

УДК: 628.517.2
OECD: 01.03.AA

Оптимизация комплекса мероприятий для защиты от железнодорожного шума

Борцова С.С.^{1*}, Забалканская Л.Э.²

¹ Старший преподаватель

² Доцент, к.физ.-мат.н.

^{1,2} БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург, РФ

Аннотация

Значимость решения задачи снижения шумового воздействия железнодорожного транспорта повышается с развитием транспортного комплекса Российской Федерации, которое влечёт за собой расширение зоны сверхнормативной акустической нагрузки на селитебные территории. Учитывая тот факт, что снижение транспортного шума – дорогостоящая задача, необходимо не только применять комплекс шумозащитных мероприятий, но оптимизировать его по экономическому критерию с учетом технологических и эксплуатационных показателей.

Рассматривается задача оптимизации по критерию стоимости комплекса мероприятий по защите от железнодорожного шума, включающего шумозащитные конструкции на пути распространения шума: шумозащитный экран, шумозащитные насыпи и выемки, зелёные насаждения; конструктивные улучшения железнодорожных путей; шумозащитное остекление. Обязательным условием является обеспечение акустической безопасности территорий, находящихся в зоне негативного влияния транспортной деятельности. Минимизируется функция чистой приведённой стоимости, учитывающая экономический эффект от внедрения шумозащиты, затраты в течение жизненного цикла дороги, долговечность конструкций и временную стоимость денежных средств. Предложенный подход может быть положен в основу методики выбора и оптимизации шумозащитного комплекса для автомобильных и железных дорог, а также промышленных объектов и аэропортов.

Ключевые слова: шумозащитная конструкция, шумозащитный комплекс, снижение шума железнодорожного транспорта, оптимизация шумозащитного комплекса, экономический эффект.

Optimization of a set of measures for protection against railway noise

Bortsova S.S.^{1}, Zabalkanskaya L.E.²*

¹ *Senior Lecturer*

² *Assistant professor, PhD*

^{1,2} *Baltic State Technical University 'VOENMEH', St. Petersburg, Russia*

Abstract

The importance of solving the problem of reducing the noise impact of railway transport increases with the development of the transport complex of the Russian Federation, which entails an expansion of the zone of excess acoustic load in residential areas. Considering the fact that reducing traffic noise is an expensive task, it is necessary not only to apply a set of noise protection measures, but to optimize it according to economic criteria, taking into account technological and operational indicators.

We consider the optimization problem based on the cost criterion of a set of measures to protect against railway noise, including noise protection structures along the path of noise propagation: noise protection screen, noise protection embankments and excavations, green spaces; structural improvements to railroad tracks; noise-proof glazing. A prerequisite is to ensure the acoustic safety of territories located in the zone of negative influence of transport activities. The net present value function is minimized, taking into account the economic

*E-mail: bortsova_ss@voenmeh.ru (Борцова С.С.)

effect of introducing noise protection, costs during the life cycle of the road, durability of structures and the time value of money. The proposed approach can be used the basis of the methodology for selecting and optimizing a noise protection system for roads and railways, as well as industrial facilities and airports.

Keywords: *noise protection structure, noise protection complex, railway transport noise reduction, optimization of the noise protection complex, economic effect.*

Введение

Развитие железнодорожного транспорта, предусматривающее увеличение скорости и объемов железнодорожных перевозок – стратегическое направление развития транспортной системы РФ. При этом следует обеспечить снижение негативной нагрузки на здоровье населения, в том числе и от повышенного шума. Обеспечение требований санитарного законодательства зачастую возможно лишь совместным применением нескольких шумозащитных мер.

Наиболее эффективным (до 15-20 дБА) считается его экранирование шумозащитными конструкциями (ШЗК): устройство на пути распространения звука шумозащитных экранов (ШЭ), возведение земляных шумозащитных насыпей (ШН) и выемок (ШВ). Акустическая эффективность ШЗК несколько варьируется в зависимости от расположения относительно источника шума и защищаемого объекта, высокие значения эффективности достижимы для низкоэтажной застройки и при протяжённой длине [1-3]. Располагают ШЗК, как правило, в полосе отвода дороги. Для защиты высокоэтажной застройки возможно применение комбинаций ШН+ШЭ или ШВ+ШЭ. Ключевым параметром, влияющим на акустическую эффективность ШЗК, является его высота. Эффективность разных ШЗК зависит от поглощающих свойств материалов и формы конструкций. Эффективность разных ШЗК будут отличаться поправкой на материал (поглощающие свойства) и форму. Уточнённые параметрические функции акустической эффективности ШЗК приводятся в работе [4].

Помимо ШЗК на пути распространения шума применяют зелёные насаждения (ШЗН). Эффективность ШЗН в зависимости от вида посадки даст снижение порядка 3-8 дБА. В статье [4] описаны два вида посадок, при этом необходимо учитывать, что эффективность лесополосы (ЛП) зависит от её ширины, кроме того, для шумозащитного озеленения (ШЗ) введён дополнительный коэффициент 5 дБА (это более сложная «шахматная» посадка на ширину от 25 м с добавлением высокой древесной породы).

Следующее направление - снижение шума источника: устройство вибродемпфирующих накладок на шейку рельса (ВДН), бесстыковый путь (БП), шлифование рельса (ШР) и др. Каждое из перечисленных мероприятий по экспериментальным данным даёт в среднем снижение порядка 2дБА [1, 2], однако, как правило, не применяется совместно. При проектировании дорог эти меры первостепенны.

Последнее из рассматриваемых в статье мероприятие - шумозащитное остекление (ШО). Его эффективность принято оценивать в 10 дБА для территории (до 30 дБА в помещениях).

Допустим, эффективность совместного применения некоторых мероприятий разных направлений является аддитивной функцией. Условно будем полагать применение ШЗК основными мероприятиями, остальные перечисленные выше - дополнительными. Представляется возможным подобрать некое множество возможных решений задачи обеспечения требуемого уровня акустической безопасности (вариантов шумозащитных комплексов). Учитывая, что стоимость обеспечения шумозащиты может соизмеряться со стоимостью самой дороги, задача оптимизации состоит в выборе среди множества

допустимых вариантов лучшего (оптимального) с экономической точки зрения. Подобного рода работа была проведена Н.И. Ивановым [5], который предложил алгоритм выбора и оптимизации шумозащиты при проектировании путевых и строительных машин.

В работе [6] приводятся функции стоимости ШЗК в зависимости от её основных конструктивных параметров, составленные на основании анализа строительных смет. Это капитальные вложения (К), позволяющие в реальном времени оценить как замена одного мероприятия другим отразится на полной стоимости шумозащиты.

Однако, получить представление о полной стоимости и экономической эффективности шумозащитного комплекса возможно после его всесторонней оценки на каждом этапе жизненного цикла дороги (20-30 лет). В работе [7] в качестве такого показателя предложена чистая приведённая стоимость (ЧПС). Помимо экономической оценки, ЧПС отражает и ряд эксплуатационных параметров шумозащиты, основным из которых является его долговечность (срок службы), а также учитывает затраты на проектирование, эксплуатацию, замену, ликвидацию и временную стоимость денег. С помощью ЧПС также возможен учёт дополнительных (помимо предотвращаемого ущерба) эффектов от применения конкретного мероприятия в случае его многоцелевой направленности (зелёные кредиты, вторичное использование ресурсов, предотвращение экологического ущерба и др.)

Помимо акустической и экономической эффективности при выборе шумозащитного комплекса следует учитывать его технологические и эксплуатационные характеристики. В частности, панели ШЭ изготавливаются с шагом 0,5 или 1 м (реже 0,25 м), ШН(В) и ШЗН также имеют шаг по высоте и ширине, поэтому функции эффективности и стоимости ШЗК дискретны. В зависимости от грунта устанавливается уклон ШН и ШВ, а также выбираются виды деревьев и кустарников для посадки. Ветровые и весовые нагрузки могут ограничить высоту ШЭ, а землеотвод высоту ШН. Выбор материала ШЭ должен производиться с учётом стойкости к окружающей среде. Удобство обслуживания оцениваться, принимая во внимание в т.ч. обеспечение снегопереноса и др. При этом долговечность конструкции отражена в формуле ЧПС. Таким образом, указанные характеристики налагают ограничения на вид модели оптимизации (выбор видов ШЗК, значения переменных – ключевых параметров ШЗК).

1. Математическая модель оптимизации

Шумозащитный комплекс может содержать шумозащитные мероприятия следующих 6 групп:

1. шумозащитный экран (ШЭ);
2. насыпь (ШН);
3. выемка (ШВ);
4. лесополоса (ЛП) или шумозащитное озеленение (ШЗ);
5. шлифование рельса (ШР) или вибродемпфирующие накладки (ВДН);
6. шумозащитное остекление (ШО).

Мероприятия 1-3 включают подвиды в зависимости от формы и материала, функция их акустической эффективности и стоимости зависит от высоты конструкции. Мероприятия 4-5 групп осуществляются на выбор. Стоимость и эффективность ЛП зависит от её ширины, шумозащитного озеленения дополняется стоимостью главной древесной породы (ГДП) и 5 дБА. Акустическая эффективность 5 и 6 постоянна: 2 и 10 дБА. Стоимость возрастает с увеличением числа путей (5) и этажности застройки (6).

Требуется подобрать шумозащитный комплекс, обеспечивающий требуемое снижение шума, и имеющий наименьшую стоимость. В качестве стоимости (С)

рассмотрим сразу два показателя – капитальные вложения в строительство и чистую приведённую стоимость.

Таким образом, в наиболее общем виде математическая модель выглядит следующим образом:

$$\left[\sum_{k=1}^6 [C_k(x_k)] \rightarrow \right] \min$$

При условии:

$$\Delta L_{1-3}(x_1, x_2, x_3) + \Delta L_4(x_4) + \Delta L_{5,6}(x_1, x_2, x_3) \geq \Delta L_{\text{тр}}$$

$\Delta L_{1-3}(x_1, x_2, x_3)$ может быть как функцией только одной переменной – $\Delta L_{1-3}(x_k)$, где $k = 1, 2, 3$, так и функцией 2-х (реже 3-х) переменных, x – ключевой параметр ШЗК.

Множества значений переменных:

x_1 - принимает значения от минимального значения (mm_1) до максимального (mx_1) с некоторым шагом h (т.е., например, $x_1^1 = 3$; $x_1^i = x_1^{i-1} + h$) т.е. являются дискретными;

x_2 принимают значения из отрезка $[mm_2, mx_2]$, x_3 из $[mm_3, mx_3]$;

x_4 и x_5 могут принимать значения 0 или 1 или 2 (0 - в случае, когда эта мера не используется, 1 и 2 соответствуют 2-м различным вариантам);

x_6 принимает значения 0 и 1 (0 - в случае, когда эта мера не используется, 1- когда используется).

Функции эффективности имеют следующий вид:

$$\Delta L_{1-3}(x_1, x_2, x_3) = \min(\Delta L_{1-3}^p(x_1, x_2, x_3); \Delta L_{\max})$$

$$\Delta L_4(x_4) = \min(\Delta L_4^p(x_4); \Delta L_{\max})$$

$$\Delta L_5 = 2 \text{ дБА}, \quad \Delta L_6 = 10 \text{ дБА}$$

где $\Delta L_{1-3}^p(x_1, x_2, x_3)$ рассчитывается по формулам, включающим высоту соответствующих шумозащитных сооружений, $\Delta L_{\max} = 20 + K_{\text{ф}} + K_{\text{скл}}$, $K_{\text{ф}}$ и $K_{\text{скл}}$ - поправки на форму и склон, дБА, $\Delta L_4^p(x_4)$ определяется шириной посадки, максимальная (и ширина, и эффективность) рассчитывается или задаётся проектировщиком, ΔL_{5-6} постоянны.

Предположим, что очерёдность выбора соответствующих шумозащитных мер не устанавливается.

В этом случае, т.к. в реальных расчётах высота насыпи и выемки принимают дискретные значения с некоторым шагом, задачу можно свести к задаче целочисленного программирования, приписав каждому значению высоты шумозащитного сооружения порядковый номер.

Минимальное значение высоты ШЗК принимается за 1, минимальное + шаг - за 2 и т.д. В результате получаем набор целых чисел, каждому из которых соответствует определённая высота ШЗК, при этом, если данная ШЗК не применяется, то соответствующая переменная равна 0.

Задача целочисленного программирования в этом случае записывается следующим образом:

$$\left[\sum_{k=1}^6 [C_k(x_k)] \rightarrow \right] \min$$

$$\Delta L_{1-3}(x_1, x_2, x_3) + \Delta L_4(x_4) + \Delta L_5(x_5) + \Delta L_6(x_6) \geq \Delta L_{\text{тр}}$$

$0 \leq x_k \leq b_k$, k - целое и меняется от 1 до 6,

$$b_k = \frac{h_k^{max} - h_k^{min}}{t_k} + 1$$

для $k = 1, 2$ и 3 , где t_k - шаг изменения высоты соответствующей ШЗК,

$$b_4 = 2, b_5 = 2, b_6 = 1$$

То есть при этом каждому натуральному значению первых 3-х переменных соответствует своя высота ШЗК. Например, для ШЭ:

h_1^1 - минимальная возможная высота экрана соответствует $x_1^1 = 1$;

для целых i от 2 до $b_k h_1^i = h_1^{i-1} + t_1$ соответствует $x_1^i = i$,

$$x_2^1 = 3; x_1^j = x_1^{j-1} + h_2$$

$$x_1^1 = 3; x_1^i = x_1^{i-1} + h_1$$

для насыпи и выемки аналогично.

При этом при вычислении функции эффективности в соответствующие формулы подставляем высоту ШЗК, соответствующую выбранному значению переменной x_k .

Данная задача является NP-трудной, т.е. решается полным перебором вариантов. Однако учитывая, что оптимизируемая функция является аддитивной, для решения этой задачи может быть применено динамическое программирование, которое разбивает задачу на ряд подзадач, причём найденное решение является оптимальным на данном шаге. Задача является обратной к стандартной задаче о рюкзаке, т.е. задачи поиска максимума функции стоимости, при условии, что вес не превосходит заранее заданного уровня.

Модифицируем алгоритм для рассматриваемой задачи. В качестве начальной точки возьмём максимально возможное расчётное значение эффективности (аналог веса в стандартной задаче). По условию это состояние обеспечивает заданную эффективность, значит множество решений не пусто. (Если данный полный набор не обеспечивает необходимую эффективность, задача решений не имеет). В качестве дальнейших шагов заменяем максимальное значение соответствующей переменной на меньшее, последовательно снижая эффективность до заданного уровня.

Таким образом, состояниями системы будут значения эффективности ξ : $\Delta L_{max}, \Delta L_{max} - t_1, \Delta L_{max} - t_2, \dots, \Delta L_{тр}$ где t_j - изменения эффективности. Тогда целевая функция $F_i(\xi)$ - минимальная стоимость мер, обеспечивающих эффективность ξ , при условии, что для рассматриваемых i переменных выбраны значения, обеспечивающие эту минимальную эффективность.

Однако, учитывая тот факт, что при решении задач для переменных с четвёртой по шестую не только функция стоимости, но и функция эффективности является аддитивной, алгоритм может быть модернизирован. Начинаем решение задачи именно с этих переменных.

2. Алгоритм решения задачи

Решение задачи можно разбить на несколько этапов.

1) Рассмотрим переменные с 4 по 6 и решим методом динамического программирования серию задач вида:

$$\left(\sum_{i=0}^2 C_{6-i} \right) \rightarrow \min$$

При $\Delta L(x_{6-i}, \dots, x_6) \geq \xi$ для всех возможных значений ξ . При этом в качестве максимальной эффективности рассмотрим наибольшую возможную суммарную эффективность мер 4-6 и далее будем снижать эффективность в соответствии с тем, какую меру мы исключаем из использования или заменяем на другую (шумозащитное озеленение заменяем на лесополосу).

$F_i(\xi)$ – минимум стоимости по всем значениям i переменных, при которых уровень эффективности остаётся выше ξ .

Если таких значений нет, то $F_i(\xi) = F_{i-1}(\xi)$. При $\xi = \Delta L_{max}$, т.е. в начальной точке имеем сумму стоимостей, соответствующих выбору всех мер. $F_0(\xi) = F_i(\Delta L_{max})$. Если мы не заменяем никакое значение переменной, т.е. $i = 0$, то стоимость тоже остаётся наивысшей.

Таким образом, уравнение Бэлмана в данном случае выглядит следующим образом:

$$F_i(\xi) = \min\{F_{i-1}(\xi - \Delta L_{max}(x_{6-i}, \dots, x_6) + \Delta L(x_{6-i}, \dots, x_6) - c_{6-i}^{max}(x_{6-i}) + c_i(x_{6-i}))\}$$
 при $\xi \geq \Delta L_{max}(x_{6-i}, \dots, x_6) - \Delta L(x_{6-i}, \dots, x_6)$

$$F_i(\xi) = F_{i-1}(\xi) \text{ при } \xi < \Delta L_{max}(x_{6-i}, \dots, x_6) - \Delta L(x_{6-i}, \dots, x_6)$$

В результате мы получаем таблицу, элементами которой являются значения $F_i(\xi)$, где i соответствует номеру строки, а номер столбца определяется по $\xi = \Delta L_{max} - t_j$. Таблица заполняется по строкам с учётом соответствующего значения в предыдущей строке. Необходимо также запоминать какой именно набор значений i переменных обеспечивает стоимость, стоящую в соответствующей ячейке. Решение задачи – это множество наборов значений переменных, соответствующих элементам матрицы $F_4(\xi)$, где ξ -возможное значение эффективности.

2) Рассматриваем оптимальное сочетание мер 4-6 с ШЭ, учитывая его возможные значения (варианты).

В данном случае задача сводится к отысканию такой минимальной высоты шумозащитного сооружения, которая соответствует неравенствам $\Delta L_{тр} - \Delta L_{1-3}(x_1) - \Delta L_{4-6} > 0$, где в качестве обеспечивающих эффективность ΔL_{4-6} рассматриваются возможные оптимальные сочетания мер с 4 по 6.

Таким образом, мы получаем таблицу возможных сочетаний мер 4-6 с ШЭ, где высота экрана подбирается к каждому эффективному сочетанию мер. Пример таблицы динамического программирования для мер с 4 по 6 приведён в разделе 3.

В качестве высоты экрана соответствующего вида берём минимальное значение, эффективность которого удовлетворяет неравенству. Если значение меньше минимального или больше максимально допустимого, то такой вариант не рассматривается. Все получившиеся варианты сочетаний сравниваем по стоимости, выбирая оптимальный по ЧПС.

Аналогично решаем задачу для насыпи и выемки.

3) Далее при необходимости рассматриваем комбинации ШЗК: ШН+ШЭ, ШВ+ШЭ в сочетании с дополнительными мерами 4-6.

Для поиска оптимального сочетания мер решаем серию задач, перебирая возможные значения высоты экрана определённого вида, подбираем высоту насыпи определённого вида, которые вместе с рассматриваемым сочетанием дополнительных мер обеспечивают заданную эффективность. Т.е. для каждой высоты экрана ищем минимальную высоту насыпи так, чтобы эффективность шумозащитного комплекса удовлетворяла неравенству: $\Delta L_{тр} - \Delta L_{1-3}(x_1, x_2) - \Delta L_{4-6} < 0$ (ищем первое значение, где разность становится отрицательной) для сочетания насыпь-экран и $\Delta L_{тр} - \Delta L_{1-3}(x_1, x_3) - \Delta L_{4-6} < 0$ для сочетания выемка-экран.

Таким образом, получаем сводную таблицу 1.

Таблица 1

Матрица вариантов шумозащиты

	Вариант 1	Вариант 2	...
Высота ШЭ	0/высота ШЭ	...	
Высота ШН	0/высота ШН	...	
Глубина ШВ	0/глубина ШВ		
ЛП или ШЗ	0/1/2		
ВДН или ШР	0/1/2		
ШО	0/1		

Заметим, что в данном случае имеет место задача отыскания корней функции одной переменной, т.е. высота насыпи и глубина выемки могут принимать любое, а не только дискретное значение из заданного диапазона.

Таким образом, данная модификация алгоритма позволяет сначала решить задачу целочисленного программирования, а потом применить результаты её решения к отысканию оптимальных сочетаний ШЗК, учитывая, что высота насыпи и глубина выемки принимает непрерывные значения.

3. Пример решения задачи

На примере защиты здания высотой 15 м на удалении 60 м от железнодорожных путей подберем оптимальный с экономической точки зрения шумозащитный комплекс, включающий перечисленные в разделе 1 мероприятия (1-6).

Требуемое снижение шума: $\Delta L_{\text{тр}}=24$ дБА

Решаем задачу, начиная с дополнительных мер защиты (4-6). Они должны обеспечить снижение выше значения $\Delta L_{\text{тр}} - \Delta L_{(1-3)\text{max}}=2,5$ дБ

Эффективность ШЗН рассчитана согласно [4]. Ширина посадки – 30 м.

Функция стоимости дополнительных мер получена из смет на строительство аналогично [5]. Чистая приведённая стоимость рассчитана по формулам [6].

Решая задачу динамического программирования для дополнительных мер в табл. 2 получены сочетания их акустической эффективности (ΔL), величины капитальных вложений (К) и чистой приведённой стоимости (ЧПС).

Таблица 2

Экономическая и акустическая эффективность дополнительных мер защиты

	Мероприятие ($x_4 - x_5 - x_6$)	ΔL , дБА	К, у.е.	ЧПС, у.е.
1	ШЗ+ШО+ВДН (2-1-1)	18,8	16391,2	38404,2
2	ШЗ+ШО (2-0-1)	16,8	13891,2	28904,2
3	ЛП+ШО+ВДН (1-1-1)	13,8	12774,0	26077,7
4	ШО+ВДН (0-1-1)	12,0	10500,0	21087,4
5	ШО+ЛП (1-0-1)	11,8	10274,0	16577,7
6	ШЗ+ВДН (2-1-0)	8,8	8391,2	26816,8
7	ШО (0-0-1)	10,0	8000,0	11587,4
8	ШЗ (2-0-0)	6,8	5891,2	17316,8
9	ЛП+ВДН (1-1-0)	3,8	4774,0	14990,3
10	ВДН (0-1-0)	2,0	2500,0	9500,0
11	ЛП (1-0-0)	1,8	2274,0	4990,3

Варианты 10 и 11 исключаются из рассмотрения как не обеспечивающие требуемое снижение шума всем комплексом мер. Мероприятия 6, 8 и 9 не являются оптимальными по ЧПС, т.к. для достигаемого уровня эффективности существуют более дешёвые. В случаях, когда наличие зелёных насаждений является обязательным требованием, необходимо исключить из рассмотрения варианты мероприятий их не содержащие и найти оптимальные сочетания оставшихся мер. По результатам динамического программирования с оптимизацией по ЧПС случаев с обязательным и не обязательным наличием зелёных насаждений имеем: при обязательных насаждениях вместо ШЗ+ВДН (6) и ШЗ (8) используем ШО+ЛП (5), т.к. при большей эффективности этот вариант имеет меньшую ЧПС. При отсутствии требований по насаждениям варианты ШЗ+ВДН (6), ШЗ (8) и ЛП+ВДН (9) не рассматриваются, т.к. ШО (7) при большей эффективности имеет меньшее значение ЧПС.

В качестве ШЗК применяем меры (1, 2) и комбинации (1-2, 1-3) протяжённой длины. Рассматриваемые ШЗК и функция их акустической эффективности:

Эффективность шумозащитных экранов (ШЭ), ΔL_1 , дБА

1) Экран прямой поглощающий (нержав. сталь, оцинкован. сталь, дерево), ШЭпп

$$\Delta L_{\text{пп}}^{\text{э}} = 10 \cdot \lg \left(3 + 58,8 \cdot (\sqrt{64 + (H - 0,5)^2} + \sqrt{3136 + (15 - H)^2} - 65,6) \right)$$

Возможный диапазон высот 3..8 м, шаг 0,5 м, $\Delta L_{\text{max}}=20$ дБА

2) Экран прямой отражающий (бетон, прозрачный пластик), ШЭпо

$$\Delta L_{\text{по}}^{\text{э}} = 10 \cdot \lg \left(3 + 58,8 \cdot (\sqrt{64 + (H - 0,5)^2} + \sqrt{3136 + (15 - H)^2} - 65,6) \right) - 3$$

Возможный диапазон высот 3,5..9 м, шаг 0,5 м, $\Delta L_{\text{max}}=20$ дБА

3) Экран Г-образный поглощающий, ШЭфп

$$\Delta L_{\text{фп}}^{\text{э}} = 10 \cdot \lg \left(3 + 58,8 \cdot (\sqrt{64 + (H - 0,5)^2} + \sqrt{3136 + (15 - H)^2} - 65,6) \right) + 1,5$$

Возможный диапазон высот 3..8 м, шаг 0,5 м, $\Delta L_{\text{max}}=21,5$ дБА

4) Экран Г-образный отражающий, ШЭфо

$$\Delta L_{\text{фо}}^{\text{э}} = 10 \cdot \lg \left(3 + 58,8 \cdot (\sqrt{64 + (H - 0,5)^2} + \sqrt{3136 + (15 - H)^2} - 65,6) \right) - 1,5$$

Возможный диапазон высот 3..9 м, шаг 0,5 м, $\Delta L_{max}=21,5$ дБА

Эффективность шумозащитных насыпей (ШН), ΔL_2 , дБА:

5) Грунтовая насыпь уклоном 0,5 с площадкой 2 м, ШН (0,5; 2)

$$\Delta L_{0,5}^{шн} = 10 \cdot \lg \left(3 + 58,8 \cdot (\sqrt{(8 + 0,5 \cdot H)^2 + (H - 0,5)^2} + \sqrt{(56 - 0,5 \cdot H)^2 + (15 - H)^2} - 65,6) \right)$$

6) Грунтовая насыпь уклоном 1 с площадкой 2 м, ШН (1; 2)

$$\Delta L_1^{шн} = 10 \cdot \lg \left(3 + 58,8 \cdot (\sqrt{(8 + H)^2 + (H - 0,5)^2} + \sqrt{(56 - H)^2 + (15 - H)^2} - 65,6) \right)$$

Возможный диапазон высот 3..9 м, шаг 0,1 м, $\Delta L_{max}=20$ дБА

Эффективность комбинированных ШЗК, ΔL_{1-3} , дБА:

7) Грунтовая насыпь (1; 2) + экран прямой поглощающий, ШН (1; 2) + ШЭпп

$$\Delta L^{ш+э} = 10 \cdot \lg \left(3 + 58,8 \cdot (\sqrt{(9 + H^H)^2 + (H^H + H^Э - 0,5)^2} + \sqrt{(55 - H^H)^2 + (15 - (H^H + H^Э))^2} - 65,6) \right)$$

8) Грунтовая насыпь (0,5; 2) + экран прямой поглощающий ШН (0,5; 2) + ШЭпп

$$\Delta L^{ш+э} = 10 \cdot \lg \left(3 + 58,8 \cdot (\sqrt{(9 + 0,5 \cdot H^H)^2 + (H^H + H^Э - 0,5)^2} + \sqrt{(55 - 0,5 \cdot H^H)^2 + (15 - (H^H + H^Э))^2} - 65,6) \right)$$

Высота насыпи 1,8..6 м, шаг 0,1 м, экрана 2..5 м, шаг 0,5 м, $\Delta L_{max}=20$ дБА

9) Грунтовая насыпь (1; 2) + экран Г-образный поглощающий, ШН (1; 2) + ШЭфп

$$\Delta L^{ш+э''} = 10 \cdot \lg \left(3 + 58,8 \cdot (\sqrt{(9 + H^H)^2 + (H^H + H^Э - 0,5)^2} + \sqrt{(55 - H^H)^2 + (15 - (H^H + H^Э))^2} - 65,6) \right) + 1,5$$

10) Грунтовая насыпь (0,5; 2) + экран Г-образный поглощающий, ШН (0,5; 2) + ШЭфп

$$\Delta L^{ш+э''} = 10 \cdot \lg \left(3 + 58,8 \cdot (\sqrt{(9 + 0,5 \cdot H^H)^2 + (H^H + H^Э - 0,5)^2} + \sqrt{(55 - 0,5 \cdot H^H)^2 + (15 - (H^H + H^Э))^2} - 65,6) \right) + 1,5$$

Высота насыпи 1,8..6 м, шаг 0,1 м, экрана 2..5 м, шаг 0,5 м, $\Delta L_{max}=21,5$ дБА

11) Грунтовая выемка уклоном 1,5 с площадкой 17 м + экран прямой поглощающий, ШВ (1,5; 17) + ШЭпп

$$\Delta L^{в+э} = 10 \cdot \lg \left(3 + 58,8 \cdot (\sqrt{(9 + 1,5 \cdot H^B)^2 + (H^B + H^Э - 0,5)^2} + \sqrt{(55 - 1,5 \cdot H^B)^2 + (15 - H^Э)^2} - \sqrt{4096 + (14,5 + H^B)^2}) \right)$$

12) Грунтовая выемка уклоном 1 с площадкой 17 м + экран прямой поглощающий, ШВ (1; 17) + ШЭпп

$$\Delta L^{в+э} = 10 \cdot \lg \left(3 + 58,8 \cdot (\sqrt{(9 + H^B)^2 + (H^B + H^Э - 0,5)^2} + \sqrt{(55 - H^B)^2 + (15 - H^Э)^2} - \sqrt{4096 + (14,5 + H^B)^2}) \right)$$

Высота выемки 1,7..9 м, шаг 0,1 м, экрана 2..7 м, шаг 0,5 м, $\Delta L_{max}=20$ дБА

13) Грунтовая выемка (1,5; 17) + экран Г-образный поглощающий, ШВ (1,5; 17) + ШЭфп

$$\Delta L^{B+\text{Э}^*} = 10 \cdot \lg(3 + 58,8 \cdot (\sqrt{(9 + 1,5 \cdot H^B)^2 + (H^B + H^{\text{Э}} - 0,5)^2} + \sqrt{(55 - 1,5 \cdot H^B)^2 + (15 - H^{\text{Э}})^2} - \sqrt{4096 + (14,5 + H^B)^2})) + 1,5$$

14) Грунтовая выемка (1; 17) + экран Г-образный поглощающий, ШВ (1; 17) + ШЭшп

$$\Delta L^{B+\text{Э}} = 10 \cdot \lg(3 + 58,8 \cdot (\sqrt{(9 + H^B)^2 + (H^B + H^{\text{Э}} - 0,5)^2} + \sqrt{(55 - H^B)^2 + (15 - H^{\text{Э}})^2} - \sqrt{4096 + (14,5 + H^B)^2}))$$

Высота выемки 1,7..9 м, шаг 0,1 м, экрана 2.7 м, шаг 0,5 м, $\Delta L_{max}=21,5$ дБА

Рассматривая все возможные варианты сочетаний ШЗК с оптимальными по стоимости дополнительными мерами (без обязательных ШЗН), были получены необходимые высоты как отдельных конструкций (1, 2), так и комбинаций ШЗК (1-2 и 1-3). Наглядно увидеть полученные результаты определения высот экранов и насыпей можно с помощью рисунка 1. От проекции точек пересечения на горизонтальную ось двигаемся влево к ближайшему шагу по высоте ШЗК.

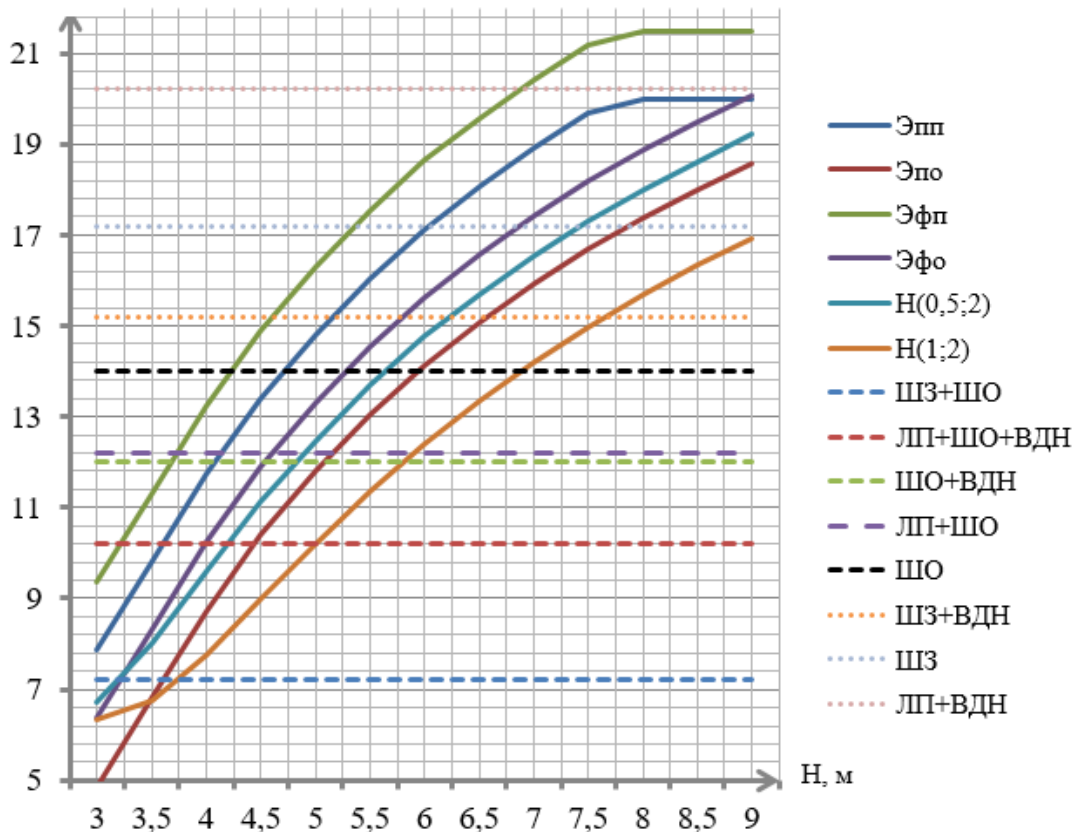


Рис. 1. Определение оптимальной высоты ШЗК

При подборе комбинаций (1-2 и 1-3) высота ШЭ бралась от минимальной до высоты на шаг ниже, полученной на предыдущем этапе.

Функции капитальных вложений и чистой приведённой стоимости были получены согласно работам [5, 6]. Промежуточным этапом была проведена оптимизация ШЭ. Выбор экономически оптимального экрана произведён по величине его приведённой

стоимости: минимальная она у деревянного поглощающего и бетонного отражающего экранов. Аналогично и для г-образных экранов из тех же материалов.

Стоимость шумозащитных комплексов и найденные высоты ШЗК представлена в таблицах 3-5 (верхняя строка – высота ШЗК, м, средняя - капитальные вложения, у.е., нижняя – чистая приведённая стоимость, у.е.):

Таблица 3

Стоимость шумозащитного комплекса с отдельными ШЗК

Дополнительные мероприятия	Высота ШЗК (Н, м) и стоимость всего комплекса (К и ЧПС, у.е.)					
	ШЭпп	ШЭпо	ШЭфп	ШЭфо	ШН (0,5; 2)	ШН (1; 2)
ШО	5	6	4,5	5,5	5,8	7
	15247,4	16548,3	15189,9	26480,1	12440,4	14064,4
	25820,6	22111,0	26013,7	41097,2	18242,6	18602,5
ШО+ЛП	4,5	5,5	4	5	4,9	5,9
	16945,7	18214,2	16830,6	23931,8	13658,0	14840,3
	29680,3	26352,7	29733,3	42039,0	21649,6	21859,9
ШО+ВДН	4,5	5,5	4	5	4,8	5,8
	-	-	-	-	13775,1	14940,4
	-	-	-	-	25996,0	26223,9
ЛП+ШО+ВДН	4	4,5	3,5	4	4,2	5
	18870,0	18610,0	18697,3	23998,3	15432,1	16268,5
	38049,7	33262,3	37962,6	47002,4	30061,6	30120,1
ШЗ+ШО	3	4	-	3,5	3,2	3,8
	18835,8	19217,8	-	23898,8	15657,6	16172,1
	38614,9	35461,7	-	47560,7	31551,6	31542,7

Таблица 4

Стоимость шумозащитного комплекса с комбинированной ШЗК(ШН+ШЭ)

Доп. меро- приятия и вид ШЭ	Высота ШН и ШЭ (Н, м) и стоимость всего комплекса (К и ЧПС, у.е.)							
	ШН (1; 2)				ШН (0,5; 2)			
ШЭфп	2	2,5	3	3,5	2	2,5	3	3,5
ШО	3,7	3,0	2,2	-	3,0	2,4	1,9	-
	16875,2	16926,2	16996,6	-	16292,9	16493,8	16813,7	-
	25888,7	27119,0	28371,7	-	25765,2	27021,1	28455,4	-
ШО+ЛП	2,9	2,2	-	-	2,4	1,8	-	-
	18490,5	18637,3	-	-	18134,5	22285,6	-	-
	30117,1	31458,1	-	-	30107,5	31455,6	-	-
ШО +ВДН	2,8	2,1	-	-	2,3	-	-	-
	18641,9	18800,6	-	-	17989,6	-	-	-
	34540,4	35895,4	-	-	34518,1	-	-	-
ЛП+ШО +ВДН	2,1	-	-	-	1,8	-	-	-
	20441,4	-	-	-	24152,3	-	-	-
	38981,8	-	-	-	39051,7	-	-	-

Продолжение таблицы 4

ШЭпп	2	2,5	3	3,5	2	2,5	3	3,5
ШО	4,5	3,8	3,0	2,3	3,7	3,1	2,5	1,9
	17412,9	17310,6	17214,0	17291,2	16644,9	16716,4	16849,4	17044,0
	25986,7	26908,8	27837,4	28967,0	25847,6	26798,1	27841,1	28976,2
ШО+ЛП	3,5	2,8	2,1	-	2,9	2,3	-	-
	18744,0	18761,3	18862,5	-	18260,3	18413,8	-	-
	29886,1	31592,5	32104,1	-	29850,8	30924,4	-	-
ЛП+ШО +ВДН	2,6	2	-	-	2,2	-	-	-
	20541,5	20725,8	-	-	20273,8	-	-	-
	38573,6	39827,3	-	-	38621,5	-	-	-

Таблица 5

Стоимость шумозащитного комплекса с комбинированной ШЗК(ШВ+ШЭ)

Доп. мер-ия и вид ШЭ	Высота ШВ и ШЭ (Н, м) и стоимость всего комплекса (К и ЧПС, у.е.)										
	ШВ (1,5;17)						ШВ(1;17)				
ШЭ _{Фп}	2	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	2	2,5	3,0	3,5	4,0
ШО	-	-	6,3	3,7	1,9	-	5,8	4,6	3,4	2,3	-
	-	-	18496,2	18183,1	18259,7	-	17034,6	9907,5	17451,4	17743,2	-
	-	-	30163,6	30951,4	32199,1	-	27226,2	28400,6	29634,1	30975,4	-
ШО +ЛП	-	5,4	3,3	1,7	-	-	4,4	3,3	2,2	-	-
	-	19790,3	27317,0	19843,6	-	-	18795,5	19059,9	19354,3	-	-
	-	32841,2	33883,8	35218,3	-	-	31371,2	32667,3	34013,1	-	-
ШО +ВДН	-	5,1	3,1	-	-	-	4,2	3,1	2,1	-	-
	-	19905,2	19855,3	-	-	-	18952,2	19222,0	19551,0	-	-
	-	37219,9	38318,2	-	-	-	35766,7	37071,9	38474,5	-	-
ЛП +ШО +ВДН	4,9	3,1	1,7	-	-	-	3,2	2,2	-	-	-
	21473,2	21496,0	21710,3	-	-	-	20894,5	21221,1	-	-	-
	35230,2	41404,6	42814,4	-	-	-	40210,6	41609,2	-	-	-
ШЗ +ШО	2,3	-	-	-	-	-	1,7	-	-	-	-
	21734,5	-	-	-	-	-	21561,0	-	-	-	-
	42037,8	-	-	-	-	-	42294,5	-	-	-	-

Продолжение таблицы 5

ШЭ _{пн}	2	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	2	2,5	3,0	3,5	4,0
ШО	-	-	-	7,6	4,1	2,0	7,6	6,1	4,8	3,5	2,4
	-	-	-	19262,9	18490,4	18921,8	17535,8	17496,3	17584,3	17714,2	17945,7
	-	-	-	31316,8	31433,5	34137,0	27640,7	28333,8	29236,5	30208,5	31347,8
ШО +ЛП	-	-	5,5	3,3	-	-	5,6	4,3	3,2	2,1	-
	-	-	20115,7	19923,4	-	-	19002,0	19106,1	19315,7	19555,3	-
	-	-	33603,8	34404,6	-	-	31300,4	32229,9	33332,9	34485,6	-
ШО +ВДН	-	-	5,1	3,0	-	-	5,4	4,2	3,0	2	-
	-	-	20193,1	20054,0	-	-	19152,7	19297,6	19478,3	19752,3	-
	-	-	33428,6	38801,8	-	-	35686,0	36682,7	37738,3	38947,5	-
ЛП +ШО +ВДН	7,6	4,7	2,8	-	-	-	4,0	3,0	1,9	-	-
	22309,8	21746,8	21690,0	-	-	-	20927,6	21176,6	21421,7	-	-
	40688,1	41051,8	42012,3	-	-	-	39854,0	41022,3	42184,0	-	-
ШЗ +ШО	3,5	2,0	-	-	-	-	2,4	1,5	-	-	-
	21878,3	21992,0	-	-	-	-	21534,1	-	-	-	-
	41688,5	42850,2	-	-	-	-	41839,2	-	-	-	-

Таким образом, полученные следующие результаты. Без обязательного ШЗН оптимальным является шумозащитный комплекс: ШО+ШН (0,5;2) 5,8 м (18242,6 у.е.) Возможен вариант ШО + ШН (1;2) 7 м (18602,5 у.е.). В случае предпочтения ШЭ оптимальным является вариант: ШО + ШЭпо(бетон) 6 м (22111,0 у.е.). В качестве дополнительного шумозащитного мероприятия целесообразно применение ШО. Однако следует учесть, что невозможно полностью оценить эксплуатационные затраты остекления, они переложены на собственников жилья. Его применение с комбинациями ШЗК выше. Так, вариант ШО+ШН(0,5;2) 3 м + ШЭфп 2 м обойдётся в 25765,2 у.е., ШО+ ШН(1;2) 3,7 м + ШЭфп 2 м в 25888,7 у.е., а ШО + ШВ(1;17) 5,8 м + ШЭфп 2 м составит 27226,2 у.е. Это является следствием выбора фундамента ШЭ. Также отметим, что вариант с выемкой дорожки только для защиты застройки, находящейся с одной стороны от дороги.

Заключение

Развитие транспортной инфраструктуры и увеличение интенсивности транспортной деятельности создаст ещё большую акустическую нагрузку на жилые территории. Снижение этой нагрузки обеспечивается только комплексом шумозащитных мероприятий, стоимость которых соизмерима со стоимостью дороги, поэтому актуальна задача его оптимизации по экономическому критерию.

Рассмотрена задача оптимизации комплекса мероприятий для защиты от железнодорожного шума, приводится алгоритм, позволяющий проектировщику выбрать оптимальный вариант шумозащиты.

На начальном этапе методом динамического программирования определяются оптимальные меры или сочетания мер дополнительной защиты (остекление, конструктивное улучшение путей, зелёные насаждения). Далее оптимизируются однотипные шумозащитные конструкции (например, определяется оптимальный по ЧПС материал ШЭ). На следующем этапе к каждому эффективному сочетанию дополнительных мер подбирается необходимая минимальная высота ШЗК, обеспечивающая требуемое снижение шума. Если значение меньше минимального или больше максимально допустимого, то такой вариант не рассматривается. Составляется

матрица вариантов решений (её пример в таблице 3). Для поиска оптимального сочетания мер с применением комбинаций ШЗК (ШН+ШЭ, ШВ+ШЭ) решается серия задач: перебирая возможные значения высоты экрана определённого вида (от минимальной до высоты на шаг ниже полученной на предыдущем этапе), подбирается высота насыпи (выемки) определённого вида, которые вместе с рассматриваемым сочетанием дополнительных мер обеспечивают заданную эффективность. Т.е. сначала решается задача целочисленного программирования, затем результаты её решения применяются к отысканию оптимальных сочетаний ШЗК. Формируются таблицы результатов (матрица): таблицы 4-5.

При оптимизации только по экономическому критерию, из матриц вариантов выбирается комплекс мероприятий с минимальным значением ЧПС. В случае, когда выбор производится с учётом технологических и эксплуатационных показателей, не влияющих на акустическую эффективность ШЗК, варианты с близкими к минимальному значениям ЧПС сравниваются по выбранным ЛПР критериям (например, по бально-рейтинговой системе).

Список литературы

1. Буторина М.В., Куклин Д.А., Иванов Н.И. Решение проблемы снижения шума на железных дорогах Российской Федерации // VI Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Защита от повышенного шума и вибрации» : сб. трудов — Санкт-Петербург : БГТУ, 2017. — С. 79-92.
2. Иванов Н.И., Куклин Д.А., Матвеев П.В., Олейников А.Ю. Снижение шума подвижного состава железнодорожного транспорта в источнике образования и на пути распространения // Защита от повышенного шума и вибрации: доклады V Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (Россия, Санкт-Петербург, 18-20 марта 2015 г.) / под ред. Н.И. Иванова – СанктПетербург: Изд-во «Айсинг» – 2015. – С. 125–144.
3. Куклин Д.А., Матвеев П.В. Расчётные схемы определения шума от железнодорожного транспорта, "Noise Theory and Praticce", Том 2 №1 (I, 2016), Стр. 24-33
4. Борцова С.С. Выбор оптимальной шумозащитной конструкции по параметрам, влияющим на акустическую эффективность, "NoiseTheoryandPraticce", Том 7 №5 (V, 2021), Стр. 48-65
5. Иванов Н.И. Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом [Текст] : учебник для вузов / Н. И. Иванов. - Изд. 4-е, перераб. и доп. - М. : Логос, 2015. - 431 с. : ISBN 978-5-98704-659-3
6. Борцова С.С. Стоимостная оценка шумозащитной конструкции, "NoiseTheoryandPraticce", Том 8 № 1 (I, 2022), с. 61-71.
7. Борцова С.С. Экономическая эффективность шумозащитных конструкций, "NoiseTheoryandPraticce", Том 8 №2 (II, 2022), с. 45-55

References

1. Butorina M.V., Kuklin D.A., Ivanov N.I Solving the problem of noise reduction on the railways of the Russian Federation // VI All-Russian research to practice conference with international participation «Protection against excessive noise and vibration» – St. Petersburg: BSTU, 2017. – P. 79-92.

2. Ivanov N.I., Kuklin D.A., Matveev P.V., Oleinikov A.Yu., Noise reduction of rolling stock of railway transport at the source of formation and on the path of propagation // Protection against excessive noise and vibration: reports of V All-Russian research to practice conference with international participation – St. Petersburg: ‘Aising’. – 2015. – P. 125-144.

3. Kuklin D.A., Matveev P.V. Calculation models of noise from rail transport. "Noise Theory and Praticce", Vol. 2 No 1 (I, 2016), pp. 24-33.

4. Bortsova S.S. Selection of the optimal noise barrier according to parameters affecting acoustic efficiency, "Noise Theory and Praticce", Vol. 7 No 5 (V, 2021), pp. 48-65

5. Ivanov N.I. Engineering acoustics. Theory and practice of noise control [Text]: textbook for universities / N.I. Ivanov. – 4th edition. Moscow: ‘Logos’. – 2015. – 431 p. ISBN 978-5-98704-659-3

6. Bortsova S.S. Cost estimation of noise protection structures, "NoiseTheoryandPraticce", Vol. 8 No 1 (I, 2022), pp. 61-71

7. Bortsova S.S. Economic efficiency of the noise protection, "NoiseTheoryandPraticce", Vol. 8 No 2(II, 2022), pp. 45-55