

УДК: 534.28
OECD: 01.03.AA

Выбор оптимальной шумозащитной конструкции по параметрам, влияющим на акустическую эффективность

Борцова С.С.

Ст. преподаватель кафедры «Экология и производственная безопасность»,
БГТУ «ВОЕНМЕХ им. Д.Ф.Устинова, г. Санкт-Петербург, РФ

Аннотация

Наиболее эффективными в части решения проблемы снижения транспортного шума являются шумозащитные конструкции или сооружения на пути распространения звука (ШЗК): шумозащитные экраны (ШЭ), шумозащитные насыпи или валы (ШН), шумозащитные выемки (ШВ) и их комбинации. Похожим механизмом снижения шума обладают и шумозащитные зелёные насаждения (ШЗН). Для выбора оптимальной ШЗК в работе установлена зависимость акустической эффективности каждой шумозащитной конструкции от основных параметров: высоты, формы (уклон, верхняя площадка) и материала; ширины посадки для ШЗН.

При этом выявлены противоречия в части расчёта эффективности ШЗК, имеющие место в действующей нормативной документации, предложены их корректировка и уточнения. Даны рекомендации по расчёту эффективности шумозащитной насыпи в зависимости от расположения расчётной точки. Уточнён порядок расчета эффективности комбинаций шумозащитных конструкций с целью защиты высокоэтажной застройки, а также эффективности шумозащитного озеленения. Приведены сравнения ШЗК разных видов с отличными конструктивными параметрами.

Ключевые слова: шумозащитная конструкция, параметры шумозащитной конструкции, акустическая эффективность шумозащитной конструкции, выбор шумозащитной конструкции, шумозащитная насыпь, шумозащитная выемка, шумозащитное озеленение.

Selection of the optimal noise barrier according to parameters affecting acoustic efficiency

Bortsova S.S.

Senior Lecturer of the department of Ecology and Industrial Safety, Baltic State Technical University 'VOENMEH' named after D.F. Ustinov, St.Petersburg, Russia

Abstract

The most effective in solving the problem of reducing traffic noise are noise-protective structure or barriers on the path of sound propagation: noise barriers, noise-protective embankments or shafts, noise-protective recesses and their combinations. Noise-protective green spaces also have a similar noise reduction mechanism. To select the optimal noise-protective structure, the dependence of the acoustic efficiency of each noise-protective structure on the main parameters is established: height, shape (slope, upper platform) and material; planting width for noise-protective green spaces.

At the same time, contradictions in the calculation of the effectiveness of noise-protective structures that take place in the current regulatory documentation are revealed, their correction and clarification are proposed. Recommendations are given for calculating the effectiveness of a noise-protective embankment, depending on the location of the design point. The procedure for calculating the effectiveness of combinations of noise-protective structures in order to protect high-rise buildings, as well as the effectiveness of noise-proof

landscaping, has been clarified. Comparisons of noise-proof structures of different types with excellent design parameters are given.

Keywords: noise-protective structure, noise-protective structure parameters, acoustic efficiency of noise barrier, choice of noise barrier, noise embankment, noise recess, noise landscaping.

Введение

При защите жилой застройки от транспортного шума стоит отдавать предпочтение выбору одной шумозащитной конструкции, способной обеспечить требуемое снижение шума. Приоритетными в качестве шумозащиты и дающими наибольшее его снижение являются шумозащитные конструкции или сооружения на пути распространения звука (ШЗК): шумозащитные экраны (ШЭ), шумозащитные насыпи или валы (ШН), шумозащитные выемки (ШВ) и их комбинации. Похожим механизмом снижения шума обладают и шумозащитные зелёные насаждения (ШЗН). Только при отсутствии возможности добиться необходимых норм с применением ШЗК рекомендуется рассматривать варианты комплексного решения со снижением шума в источнике (ограничение скорости движения, малошумный асфальт, накладки на рельс, применение подбалластных матов и др.) и в защищаемом объекте (шумозащитное остекление).

На первом этапе производится подбор оптимальных параметров ШЗК, определяющих их акустическую эффективность. При этом действующая в настоящее время нормативно-техническая документация (НТД) [1-6] содержит противоречивые методы определения снижения шума насыпями, выемками и шумозащитным озеленением, а также не принимает в расчёт защиту высокоэтажной застройки, имеющую свою специфику.

Целью настоящей работы является уточнение действующих подходов, а также разработка методических основ выбора оптимальных ШЗК, применяемых для снижения акустического загрязнения автомобильных и железных дорог в черте городской застройки.

Для решения этой задачи необходимо, в первую очередь, установить зависимость эффективности каждой шумозащитной конструкции от основных конструктивных параметров, чтобы впоследствии иметь возможность их сравнения по стоимостным критериям и критериям, не влияющим на акустическую эффективность.

1. Параметры, влияющие на акустическую эффективность ШЗК

ШЗК создаёт препятствие (экранирование) на пути распространения шума и зону акустической тени для защищаемой застройки.

Акустическая эффективность шумозащитных конструкций для защиты от шума железнодорожного транспорта определяется по ГОСТ 31295.2-2005 [1] и ГОСТ 33325-2015 [2], от автомобильного шума по ОДМ 218.2.013-2011 [3], СП 276.1325800.2016 [4], отчасти ОДМ 218.8.011-2018 [5].

Ключевым параметром, определяющим эффективность ШЗК, является его высота (H). Помимо размеров ШЗК на снижение шума оказывают влияние:

- расположение ШЗК относительно источника шума (ИШ) и расчётной точки защищаемого объекта (РТ). Обозначим этот параметр как δ и подробнее рассмотрим ниже;
- шумопоглощающие, шумоотражающие свойства и форма ШЗК (G , T , Y - образная форма верхней граничной поверхности ШЭ; уклон, ширина верхней или нижней поверхности – для ШН и ШВ),

– частота (f) или длина волны (λ) шума. В ГОСТах [1, 2] для расчёта эффективности ШЗК по уровням звука, дБА, частота принимается равной 1000 Гц ($\lambda = 0,33$ м). В ОДМ [3] формулы расчёта эффективности приводятся сразу в дБА. В СП длина волны принимается равной 0,84 м и 0,42 м для автотранспорта и железнодорожного транспорта соответственно.

Дополнительными параметрами, влияющими на эффективность ШЗК, и отмеченными только для железнодорожного шума в ГОСТе [1] являются количество дифракций (обозначим как коэффициент $K_{\text{диф}}$) и коэффициент, учитывающий влияние метеорологических условий ($K_{\text{мет}}$) и зависящий от δ .

2. Шумозащитные экраны (ШЭ)

Эффективность ШЭ ($\Delta L^{\text{э}}$) мало отличается в рассматриваемых стандартах, нормативных и методических документах [1-5].

Согласно ГОСТ [1], эффективность ШЭ можно рассчитать формуле:

$$\Delta L^{\text{э}} = 10 \cdot \lg(3 + 60,6 \cdot \delta \cdot K_{\text{мет}}). \quad (1)$$

По ОДМ [3]:

$$\Delta L^{\text{э}} = 18,2 + 7,8 \cdot \lg(\delta + 0,02). \quad (2)$$

В СП [4] эффективность ШЭ, защищающих жилую застройку в пределах 200 м определяется как:

$$\Delta L^{\text{э}} = 20 \cdot \lg \frac{\sqrt{2\pi|2\delta/\lambda|}}{\text{th}\sqrt{2\pi|2\delta/\lambda|}} + 5 \quad (3)$$

и для защиты от шума автотранспорта ($\lambda = 0,84$ м) составит:

$$\Delta L^{\text{э}} = 20 \cdot \lg \frac{\sqrt{14,96 \cdot \delta}}{\text{th}\sqrt{14,96 \cdot \delta}} + 5 \quad (4)$$

для защиты от шума железнодорожного транспорта ($\lambda = 0,42$ м):

$$\Delta L^{\text{э}} = 20 \cdot \lg \frac{\sqrt{29,9 \cdot \delta}}{\text{th}\sqrt{29,9 \cdot \delta}} + 5, \quad (5)$$

где $\Delta L^{\text{э}}$ - эффективность ШЭ, дБА; $K_{\text{мет}}$ - коэффициент, учитывающий влияние метеорологических условий; δ - параметр, учитывающий расположение ШЗК относительно ИШ и РТ; λ - длина звуковой волны, м.

Если сравнить эффективности ШЭ, рассчитанные по указанным формулам (рисунок 1), то более близкую по значениям зависимость эффективности ШЭ от его высоты дают ОДМ [3] и ГОСТ [1], а более пропорциональную ГОСТ [1] и СП [4].

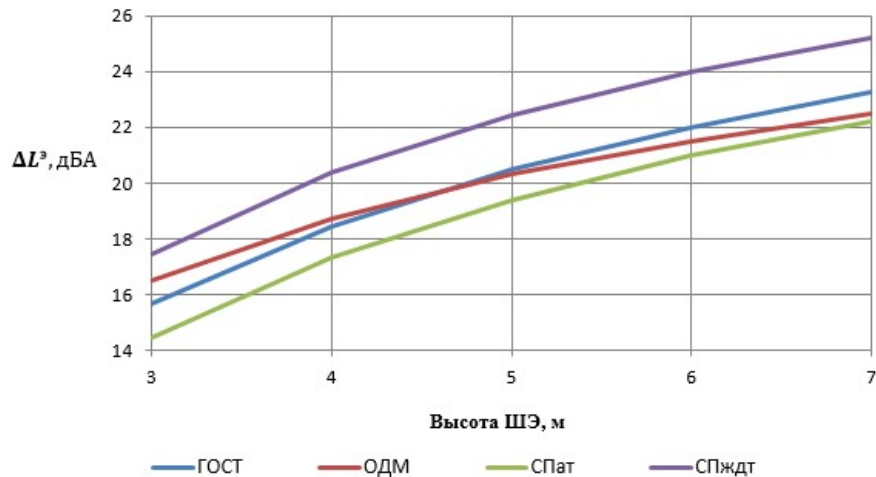


Рис. 1. Сравнение эффективностей ШЭ, рассчитанных по разным методикам

Особенностью указанных формул является их ограниченное применение. Ограничением является максимальная эффективность ШЗК. По ГОСТу [1] эффективность прямого шумозащитного экрана (ΔL^9) с дифракцией на верхнем ребре не может превышать 20 дБА. Т.е. высота ШЭ, выше минимальной, дающей $\Delta L^9 \geq 20$ дБА, должна исключаться из рассмотрения лицом, принимающим решение (ЛПР), как нецелесообразная. Максимальная эффективность ШЭ в ОДМ [3] и СП [4] приводится как 18-20 дБА.

Эффективность шумопоглощающего ШЭ больше отражающего ШЭ. Для защиты от железнодорожного шума учет звукоотражения следует производить по ГОСТу [1] и согласно полученным значениям уровней звука мнимых источников шума пересчитывать эффективность ШЭ. При ориентировочных расчетах допускается принимать поправку - минус 3 дБА. Т.е. формулу (1), применяемую для расчёта эффективности шумопоглощающего ШЭ, для шумоотражающего ШЭ следует применять с поправочным коэффициентом ($K_{отр}$).

Разработчики СП [4] ссылаются на отсутствие точного расчета эффекта от звукопоглощающей облицовки поверхности ШЭ и по опыту эксплуатации принимают то же повышение акустической эффективности до 3 дБА. По названию раздела, в котором такой поправочный коэффициент ($K_{отр}$) упоминается, следует, что он прибавляется в формулу (3).

Дополнительно увеличить эффективность ШЭ можно изменением формы его верхней граничной поверхности или устройством выносной консоли, способствующими приближению ШЭ к ИШ.

В ГОСТе [2] эффективность ШЭ с Г, Т или Y-образной формой верхней граничной поверхности берётся на 2 дБА выше. Логично ввести в формулу (1) поправку на форму (K_{ϕ}) - плюс 2 дБА. Для такого ШЭ максимальная эффективность также должна возрасти до 22 дБА.

Уширенная верхняя часть экрана различной формы, в том числе с добавлением абсорбирующего материала (рисунок 2) согласно ОДМ [3] и СП [4] позволяют в зависимости от конструктивного решения дать дополнительное снижение шума до 3 дБА. Их оценка представлена в таблице 1.

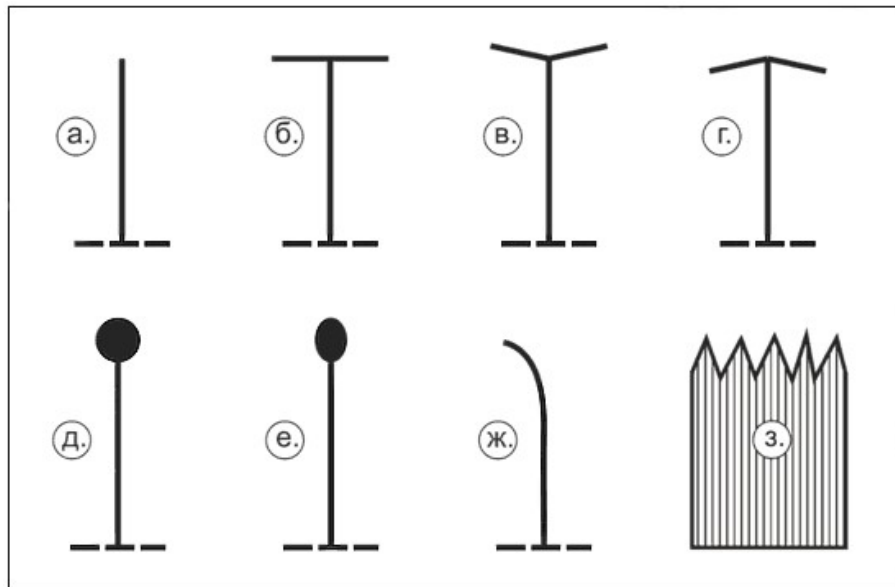


Рис. 2. Схемы устройства верхней части ШЭ

а - вертикальный ШЭ; б - "Т"-образная верхняя часть ШЭ; в - "У"-образная верхняя часть ШЭ; г - стреловидная верхняя часть ШЭ; д - цилиндрическая верхняя часть ШЭ; е - эллипсообразная верхняя часть ШЭ; ж - криволинейный ШЭ; з - пилообразная верхняя часть ШЭ

Таблица 1

Оценка эффективности ШЭ высотой более 4 м с модифицированной конструкцией верхней части [3]

| Тип экрана | "Т"-образные | "У"-образные | Наклонные | Абсорбирующие поверхности с одной стороны | Абсорбирующие поверхности с двух сторон |
|---|--------------|--------------|-----------|---|---|
| Дополнительное ориентировочное снижение шума, дБА | 1,5 - 2,0 | 1,0 - 1,5 | 0,0 - 0,5 | 0,0 - 2,0 | 2,0 - 3,0 |
| Относительное удорожание, % | 10 | 10 - 20 | 10 | 25 | 20 |

При этом выбор формы ШЭ будет диктоваться не только акустической эффективностью, но и нагрузками (ветровыми, дождевыми, снеговыми), усложнением в обслуживании и содержании, снижением долговечности материалов и др.

$K_{отр}$ и $K_{ф}$ позволяют увеличить максимальную эффективность ШЭ для защиты от транспортного шума до 24 дБА [4].

Таким образом, рассмотренные подходы к эффективности ШЭ относительно близки. Противоположны мнения разработчиков НТД по знаку перед $K_{отр}$. Обобщенные данные и уточнённые поправками формулы представлены в сводной таблице 5.

3. Шумозащитная насыпь (ШН)

Аналогично ШЭ ключевой параметр, влияющий на акустическую эффективность насыпи – её высота. Форма ШН определяется шириной верхней площадки (е) и уклоном насыпи (у). Автор сокращенно обозначает: ШН (у; е), так ШН (1;2) – это шумозащитная

насыпь с уклоном 1:1 и шириной верхней площадки 2 м. На эффективность ШН также влияют её поглощающие свойства. Но главное, по мнению автора, это соотношение высот ШН и РТ, в зависимости от которого имеет место эффект «двойной дифракции».

3.1. Эффективность ШН высотой выше высоты РТ

Подходы к оценке эффективности ШН основаны на оценке эффективности мнимого экрана, «вписанного» под одну или обе вершины ШН. В ОДМ [3] и СП [4] они одинаковы, поэтому автор рассматривает их отличия от ГОСТа [2] на примере ОДМ [3]. Высота РТ во всех НТД [1-5] находится ниже высоты ШН.

В ОДМ [3] и СП [4] указано, что эффективность ШН (ΔL^n) рассчитывается, в т.ч. в зависимости от e :

1) как эффективность тонкого ШЭ под вершиной ШН, если насыпь треугольной или трапециевидальной формы с шириной верхней части (e) до 2 м;

2) как эффективность ШЭ, расположенного под ближней к расчетной точке вершиной насыпи при $e = 2...4$ м, т.е. уменьшается по сравнению с предыдущим вариантом с меньшим значением;

3) по аналогии с расчетом эффективности двух тонких шумозащитных экранов, расположенных под вершинами трапециевидальной ШН с $4 < e \leq 10$. Здесь возможны 2 варианта расчёта:

3.1) при небольшой разнице отметок верха параллельных экранов (до 1 м), что наиболее подходит для насыпи, снижение шума ШН может быть определено по величине δ' , вычисляемой как:

$$\delta' = \delta + e, \quad (6)$$

где δ - параметр, учитывающий расположение ШЗК относительно ИШ и РТ.

Однако расчёт по этой формуле даёт эффективность ШН, соизмеримую с эффективностью ШН с e менее 2 м и не меняется при увеличении верхней площадки. Т.е. формула не применима.

3.2) энергетически суммируются эффективности каждого из двух ШЭ под гранями ШН по формуле:

$$\Delta L^n = 10 \cdot \lg(10^{0,1 \cdot \Delta L^{n1}} + 10^{0,1 \cdot \Delta L^{n2}}), \quad (7)$$

где ΔL^n - эффективность ШН, дБА.

В этом случае, при увеличении e с 4 до 5 происходит резкое увеличение эффективности ШН, а затем идёт плавное её снижение.

Расчёты и их графическое представление (на рисунке 3а) не позволяют использовать данный подход к определению эффективности ШН.

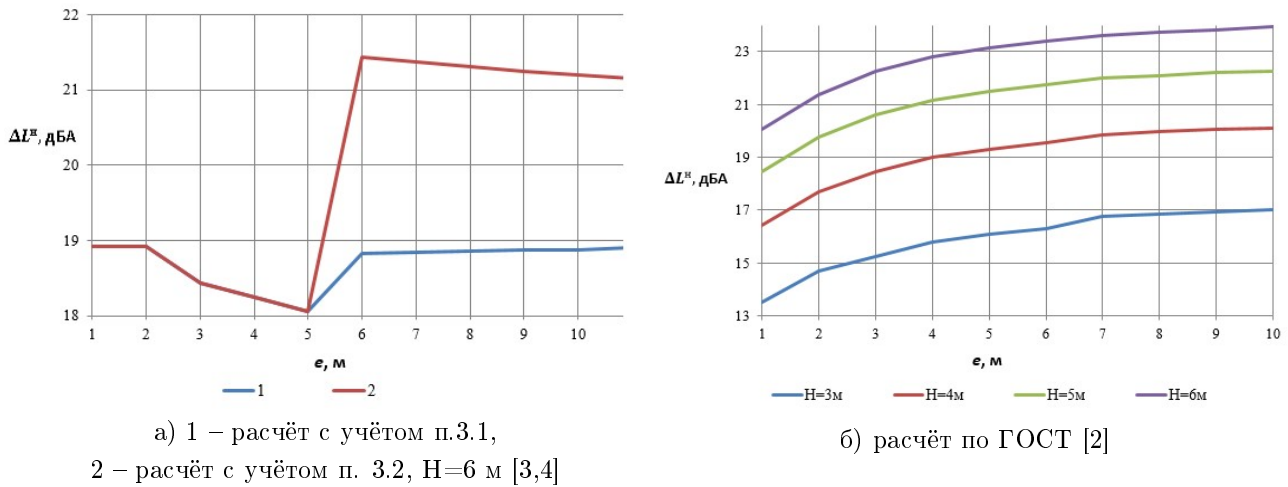


Рис. 3. Зависимость эффективности ШН от ширины верхней площадки

По мнению автора, главный их недостаток – неверное расположение мнимого экрана-стенки и не учёт двойной дифракции, которая имеет место при защите насыпью РТ, находящийся ниже высоты ШН [6].

Этого недостатка лишена формула для расчёта эффективности толстого ШЭ, параллельных экранов или ШН, приведенная в ГОСТе [1], т.к. включает поправочный коэффициент, учитывающий дифракцию на верхних кромках ($K_{\text{диф}}$):

$$K_{\text{диф}} = \frac{1 + \left(\frac{5\lambda}{e}\right)^2}{\frac{1}{3} + \left(\frac{5\lambda}{e}\right)^2} \quad (8)$$

где $K_{\text{диф}}$ - коэффициент дифракции; e - шириной верхней площадки ШН, м.

$K_{\text{диф}}$ увеличивается в зависимости от e как:

| e | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $K_{\text{диф}}$ | 1,22 | 1,66 | 2,05 | 2,32 | 2,51 | 2,63 | 2,71 | 2,77 | 2,82 | 2,85 |

С учётом расположения мнимого экрана под ближней к ИШ вершиной насыпи, что представляется автору верным, формулы расчёта эффективности такого ШЭ (формула 1) и $K_{\text{диф}}$ (формула 8) эффективность ШН можно представить как:

$$\Delta L^{\text{ш}} = 10 \cdot \lg \left(3 + 60,6 \cdot \frac{1 + \left(\frac{1,65}{e}\right)^2}{\frac{1}{3} + \left(\frac{1,65}{e}\right)^2} \cdot (\delta + e) \cdot K_{\text{мет}} \right), \quad (9)$$

где $\Delta L^{\text{ш}}$ - эффективность ШН, дБА; e - ширина верхней площадки ШН, м; δ - параметр, учитывающий расположение ШЗК относительно ИШ и РТ; $K_{\text{мет}}$ - коэффициент, учитывающий влияние метеорологических условий.

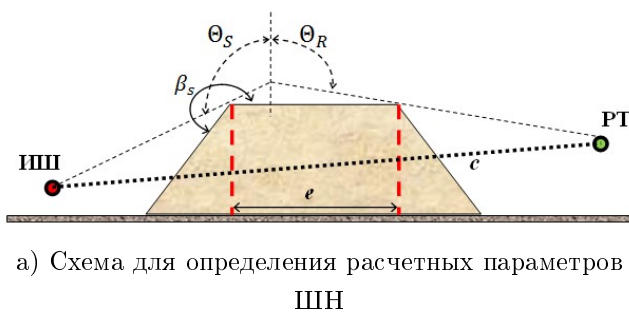
Рассчитанная по формуле (9) эффективность ШН показывает закономерную зависимость её от ширины верхней площадки (e) (рисунок 3б).

Ощутимый прирост эффективности наблюдается при увеличении e с 1 до 2 м (1,2-1,3 дБА), далее до $e = 7$ м он составляет в среднем 0,5 дБА с небольшим скачком от 6 к 7 м, далее практически не меняется (прирост менее 0,1 дБА). Т.е. сооружать ШН с e более 5 м нецелесообразно, оптимально 2 м. Для сравнения увеличение высоты ШН в диапазоне от 4 до 8 м на 1 м повышает её эффективность на 1,5 - 2 дБА.

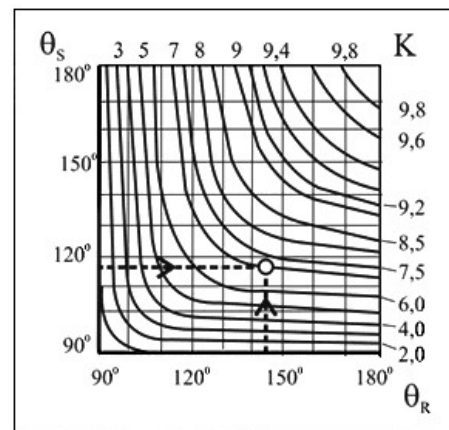
При ширине верхней части ШН свыше 10 м в ОДМ и СП [3, 4] применяется расчетная схема, приведенная на рисунке 4а [3, 4], а эффективность рассчитывается по формуле:

$$\Delta L^{\text{ш}} = \Delta L^{\text{э}} + K(\lg e + 0,7) - K_{\text{скл}}, \quad (10)$$

где $\Delta L^{\text{э}}$ - снижение шума условным экраном-стенкой, K - величина, определяемая по номограмме в зависимости от величин углов θ_S и θ_R (рис. 4б); e - ширина насыпи, м; $K_{\text{скл}}$ - коррекция на склон, равная 1 при внешнем угле $\beta_s = 255$, 3 при $\beta_s = 240$, 5 при $\beta_s = 225$, 6 при $\beta_s = 210$; для промежуточных значений β_s $K_{\text{скл}}$ определяется интерполяцией.



а) Схема для определения расчетных параметров ШН



б) Номограмма расчёта $K_{\text{скл}}$

Рис. 4. Схема для определения расчетных параметров широкой шумозащитной насыпи

Подобная формула есть и в ГОСТе [2], но с принципиальными отличиями.

Первое заключается в расположении условного экрана-стенки. В ОДМ и СП под ближней к РТ вершиной ШН, в ГОСТе [2] - под ближней к ИШ вершиной ШН (что автору представляется более верным).

Второе отличие - знак перед поправочным коэффициентом $K_{\text{скл}}$. Здесь мнения разработчиков НТД кардинально расходятся. В ГОСТе [2] подчёркивается дополнительное влияние склонов на снижение уровней шума, т.е. однозначно большее снижение шума, нежели снижение экраном и суммирование значения поправки.

Третье - явная опечатка в ГОСТе [2] относительно определения $K_{\text{скл}}$ по значению «внутреннего» угла. Угол β_s может быть только внешний.

Автор не рассматривает ШН с e более 10 м в качестве альтернативы ШЭ, сооружать такие ШЗК нецелесообразно. Данный подход применяют скорее к расчёту акустической эффективности естественных элементов рельефа (холмы, возвышенности) на пути распространения шума. Но выявленные замечания должны быть учтены разработчиками программных продуктов.

Таким образом, для высот ШН выше высоты РТ имеет место дифракция на двух кромках (рисунок 5а), эффективность ШН может быть вычислена по формуле (9), а её максимальное значение может достигнуть 25 дБА. Правда обеспечить указанное снижение в РТ высотой 1,5 м, расположенной на расстоянии 50 м...100 м от ИШ, сможет ШН с уклоном 1:1 высотой 9...10 м соответственно.

3.2. Эффективность ШН высотой ниже высоты РТ. Сравнение эффективностей ШН и ШЭ

При учёте снижения шума насыпью важно учесть расположение РТ.

Когда высота РТ ($h_{рт}$) превышает высоту насыпи, снижение шума этой ШЗК становится аналогичным действию тонкого экрана, достигая максимума 20 дБА. В этом случае эффективность ШН не зависит от ширины её верхней площадки (e), а для обеспечения одинакового снижения шума высота ШН должна превышать высоту ШЭ.

Схемы для определения эффективности ШН в зависимости от расположения РТ представлены на рисунке 5.

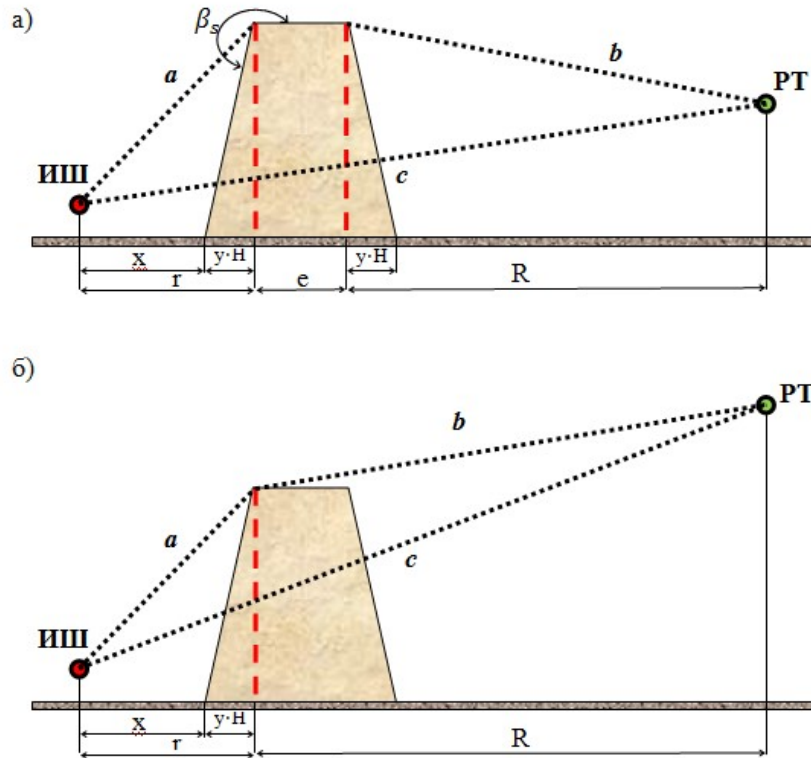


Рис. 5. Схемы для определения эффективности ШН в зависимости от расположения а) при расположении РТ ниже высоты ШН, б) при расположении РТ выше высоты ШН

Сравнение эффективности ШН с двойной дифракцией и ШЭ, расположенных на одном расстоянии от дороги, в таблице 2.

Таблица 2

Сравнение эффективностей ШН и ШЭ, $H > h_{рт}$

| Высота ШЗК | ШН (1;1) | ШН (1;2) | ШН (1;3) | ШН (0,5;2) | ШН (1,5;2) | ШЭ |
|------------|----------|----------|----------|------------|------------|-------|
| 3 | 13,51 | 14,71 | 15,26 | 15,53 | 14,06 | 14,56 |
| 4 | 16,42 | 17,69 | 18,44 | 18,63 | 16,98 | 17,76 |
| 5 | 18,47 | 19,78 | 20,60 | 20,70 | 18,94 | 20 |

Сравнение эффективности ШН с дифракцией на ближнем к ИШ ребре и ШЭ, расположенных на одном расстоянии от дороги, в таблице 3.

Таблица 3

Сравнение эффективностей ШН и ШЭ, $H < h_{рт}$

| Высота ШЗК | ШН (1,5;2) | ШН (1;2) | ШН (0,5;2) | ШЭ |
|------------|------------|----------|------------|------|
| 4 | 9,1 | 11,0 | 13,1 | 15,4 |
| 5 | 11,8 | 13,7 | 15,8 | 18,1 |
| 6 | 13,8 | 15,7 | 17,8 | 20 |

Второй параметр формы ШН (и единственный в случае расположения РТ выше высоты ШН), от которого зависит её акустическая эффективность – это уклон. Придерживаясь позиции разработчиков ГОСТов [1, 2] о расположении мнимого экрана под ребром, ближнем к ИШ, очевидно, что с уменьшением уклона насыпи её эффективность повышается. Зависимость эффективности ШН от уклона также отражена в таблицах 2 и 3.

Уклон определяется типом грунта насыпи, редко он бывает меньше 1:1, для обеспечения устойчивости откосов ШН в случае его снижения, а также уменьшения занимаемой площади данной ШЗК возможно устройство подпорных стен из местных материалов. Для защиты откосов ШН от размыва целесообразно устройство газона или обработка его поверхности вяжущими материалами [3, 4].

Рассматриваемые выше ШН предполагаются грунтовыми с возможным посевом трав или кустарника, т.е. поглощающими. Отражающие и поглощающие свойства ШН недостаточно освещены в НТД [1-5]. Автор придерживается мнения, что вычисленная по формуле (9) эффективность применима для поглощающей ШН. Для отражающей ШН (из каменных материалов, габионов и т.п.) нужно применять поправочный коэффициент ($K_{отр}$).

4. Шумозащитная выемка (ШВ)

Снижение шума в случае проложения дороги в выемке определяется на основе расчета акустической эффективности мнимого экрана, условно вписанного под бровку откоса выемки, высотой, равной глубине ШВ. Ширина нижней площадки (e) и уклон выемки (y) оказывают влияние на расположение условного экрана. Широкая площадка (увеличение e), позволяя разместить большее количество полос движения транспорта, «удаляет» ИШ от подножия выемки (т.к. расположение ИШ берётся по крайнему от ШВ источнику), тем самым уменьшает эффективность выемки. Чем больше уклон ШВ, тем дальше располагается мнимый экран, и также как и в случае с ШН, уменьшается её эффективность.

В случае определения эффективности ШВ (ΔL^B) по НТД [1-5] не удастся избежать применения дополнительной поправки $K_{скл}$, определяющейся аналогичным с ШН образом в зависимости от внешнего угла β_s , а, следовательно, и от уклона. Как и в разделе 3.1, в разных источниках $K_{скл}$ берётся с противоположными знаками. В ГОСТе [2]:

$$\Delta L^B = 10 \cdot \lg(3 + 60,6 \cdot \delta \cdot K_{мет}) + K_{скл}, \quad (11)$$

в ОДМ и СП [3, 4]:

$$\Delta L^B = 18,2 + 7,8 \cdot \lg(\delta + 0,02) - K_{скл}. \quad (12)$$

Для защиты от шума автотранспорта ($\lambda = 0,84$ м) эффективность ШВ составит:

$$\Delta L^B = 20 \cdot \lg \frac{\sqrt{14,96 \cdot \delta}}{th \sqrt{14,96 \cdot \delta}} + 5 - K_{\text{скл}}. \quad (13)$$

Для защиты от шума железнодорожного транспорта ($\lambda = 0,42$ м):

$$\Delta L^B = 20 \cdot \lg \frac{\sqrt{29,9 \cdot \delta}}{th \sqrt{29,9 \cdot \delta}} + 5 - K_{\text{скл}}. \quad (14)$$

соответственно, где ΔL^B - эффективность ШВ, дБА; $K_{\text{мет}}$ - коэффициент, учитывающий влияние метеорологических условий; δ - параметр, учитывающий расположение ШЗК относительно ИШ и РТ; $K_{\text{скл}}$ - коррекция на склон.

Следуя логике разработчиков ГОСТа [2], эффективность выемки превышает эффективность ШЭ, вписанного под бровку её откоса, вследствие дополнительного влияния склона. Тогда максимальная эффективность ШВ с уклоном 1:1 ($K_{\text{скл}} = 5$) будет равна 25 дБА, а с уклоном 1:1,5 ($K_{\text{скл}} = 5,8$) превысит 25 дБА. Однако расчёты не позволяют получить такие большие снижения шума. Например, максимальная эффективность ШВ (1,5;15), удаленной подножием от ИШ на 10 м, составит 21,9 дБА при высоте 13,4 м; если «приблизить» ИШ до 5 м к ШВ максимальная её эффективность достигнет 24,1 дБА при высоте 14,5 м. В большинстве случаев в зависимости от вида грунта уклон откосов выемки имеет значения 1:2 или 1:1,5, высота не превышает 10 м, поэтому получить в расчётах ΔL^B более 20 дБА сложно.

Уменьшения уклона выемки с сохранением устойчивости её откосов добиваются установкой подпорных стенок из недорогих, преимущественно местных материалов: древесина, каменная кладка, армированный грунт, габионы и т.п.

Остаётся непонятным вопрос, что происходит с эффективностью ШВ с увеличением высоты РТ выше рассматриваемой в нормативных документах [1-4]. Высота РТ принимается на уровне 1,5 м в зоне одноэтажной застройки и в зонах отдыха [2-4], на высоте 4,0 м - в зоне многоэтажной застройки [2]. Логично предположить, что влияние склонов с высотой РТ уменьшается и, начиная с определённой высоты, поправкой следует пренебречь.

При высоких РТ снижение шума ШВ становится аналогичным действию экрана, а высота ШВ будет существенно превышать высоту ШЭ, обеспечивающего ту же, что и она эффективность. Схема для определения эффективности ШВ представлена на рисунке 6.

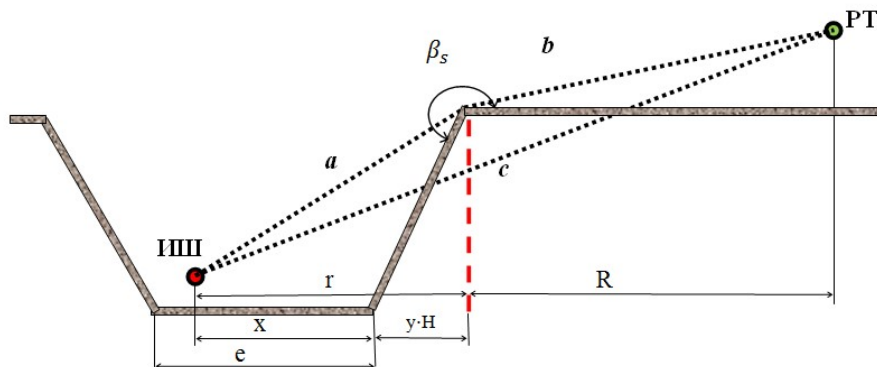


Рис. 6. Схема для определения эффективности ШВ

Как и в случае с ШН, для отражающих ШВ следует использовать поправку на отражение $K_{\text{отр}}$.

5. Комбинации ШЗК

В нормативных документах [1-4] не уделяется внимание защите высокоэтажной застройки, а это, по мнению автора, актуальная проблема.

Снижение шума ШЗК уменьшается с высотой, не мешая ей оставаться достаточно эффективным средством защиты. Повысить эффективность ШЗК можно применением комбинаций ШЗК. Единственное, нужно учитывать, что чем ближе РТ находится к ИШ, тем сложнее создать экранирование и при выборе ШЗК функции их эффективности должны быть «проверены» на экстремум (минимум в зависимости от высоты РТ) для ограничения в применении.

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 ИШ даст большую эффективность, тем тот, который будет установлен на ШВ или на ШВ+ШН. Исключение составят только ШВ и ШН с малым уклоном.

Эффективность ШЗК (комбинации ШЗК), применяемой для защиты многоэтажной застройки можно рассчитать по формулам (1-5), правильно вычислив параметр δ . Схемы для расчёта эффективности комбинаций ШЗК представлены на рисунке 7.

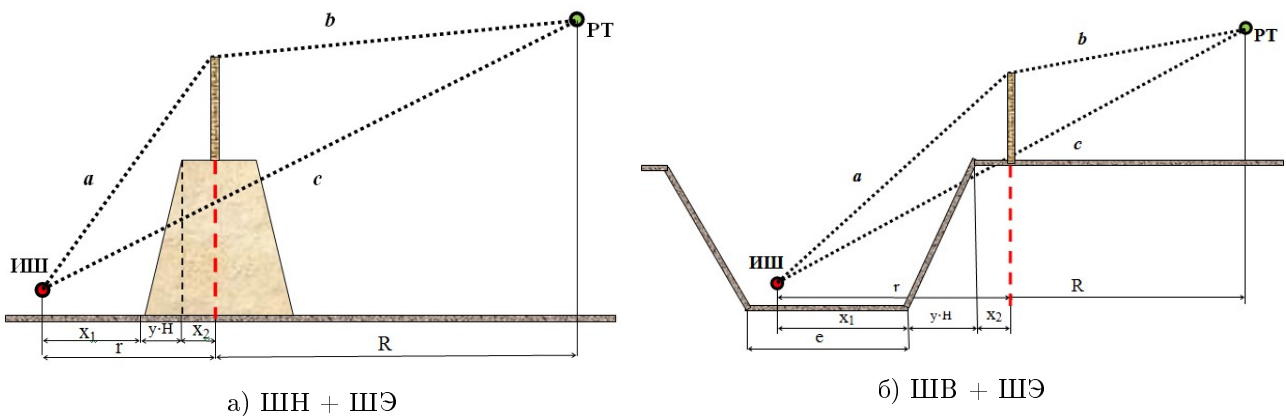


Рис. 7. Схемы для определения эффективности комбинаций ШЗК:

В случае комбинации ШН+ШЭ ширина верхней площадки насыпи (e) не влияет на эффективность шумозащиты, нужно выбирать её размер минимально необходимый для размещения на насыпи ШЭ либо с целью уменьшения землеотвода. Уклон (y) насыпи и выемки влияет на эффективность комбинированный ШЗК также, как и без установленного на них ШЭ.

В ОДМ и СП [3, 4] предложено эффективность представленных на рисунке 7 комбинаций ШЗК рассчитывать энергетическим суммированием:

$$\Delta L^{0+\varepsilon} = 10 \lg (10^{0,1 \cdot \Delta L^0} + 10^{0,1 \cdot \Delta L^\varepsilon}), \quad (15)$$

где ΔL^0 - эффективность основания конструкции (ШВ или ШН), дБА; ΔL^ε - эффективность ШЭ, дБА.

Однако расчёты по этой формуле дают завышенные результаты.

6. Расположение ШЗК

Стоит несколько подробнее остановиться на «геометрии» распространения звука при наличии и отсутствии ШЗК, а точнее на расчёте параметра δ , отражённого во всех

приведенных выше формулах эффективности ШЗК и учитывающего расположение ШЗК относительно ИШ и РТ как:

$$\delta = a + b - c, \tag{16}$$

где δ - параметр, учитывающий расположение ШЗК относительно ИШ и РТ;
 a - расстояние от источника шума до дифракционной кромки (первой дифракционной кромки в случае дифракции на двух кромках ШН) будет определяться его проекцией на горизонтальную поверхность (r), а также разницей высот ШЗК и ИШ;
 b - расстояние от дифракционной кромки (второй дифракционной кромки в случае дифракции на двух кромках ШН) до РТ, определяется его проекцией на горизонтальную поверхность (R) и разницей высот РТ и ШЗК (только высотой РТ для ШВ).
 c - расстояние от ИШ до РТ (траектория распространения прямого звука), определяется его проекцией на горизонтальную поверхность (R_3) и разницей высот РТ (увеличенную на высоту ШЗК в случае выемки) и ИШ.

На основании рисунков 5-7 в таблице 4 приведены данные для расчёта параметра δ для различных ШЗК.

Таблица 4
 Определение параметра δ

| ШЭ | ШН, ШВ | ШН+ШЭ | ШВ+ШЭ |
|---|---|--|-------|
| $r = x$ | $r = x + y \cdot H$ | $r = x_1 + y \cdot H^o + x_2$ | |
| $a = \sqrt{r^2 + (H - h_{иш})^2}$ | | | |
| $R = R_3 - r$ | | | |
| $R = R_3 - r - e$ для ШН с двойной дифракцией, $H^н > h_{рт}$ | | | |
| $b = \sqrt{R^2 + (h_{рт} - H)^2}$ для ШЭ, ШН | $b = \sqrt{R^2 + (h_{рт} - (H^н + H^э))^2}$ | $b = \sqrt{R^2 + (h_{рт} - H^э)^2}$ | |
| $b = \sqrt{R^2 + h_{рт}^2}$ для ШВ | | | |
| $c = \sqrt{R_3^2 + (h_{рт} - h_{иш})^2}$ | | $c = \sqrt{R_3^2 + (H^в + H^э + h_{рт} - h_{иш})^2}$ | |
| $c = \sqrt{R_3^2 + (H^в + h_{рт} - h_{иш})^2}$ для ШВ | | | |

где $h_{иш}$ - высота ИШ; $h_{рт}$ - высота РТ; R_3 - расстояние до защищаемой застройки (проекция c); $H^э, H^н, H^в$ - высота ШЭ, ШН, ШВ соответственно; x - расстояние от ИШ до ШЗК.
 x_1 и x_2 - расстояния до первой и второй ШЗК соответственно в случае комбинации ШЗК.
 H - высота ШЗК; $H = H^o + H^э$ в случае комбинации ШЗК, H^o - высота основания комбинации ШЗК (выемки или насыпи).

Коэффициент, учитывающий влияние метеорологических условий ($K_{мет}$) [1], зависящий от δ , рассчитывается как:

$$K_{мет} = \exp \left[- \left(\frac{1}{2000} \right) \cdot \sqrt{a \cdot b \cdot c / (2 \cdot \delta)} \right] \quad \text{для } \delta > 0, \tag{17}$$

$K_{мет} = 1$ для $\delta \geq 0$ или $R_3 < 100$, что не вносит в расчет ошибку более 1 дБ(А).

7. Длина ШЗК

Длина ШЗК также влияет на её акустическую эффективность и определяется в зависимости от расстояния до защищаемого объекта, как показано на рисунке 8.

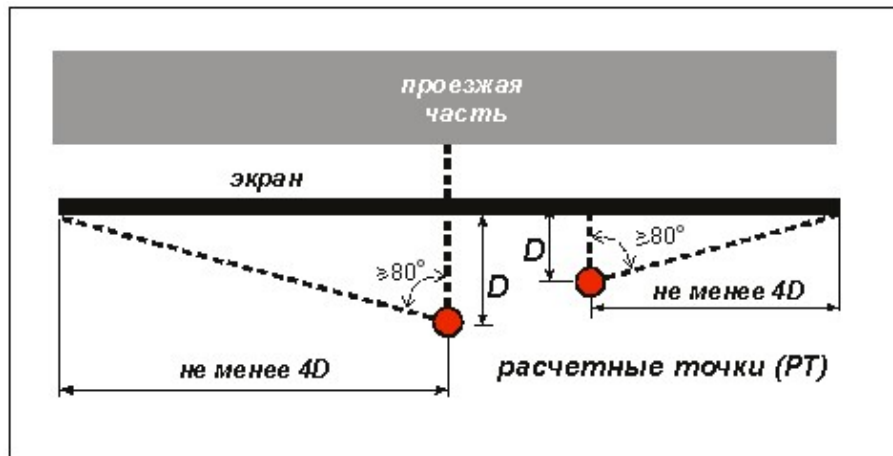


Рис. 8. Схема для определения длины ШЗК [3]

Согласно ГОСТу [2] длина протяженного ШЭ должна быть больше длины защищаемой застройки на расстояние, в 4,5 раза превышающее расстояние от ШЭ до крайних точек объекта защиты (D). По СП [4] длину застройки (1) увеличивают в каждую сторону не менее чем на 4-кратное расстояние D (рисунок 5) или до угла 160° (как показано на рисунке 9а). Отгон длины ШЗК ($l_{отг}$), т.е. её увеличение за счет дополнительных участков аналогичной конструкции, превышающих пределы защищаемой жилой застройки, для предотвращения проникания транспортного шума определяют по номограмме (см. рисунок 9в), в зависимости от расстояния R_3 [3].

При невозможности обеспечения требуемой длины проектируют дополнительные боковые отгоны ШЗК (рисунок 9б) так, чтобы выполнялось условие - боковые кромки экрана видны из расчетной точки под углом не менее 160° .

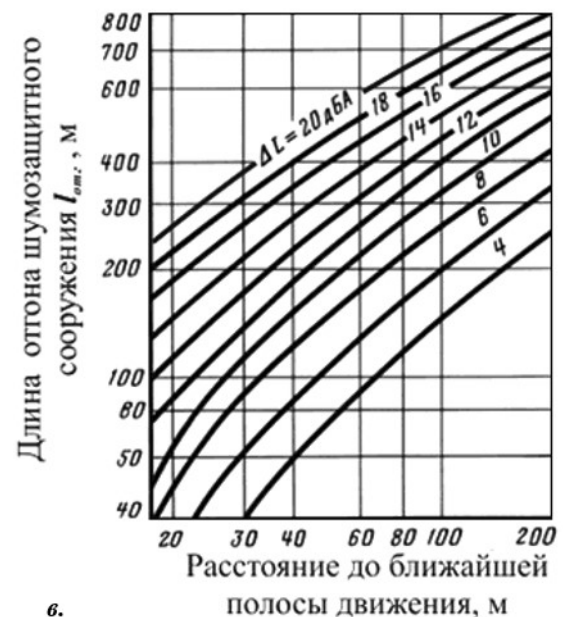
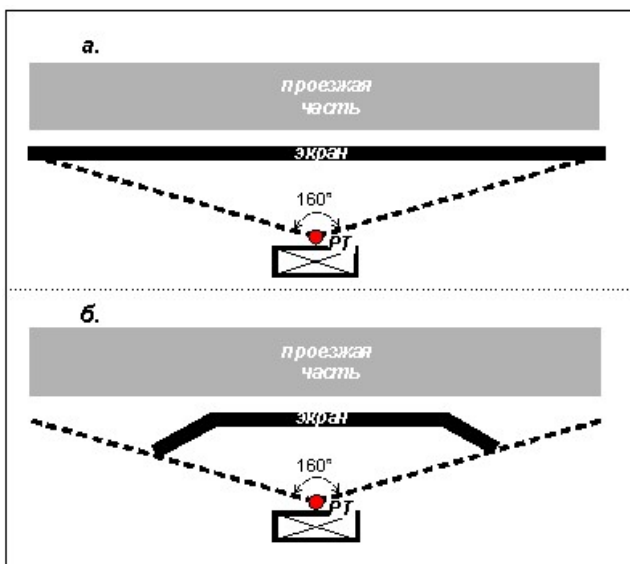


Рис. 9. Обеспечение необходимой длины ШЗК [3]

а) прямой ШЗК; б) искривлённой в сторону защищаемого участка ШЗК; в) номограмма определения длины отгона ШЗК

Если и это условие невыполнимо, применяется поправка $K_{дл}$ по таблицам СП [4]. Она рассчитывается по эффективностям отгонов с каждой из сторон ШЭ в

зависимости от противоположных им углов и разности таких эффективностей. $K_{дл}$ определяется для каждого конкретного случая проектировщиком ШЗК, актуальна для расчёта эффективности отгонов или непротяжённых ШЗК.

8. Шумозащитные зелёные насаждения (ШЗН)

ШЗН относят к экранирующим сооружениям небольшой эффективности. Условно их можно разделить на шумозащитную лесопосадку (ЛП), состоящую из невысоких деревьев и кустарника и шумозащитное озеленение (ШЗ), представляющее собой посадку по схеме, представленной на рисунке 10.

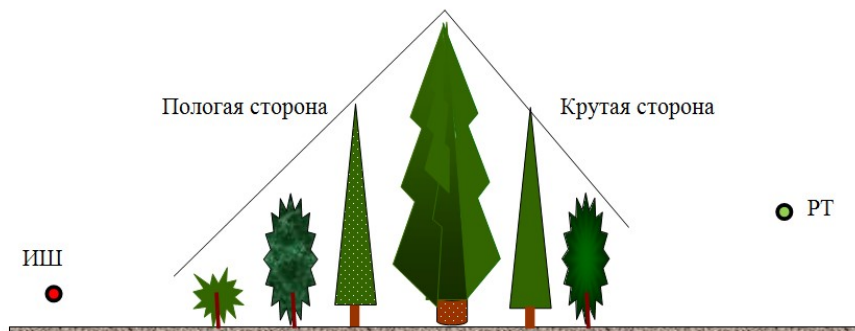


Рис. 10. Схема шумозащитного озеленения:

1 ряд - низкий кустарник; 2, 6 ряды - высокий кустарник; 3, 5 ряды - сопутствующая древесная порода;
4 ряд - главная древесная порода

Снижение шума лесопосадкой (ЛП) зависит от её ширины и определяется по табл. А.1 ГОСТа [1] в зависимости от частоты шума. ЛП шириной 20 м даст снижение шума на 1 дБА, с увеличением ширины ($b_{лп}$) её эффективность увеличивается на 0,06 дБА/м. Главное требование, чтобы посадка была плотной, предпочтительно хвойных пород. Эффективность ЛП ($\Delta L^{лп}$) можно рассчитывать как:

$$\Delta L^{лп} = 0,06 \cdot b_{лп}. \quad (18)$$

В ОДМ принимают среднюю величину снижения шума при $b_{лп} \leq 100$ м:

$$\Delta L^{лп} = 0,08 \cdot b_{лп}. \quad (19)$$

В СП в зависимости от частотного характера и для полосы более 20 м эффективность лесопосадки составит для авто- и железнодорожного шума:

$$\Delta L^{лп} = 0,05 \cdot b_{лп} \quad \text{и} \quad \Delta L^{лп} = 0,06 \cdot b_{лп} \quad (20)$$

соответственно, где $\Delta L^{лп}$ - эффективность лесопосадки, дБА; $b_{лп}$ - ширина лесопосадки, м.

Эффективность шумозащитного озеленения приводится в ОДМ 218.011-98 [7] и, по мнению автора, представленные там данные несколько завышены (до 18 дБА), поэтому снижение шума ШЗ требует уточнений. При проектировании шумозащитного озеленения следует стремиться получить в сечении общего контура форму треугольника с более пологой стороной к источнику шума. В этих целях ряды в широких полосах располагают по приведённой на рисунке 10 схеме. Посадка осуществляется в шахматном порядке, ширина полосы 20-25 м, от лесопосадки ШЗ отличается наличием главной древесной породы – деревьев пятой группы высотой 5-8 м, что, по мнению автора и опыту

применения для защиты от шума автотранспорта, дополнительно снижает уровень шума в среднем на 5 дБА. Поэтому эффективность ШЗ ($\Delta L^{\text{шз}}$) для приближённых расчётов можно рассчитывать, например, для железнодорожного шума как:

$$\Delta L^{\text{шз}} = 0,06 \cdot b_{\text{лп}} + 5, \quad (21)$$

где $\Delta L^{\text{шз}}$ – эффективность шумозащитного озеленения, дБА; $b_{\text{лп}}$ - ширина лесопосадки, м.

Также не ясен механизм совместного действия ШЗ и другой ШЗК.

Для использования ШЗ должны быть учтены климатические, экологические, эксплуатационные и экономические факторы. Также следует отметить, что не менее 50% ширины санитарно-защитной зоны железной дороги должно иметь зеленые насаждения.

9. Уточнённый расчёт эффективности ШЗК и ШЗН

Сводная информация и уточнённые формулы расчёта эффективности ШЗК и ШЗН приведены в таблице 5.

Таблица 5

Обобщенные данные и уточнённые поправками формулы расчёта эффективности шумозащитных мероприятий (ШЗМ)

| ШЗМ | Железная дорога | Автомобильная дорога | |
|--|--|---|------------------------|
| | | ОДМ 218.2.013-2011 | СП 276.1325800.2016 |
| НТД | ГОСТ 31295.2-2005; ГОСТ 33325-2015 | | |
| Высота ИШ ($h_{\text{иш}}$), м | 0,5 | 1 | |
| Высота РТ ($h_{\text{рт}}$), м | 1,5 (в зонах отдыха и одноэтажной застройки); 4,0 (в зоне многоэтажной застройки) | 1,5-2 | |
| Частота (f), Гц | 1000 | - | |
| Длина волны (λ), м | - | - | 0,84 (ад) 0,42 (жд) |
| ШЭ $\Delta L^{\text{э}}$, дБА | $\Delta L^{\text{э}} = 10 \cdot \lg(3 + 60,6 \cdot \delta \cdot K_{\text{мет}}) - K_{\text{отр}} + K_{\text{ф}} - K_{\text{дл}}$ $\Delta L_{\text{max}}^{\text{э}} = 20 - 22$ | $\Delta L^{\text{э}} = 18,2 + 7,8 \cdot \lg(\delta + 0,02) + K_{\text{отр}} + K_{\text{ф}} - K_{\text{дл}}$ $\Delta L^{\text{э}} = 20 \cdot \lg \frac{\sqrt{14,96 \cdot \delta}}{1h \sqrt{14,96 \cdot \delta}} + 5 + K_{\text{отр}} + K_{\text{ф}} - K_{\text{дл}}$ (ад) $\Delta L^{\text{э}} = 20 \cdot \lg \frac{\sqrt{29,9 \cdot \delta}}{1h \sqrt{29,9 \cdot \delta}} + 5 + K_{\text{отр}} + K_{\text{ф}} - K_{\text{дл}}$ (жд) $\Delta L_{\text{max}}^{\text{э}} = 20 - 24$ | |
| ШН $\Delta L^{\text{н}}$, дБА ($H \leq h_{\text{рт}}$) | При $e < 10$: $\Delta L^{\text{н}} = 10 \cdot \lg \left(3 + 60,6 \cdot \frac{1 + \left(\frac{1,65}{e}\right)^2}{\frac{1}{3} + \left(\frac{1,65}{e}\right)^2} \cdot (\delta + e) \cdot K_{\text{мет}} \right) - K_{\text{отр}} - K_{\text{дл}}$ При $e \geq 10$: $\Delta L^{\text{н}} = \Delta L^{\text{э}} + K(lge + 0,7) + K_{\text{скл}} - K_{\text{отр}} - K_{\text{дл}}$ | При $e < 10$: Требуют корректировки в части расположения условного экрана и применения $K_{\text{диф}}$ При $e \geq 10$: $\Delta L^{\text{н}} = \Delta L^{\text{э}} + K(lge + 0,7) - K_{\text{скл}} - K_{\text{дл}}$ $\Delta L_{\text{max}}^{\text{н}} = 15$ | |

Продолжение таблицы 5

| ШЗМ | Железная дорога | Автомобильная дорога | |
|--|---|--|--|
| ШВ ΔL^B , дБА | $\Delta L^B = 10 \cdot \lg(3 + 60,6 \cdot \delta \cdot$ $\cdot K_{мет}) + K_{скл} - K_{отр} - K_{дл}$; $\Delta L_{max}^B = 25$ | $\Delta L^B = 18,2 + 7,8 \cdot \lg(\delta + 0,02) - K_{скл} + K_{отр} - K_{дл}$ $\Delta L^B = 20 \cdot \lg \frac{\sqrt{14,96 \cdot \delta}}{th \sqrt{14,96 \cdot \delta}} + 5 - K_{скл} + K_{отр} - K_{дл}$ (ад) $\Delta L^B = 20 \cdot \lg \frac{\sqrt{29,9 \cdot \delta}}{th \sqrt{29,9 \cdot \delta}} + 5 - K_{скл} + K_{отр} - K_{дл}$ (жд) $\Delta L_{max}^B = 15$ | |
| ЛП $\Delta L^{ЛП}$, дБА | $\Delta L^{ЛП} = 0,06 \cdot b_{лп}$ | $\Delta L^{ЛП} = 0,08 \cdot b_{лп}$ | $\Delta L^{ЛП} = 0,06 \cdot b_{лп}$ (жд) $\Delta L^{ЛП} = 0,05 \cdot b_{лп}$ (ад) |
| ШЗ $\Delta L^{ШЗ}$, дБА | - | - | |
| примечания автора ΔL^H и $\Delta L^B (H > h_{РТ})$, $\Delta L^{ШВ+Э}$ рассчитываются по формуле для $\Delta L^Э$, $\Delta L^{ШЗ} = 0,06 \cdot b_{лп} + 5$, дБА | | | |

$\Delta L^Э$, ΔL^H , ΔL^B , $\Delta L^{ЛП}$, $\Delta L^{ШЗ}$ - эффективность ШЭ, ШН, ШВ, лесопосадки и шумозащитного озеленения соответственно.

δ - параметр, учитывающий расположение ШЗК относительно ИШ и РТ и её высоту; e - ширина верхней площадки ШН; $b_{лп}$ - ширина лесопосадки;

$K_{мет}$ - коэффициент, учитывающий влияние метеорологических условий; $K_{отр}$ - коэффициент отражения; $K_{ф}$ - коэффициент, учитывающий форму ШЭ; $K_{скл}$ - коррекция на склон; $K_{дл}$ - коррекция на длину (непротяжённой ШЗК).

Заключение

В основе выбора оптимальных ШЗК, применяемых для снижения акустического загрязнения автомобильных и железных дорог в черте городской застройки лежит учёт основных конструктивных параметров, влияющих на их акустическую эффективность: размеров, формы и материала ШЗК.

В работе проанализированы методы защиты от транспортного шума, применяемые на пути его распространения в жилую застройку. Выявлены недостатки в части эффективности шумозащитных насыпей и выемок, имеющие место в НТД.

Для вычисления эффективности ШН с шириной верхней площадки менее 10 м целесообразно использовать формулу расчёта эффективности толстого экрана с дифракцией на двух кромках, предложенную в ГОСТе [1]; а в документах, регламентирующих защиту от автотранспортного шума, рекомендуется изменить расположение условного экрана и применить $K_{диф}$. Также спорным остаётся знак перед коэффициентом $K_{скл}$, учитывающим влияние склонов ШН и ШВ на снижение шума.

Даны рекомендации по расчёту эффективности ШЗК и их комбинаций при защите высокоэтажной застройки, а также эффективности шумозащитного озеленения.

Рассмотрены зависимости эффективности ШЗК от основных конструктивных параметров. Так, установлено, что оптимальная ширина верхней площадки ШН 2-3 м, а ШВ с уклонами 1,5 и более мало эффективны и существенно уступают другим ШЗК. Отмеченные параметры ШЗК в дальнейшем будут сравниваться по стоимостным критериям и критериям, не влияющим на её акустическую эффективность.

Список литературы

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

2. ГОСТ 33325-2015 Шум. Методы расчета уровней внешнего шума, излучаемого железнодорожным транспортом (с Поправкой, с Изменением N 1).
3. ОДМ 218.2.013-2011 Методические рекомендации по защите от транспортного шума территорий, прилегающих к автомобильным дорогам.
4. СП 276.1325800.2016 Здания и территории. Правила проектирования защиты от шума транспортных потоков.
5. ОДМ 218.8.011-2018 Методические рекомендации по определению характеристик и выбору шумозащитных конструкций автомобильных дорог.
6. Куклин Д.А., Матвеев П.В. Расчётные схемы определения шума от железнодорожного транспорта. *Noise Theory and Practice*, 2016, Том 2, №1, с. 24-33.
7. ОДМ 218.011-98 Автомобильные дороги общего пользования. Методические рекомендации по озеленению автомобильных дорог.

References

1. GOST 31295.2-2005 (ISO 9613-2:1996) Noise. Attenuation of sound during propagation outdoors. Part 2. General method of calculation.
2. GOST 33325-2015 Noise. Calculation methods for external noise emitted by railway transport (as Amended, with Change N 1).
3. ODM 218.2.013-2011 Methodological recommendations for the protection of territories adjacent to highways from traffic noise (rus).
4. SP 276.1325800.2016 Buildings and territories. Protection design rules from traffic noise.
5. ODM 218.8.011-2018 Methodological recommendations for determining the characteristics and selection of noise-proof structures of highways (rus).
6. Kuklin D.A., Matveev P.V. Calculation models of noise from rail transport, *Noise Theory and Practice*, 2016, Vol. 2, №1, pp. 24-33.
7. ODM 218.011-98 Public roads. Methodological recommendations for landscaping highways.