7,3	3,1	4,2	4,9	4,9	4,8
$H^э$	5,0			3,0	6,0	5,0	3,0	4,0
$\Delta L^{\text{ШЗК}}$	5,0	5,6	7,3	6,1	10,2	9,8	7,8	8,8
z	1,1	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
$\Delta L^{\text{ШЗН}}$	2,1							
$\Delta L_{\text{треб}}$	16,9							
ΔL	18,3	16,9	16,9	16,9	16,9	16,9	16,9	16,9

4) Каждый из рассматриваемых вариантов ШЗК решает задачу шумозащиты. Предпочтительны варианты 1 и 2.

Пример 4. Многоэтажная застройка (15 м), на удалении 60 м, требуемое снижение шума 24 дБА.

1) Определяется область принятия решения (обл.4) и перечень возможных средств защиты: ШЗН + (ШЭ, ШН, ШН+Э, ШВ+Э)+Д

2) Отличия от ранее рассмотренных примеров: $R_3 = 60$ м, $h_{\text{рт}} = 15$ м, x_1 и x_2 , Полученные данные: $\Delta L^{\text{ШЗН}} = 1,8$ дБА, $\Delta L \geq 22,2$ дБА.

3) С ограничениями по высоте для ШЭ (4-8 м; шаг 0,5 м), Э (3-7 м; шаг 0,5 м), ШН (3-9 м; шаг 0,1 м), ШН (3-9 м; шаг 0,1 м), ШЭ: прямой поглощающий ШЭ, прямой отражающий ШЭо, "Г"-образный поглощающий ШЭф; поглощающие ШН(0,5 и 1; 2), в основании экрана ШН (1;2) и ШВ(1 и 1,5; 15), в качестве ШЗН – лесопосадка; получены 11 вариантов ШЗК с параметрами, выделенными в таблице 7.

Таблица 7

Выбор шумозащитного комплекса для примера 4

параметр	ШЭф	ШЭ	ШЭо	ШН	ШН +Э	ШН +Э	ШН +Э	ШН +Э	ШН +Э	ШВ +Э	ШВ +Э
№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
y/K_ϕ	2	0	0	1	1	1	1	1	1	1,5	1
$K_{отр}$	0	0	-3	0	0	0	0	0	0	0	0
x_1	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	5	5
x_2	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
r	4,5	4,5	4,5	13,5	8,9	9,8	10,7	11,5	12,4	10,5	9,1
R	55,5	55,5	55,5	46,5	51,1	50,2	49,3	48,5	47,6	49,5	50,9
$H^{н/в}$				9,0	3,4	4,3	5,2	6,0	6,9	3,0	3,1
$H^э$	6,5	6,5	8,0		5,0	4,5	4,0	3,5	3,0	7,0	6,0
$H^{ШЗК}$	6,5	6,5	8,0	9,0	8,4	8,8	9,2	9,5	9,9	10,0	9,1
z	1,9	1,9	3,0	1,1	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,8	1,7
$\Delta L^{ШЗН}$	1,8										
$\Delta L_{треб}$	22,2										
ΔL	22,6	20,6	19,5	18,2	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,3	20,0
$\Delta L^д$	0	2,2	2,7	4,0	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2

4) Для всех вариантов ШЗК, кроме 1 требуются дополнительные варианты шумозащиты с эффективностью $\Delta L^д$. Вследствие большой площади остекления и не достижения норм на территории жилой застройки, в качестве дополнительного мероприятия рекомендуется использование накладок на рельс. Предпочтителен вариант 1, 6-8.

Полученные в каждом из примеров варианты шумозащиты должны быть проанализированы по эксплуатационным и стоимостным показателям для принятия окончательного решения.

Заключение

Для системного решения проблемы повышенного шума предложен алгоритм выбора оптимального комплекса шумозащиты, построенный на основе применения шумозащитных конструкций (ШЗК). Выделены условные области принятия решения в зависимости от расстояния до защищаемого объекта, этажности защищаемой застройки и значений требуемого снижения шума. Разработаны рекомендации по выбору возможных средств защиты в каждой из областей.

С учётом требуемого снижения шума, подбираются возможные комбинации параметров шумозащитных конструкций и их комбинаций: высота, форма и материал. Ряд ограничительных конструктивных параметров должен быть задан проектировщиком в каждом конкретном случае. Если требуемое снижение не достигается ШЗК или их комбинацией, подбираются дополнительные варианты, предпочтение отдаётся снижающим шум в источнике его образования, особенно при защите многоэтажной застройки.

На основании проведённых расчётов, результатом которых стал выбор комплексов шумозащиты, включающий в состав протяжённые ШЗК, установлено:

– При защите малоэтажной застройки, расположенной за отметкой 50 м от железнодорожных путей, предпочтение следует отдавать шумозащитной насыпи. В

случае значений требуемого снижения шума ниже 20 дБА, её высота не превысит высоту шумозащитного экрана, и затраты на возведение и эксплуатацию будут ниже. При необходимом снижении шума более, чем на 20 дБА, потребуется экран меньшей высоты, нежели высота ШН, однако помимо ШЭ необходимы будут дополнительные варианты шумозащиты; насыпь же, вследствие более высокого значения максимальной эффективности, способна будет решить проблему повышенного шума самостоятельно. Только экран «Т-образной» формы в отдельных случаях (в зависимости от требуемого снижения) сможет составить конкуренцию ШН, поэтому такую конструкцию не стоит исключать из внимания в этой области. В экономическом плане, насыпь будет предпочтительнее «Т-образного» экрана.

– Для защиты многоэтажной застройки предпочтение следует отдавать шумозащитным экранам. Конкуренцию им могут составить только комбинированные варианты ШН+ШЭ. В случае высокого требуемого снижения эффективны экраны с «Т-образной» формой. При этом функции эффективности ШЗК предварительно следует проверять на минимум в зависимости от высоты застройки и не использовать выше.

– Шумозащитная выемка как отдельная ШЗК, так и в комбинации с экраном уступает по эффективности всем рассмотренным вариантам.

Дальнейший анализ и выбор полученных шумозащитных комплексов по эксплуатационным, экологическим и стоимостным показателям лежит в области многокритериальной оптимизации. Правильно подобранные математические инструменты позволят решить задачу защиты территорий от повышенного акустического воздействия транспорта более эффективно.

Список литературы

1. Куклин Д. А., Дроздова Л. Ф., Шабарова А. В. Оценка общего эффекта дорожного и железнодорожного шума и разработка мероприятий по его снижению // Защита от повышенного шума и вибрации сборник докладов. СПб: БГТУ «Военмех», 2019. С. 516 – 523.

2. Carl E. Hanson, P.E., Jason C. Ross, P.E., and David A. Towers, P.E. High-Speed Ground Transportation Noise and Vibration Impact Assessment, Guidance Manual, U.S. Department of Transportation, Federal Railroad Administration, September 2012 (<https://railroads.dot.gov/elibrary/high-speed-ground-transportation-noise-and-vibration-impact-assessment>)

3. ГОСТ 31295.2-2005 (ИСО 9613-2:1996) Шум. Затухание звука при распространении на местности. Часть 2. Общий метод расчета.

4. ГОСТ 33325-2015 Шум. Методы расчета уровней внешнего шума, излучаемого железнодорожным транспортом (с Поправкой, с Изменением N 1).

5. ОДМ 218.8.011-2018 Методические рекомендации по определению характеристик и выбору шумозащитных конструкций автомобильных дорог.

References

1. Kuklin D. A., Drozdova L. F., Shabarova A.V. Assessment of the overall effect of road and railway noise and development of measures to reduce it // VIII All-Russian research to practice conference with international participation «Protection against excessive noise and vibration», collection of reports. SPb: BSTU «VOENMEH» named after D.F. Ustinov, 2019. pp. 516 – 523.

2. Carl E. Hanson, P.E., Jason C. Ross, P.E., and David A. Towers, P.E. High-Speed Ground Transportation Noise and Vibration Impact Assessment, Guidance Manual, U.S. Department of Transportation, Federal Railroad Administration, September 2012 (<https://railroads.dot.gov/elibrary/high-speed-ground-transportation-noise-and-vibration-impact-assessment>)

3. GOST 31295.2-2005 (ISO 9613-2:1996) Noise. Attenuation of sound during propagation outdoors. Part 2. General method of calculation

4. GOST 33325-2015 Noise. Calculation methods for external noise emitted by railway transport (as amended, with Change N 1)

5. ODM 218.8.011-2018 Methodological recommendations for determining the characteristics and selection of noise-proof structures of highways (rus).