

Расчётные схемы определения шума от железнодорожного транспорта

Куклин Д.А.¹, Матвеев П.В.²

¹Доцент, к.т.н., ²Ст. преподаватель, к.т.н.

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

Аннотация

В статье предлагаются методы расчета шума, создаваемого железнодорожным транспортом, на территории, прилегающей к железнодорожным путям, при наличии различных средств защиты от шума на пути распространения (ровный участок, выемка, насыпь, ближнее средство звукоизоляции). Шумовые характеристики в расчётной точке определяются в зависимости от типа шумозащитного устройства и длины поезда. Расчет шума производится, исходя из предположения, что каждый вагон имеет одинаковую акустическую мощность в составе таких же вагонов. Шум в расчётной точке равен сумме интенсивностей дошедших до расчётной точки от каждого вагона.

Ключевые слова: методы расчёта шума, железнодорожный транспорт, типы поездов, источник шума, уровень звука, максимальный уровень звука.

Calculation models of noise from rail transport

Kuklin D.A.¹, Matveev P.V.²

²Associate professor, ²Senior lecturer

^{1, 2} Baltic State Technical University «VOENMEH» named after D.F. Ustinov, Saint-Petersburg, Russia

Abstract

This publication offers methods of calculation of noise generated by rail, adjacent to the railroad tracks, in the presence of various means of protection against noise in the direction of spread (level stretch, cutting, embankment, low barriers). Noise characteristics in the calculation point are determined depending on the type of sound insulating device and the length of the train. The noise calculation is made, assuming that each car has the same acoustic power in the composition of these same cars. The noise in the calculation point is equal to the sum of the intensities reached the estimated point from each railway car.

Keywords: *noise analysis, railway transport, type of train, line noise source, sound level, ceiling sound level.*

Введение

Шум качения генерируется высокоинтенсивными источниками звука. Принято, что уровни шума этих источников не превышают 130 дБ и акустические процессы излучения можно рассматривать как линейные. Другой особенностью является наличие ряда излучателей (колесных пар), расположенных друг от друга на расстояниях $r > \frac{\lambda}{6}$ [1]. По условию Е. Скучика такое условие позволяет считать эти излучатели некогерентными. С учетом расстояний граничная частота этого условия находится в пределах октавной полосы частот 63 Гц.

При рассмотрении процессов дивергенции поезда принимаются линейными источниками, излучающими цилиндрическую звуковую волну в свободное полупространство. Также рассматривается прохождение звука через препятствия (выемки, насыпи и пр.). Линейные источники звука приняты конечной длины в пределах от 100 до 1500 м. Границей существования цилиндрической звуковой волны

принято известное допущение:

$$R \leq \frac{l_{ист}}{\pi}, \tag{1}$$

где $l_{ист}$ – длина источника (поезда), м. При условии

$$R \geq 2l_{ист}, \tag{2}$$

Источник звука (поезд) принимается точечным источником сферической звуковой волны. В пределах

$$\frac{l_{ист}}{\pi} \leq R \leq 2l_{ист}, \tag{3}$$

Звуковая волна принимается квазицилиндрической.

Интерференционные явления, возникающие при распространении звука, не рассматриваются. При наличии препятствия длина препятствия принимается равной длине источника шума (поезда) [1].

1. Правило расчетов

Расчеты выполняются в соответствии с правилом, согласно которому (рис. 1):

$$W_{ист} \rightarrow I_1 \rightarrow W_1 \rightarrow I_2 \rightarrow W_2 \rightarrow \dots \rightarrow I_n \rightarrow W_n \rightarrow I_{РТ} \tag{4}$$

где $W_{ист}$ – акустическая мощность источника, Вт;
 I_1 – интенсивность звука на первой поверхности с первым импедансом, Вт/м²;
 W_1 – акустическая мощность звука, излучаемого этой поверхностью, Вт;
 I_2 и W_2 – то же для второй поверхности с новым импедансом;
 I_n и W_n – то же для n -й поверхности;
 $I_{РТ}$ – интенсивность звука в расчетной точке (РТ), Вт/м².

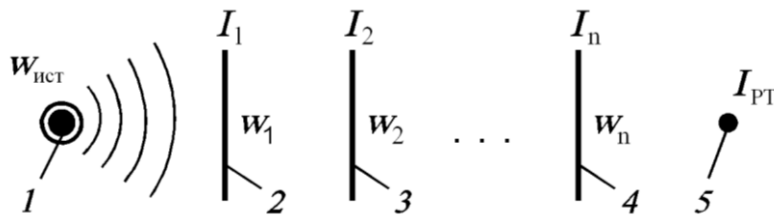


Рис. 1 Иллюстрация к правилу для вывода формулы в простейшем случае: 1 – источник звука; 2, 3, 4, ..., n -е переходные поверхности; 5 – расчетная точка

Исходной величиной в расчетах является акустическая мощность источника ($W_{ист}$), получаемая конечная величина – интенсивность звука в расчетной точке ($I_{РТ}$).

Границы выполняемых расчетов определяются принятыми допущениями и приняты в частотном диапазоне 63-8000 Гц.

2. Описание расчетных схем

Были рассмотрены основные случаи распространения звука:

- в свободном пространстве;
- с препятствием в виде выемки;
- с препятствием в виде насыпи;

– при наличии препятствия – акустического экрана, расположенного близко к источнику шума (поезду).

Расчетные схемы приведены в табл. 1.

Таблица 1
 Расчетные схемы

№ п/п	Вид схемы	Обозначения на схеме	Примечание
1		1 – источник шума (ИШ); 2 – расчетная точка (РТ); 3 – защищаемый от шума объект; 4 – опорная поверхность;	Звук распространяется в свободном звуковом поле
2		5 – выемка; 6 – поверхность между вершиной выемки и РТ;	Учитывается поглощение звука поверхностями
3		7 – насыпь;	Двойная дифракция
4		8 – ближнее средство звукоизоляции	БСЗ расположено в условиях диффузного звукового поля

3. Распространение звука от линейного источника в свободном звуковом поле

При излучении в полупространство интенсивность звука в РТ определяется:

$$I_{РТ} = \frac{W_{ист}(1 - \alpha_{нов})}{\pi \sqrt{R^2 + h_{РТ}^2}} \arctg \frac{l_{ист}}{2\sqrt{R^2 + h_{РТ}^2}}, \text{ Вт/м}^2, \quad (5)$$

где $l_{ист}$ – длина ИШ, м; $\alpha_{нов}$ – коэффициент звукопоглощения опорной поверхности; R – расстояние от ИШ до расчетной точки, м; $h_{РТ}$ – высота расчетной точки, м.

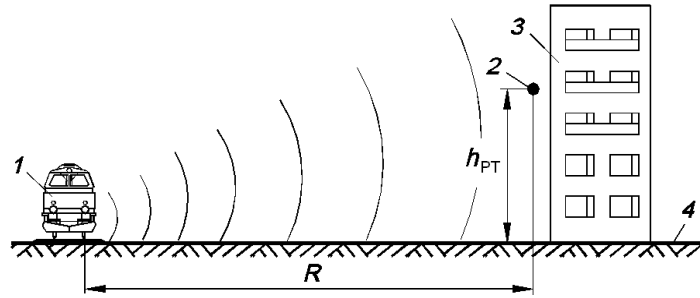


Рис. 2 Схема распространения звука от источника в полупространство в свободном звуковом поле: 1 – ИШ; 2 – РТ; 3 – здание; 4 – подстилающая (опорная) поверхность

Прологарифмировав обе части, получим формулу расчета УЗД (УЗ) в РТ при известных значениях уровней звуковой мощности источника ($L_{W_{ист}}$):

$$L_{РТ} = L_{W_{ист}} + 10 \lg \operatorname{arctg} \frac{l}{2\sqrt{R^2 + h_{РТ}^2}} + 10 \lg(1 - \alpha_{носе}) - 10 \lg \pi l - 10 \lg \sqrt{R^2 + h_{РТ}^2}, \text{дБ}, \quad (6)$$

В практике акустических расчетов линейных источников в качестве исходных значений выбираются измеренные или рассчитанные УЗД (УЗ) на опорном расстоянии 25 м для поездов, поэтому сделаем следующие преобразования:

Чтобы получить УЗ вместо УЗМ запишем формулу (6) для опорного расстояния, которое обозначим r_0 :

$$L_{r_0} = L_{W_{ист}} + 10 \lg \operatorname{arctg} \frac{l}{2r_0} + 10 \lg(1 - \alpha_{носе}) - 10 \lg \pi l - 10 \lg r_0, \text{дБ}, \quad (7)$$

Проведя операцию вычитания выражения (7) из выражения (6) переходим к использованию в качестве исходных параметров линейного источника шума УЗ и УЗД, после преобразований:

$$L_{РТ} = L_{25} + 10 \lg \operatorname{arctg} \frac{l}{2\sqrt{R^2 + h_{РТ}^2}} + 10 \lg(1 - \alpha_{носе}) - 10 \lg \frac{\sqrt{R^2 + h_{РТ}^2}}{25} - 10 \lg \operatorname{arctg} \frac{l}{50}, \quad (8)$$

где для удобства понимания исходных значений вместо L_{r_0} введена привязка к расстоянию L_{25} .

Сравнивая формулы (6) и (8) можно увидеть, что переход осуществляется заменой:

$$L_{25} = L_{W_{ист}} - 10 \lg \pi l - 10 \lg \operatorname{arctg} \frac{l}{50} \quad (9)$$

Анализ формулы (9) показывает, что здесь, кроме снижения шума от линейного источника с увеличением расстояния (дивергенция), учитывается поправка на его длину.

4 Распространение звука от поезда, расположенного в выемке

Схема распространения звука от поезда, расположенного в выемке представлена на рис. 3.

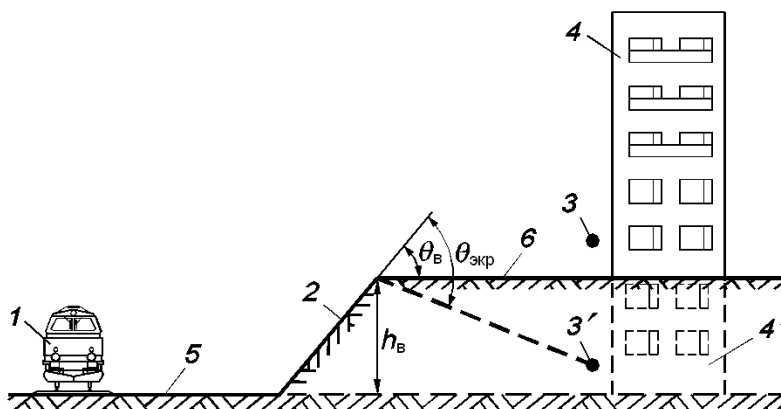


Рис. 3 Схема распространения звука от поезда, расположенного в выемке:
 1 – ИШ; 2 – выемка; 3 – РТ; 4 – защищаемый объект; 5 – опорная поверхность между ИШ и основанием выемки; 6 – поверхность между вершиной выемки и РТ; 3' и 4' – расчетная точка и защищаемый объект, условно расположенный на одной плоскости с опорной поверхностью

Интенсивность звука, падающего на основание выемки

$$I_{над} = \frac{W_{исм}(1 - \alpha_{он})}{\pi r_г l_г} \operatorname{arctg} \frac{l_г}{2r_г} \quad (10)$$

где $\alpha_{он}$ – коэффициент звукопоглощения опорной поверхности;

$r_г$ – расстояние от ИШ до основания выемки, м;

$l_г$ – длина выемки (длина ИШ условно принята равной длине выемки), м.

Мощность звукового поля в нижней части выемки

$$W_H = I_{над}^г r_г l_г \quad (11)$$

Особенностью экранирующего эффекта выемки является то, что угол дифракции выемки ($\theta_г$) больше угла дифракции ($\theta_{экп}$), например, экрана, если бы он был установлен взамен выемки. Поэтому в расчете должна рассматриваться не полная высота выемки, а эффективная высота, равная

$$h_{эф}^г = h_г - h_г \sin \varphi \quad (12)$$

где $h_г$ – высота выемки, м;

$$\varphi = \theta_{экп} - \theta_г \quad (13)$$

С учетом излучения звука в $\frac{1}{4}$ пространства интенсивность звука на краю выемки

$$I_г = \frac{W_H(1 - \alpha_г)}{\frac{\pi}{2} l_г h_{эф}^г} \operatorname{arctg} \frac{l_г}{2h_{эф}^г} \quad (14)$$

где $\alpha_г$ – коэффициент звукопоглощения склона выемки.

Мощность, излучаемая краем выемки:

$$W_{\epsilon} = I_{\epsilon} l_{\epsilon} \lambda \beta_{\text{дифр}}^{\epsilon} \quad (15)$$

где λ_{ϵ} – длина звуковой волны, м;

$\beta_{\text{дифр}}^{\epsilon}$ – коэффициент дифракции выемки.

Интенсивность звука в РТ с учетом звукопоглощающих свойств поверхности между краем выемки и РТ

$$I_{\text{РТ}} = \frac{W_{\epsilon} (1 - \alpha_{\text{ног}})}{\pi l_{\epsilon} R_{\epsilon}} \operatorname{arctg} \frac{l_{\epsilon}}{2R_{\epsilon}} \quad (16)$$

где R_{ϵ} – расстояние от края выемки до РТ, м.;

$\alpha_{\text{ног}}$ – коэффициент звукопоглощения поверхности между краем выемки и РТ.

Подставим (10), (11), (14), (15) в (16)

$$I_{\text{РТ}} = \frac{2W_{\text{учт}} (1 - \alpha_{\text{он}}) r_{\epsilon} l_{\epsilon} (1 - \alpha_{\epsilon}) l_{\epsilon} \lambda \beta_{\text{дифр}}^{\epsilon} (1 - \alpha_{\text{ног}}) \operatorname{arctg} \frac{l_{\epsilon}}{2r_{\epsilon}} \operatorname{arctg} \frac{l_{\epsilon}}{2h_{\text{эф}}^{\epsilon}} \operatorname{arctg} \frac{l_{\epsilon}}{2R_{\epsilon}}}{\pi r_{\epsilon} l_{\epsilon} \pi l_{\epsilon} h_{\text{эф}}^{\epsilon} \pi l_{\epsilon} R_{\epsilon}} \quad (17)$$

Выполнив упрощения и прологарифмировав обе части, получим:

$$L_{\text{РТ}} = L_{W_{\text{учт}}} + 10 \lg(1 - \alpha_{\text{он}}) + 10 \lg(1 - \alpha_{\epsilon}) + 10 \lg(1 - \alpha_{\text{ног}}) + 10 \lg \pi l_{\epsilon} - 10 \lg \frac{h_{\text{эф}}^{\epsilon}}{\lambda} + \text{ПД}_{\text{выем}} - 10 \lg \frac{R_{\epsilon}}{r_0} - 10 \lg \pi^2 + 10 \lg 2 + 10 \lg \operatorname{arctg} \frac{l_{\epsilon}}{2r_{\epsilon}} + 10 \lg \operatorname{arctg} \frac{l_{\epsilon}}{2h_{\text{эф}}^{\epsilon}} + 10 \lg \operatorname{arctg} \frac{l_{\epsilon}}{2R_{\epsilon}} \quad (18)$$

где ПД – показатель дифракции выемки – отношение дифрагированного через край выемки звука к падающему звуку ($\text{ПД} = 10 \lg \beta_{\text{дифр}}^{\epsilon}$).

С учетом (18) и после некоторых преобразований:

$$L_{\text{РТ}} = L_{25} - 10 \lg \frac{h_{\text{эф}}^{\epsilon}}{\lambda} - 10 \lg \frac{R_{\epsilon}}{r_0} + \text{ПД}_{\text{выем}} + 10 \lg(1 - \alpha_{\text{он}}) + 10 \lg(1 - \alpha_{\epsilon}) + 10 \lg(1 - \alpha_{\text{ног}}) + 10 \lg \operatorname{arctg} \frac{l_{\epsilon}}{2r_{\epsilon}} + 10 \lg \operatorname{arctg} \frac{l_{\epsilon}}{2h_{\text{эф}}^{\epsilon}} + 10 \lg \operatorname{arctg} \frac{l_{\epsilon}}{2R_{\epsilon}} - 10 \lg \operatorname{arctg} \frac{l_{\epsilon}}{50} - 10 \lg \pi^2, \text{ дБ} \quad (19)$$

где L_{25} – УЗД (УЗ), измеренные на расстоянии 25 м от ИШ, дБ (дБА).

Отметим, что понятие показателя дифракции выемки вводится впервые.

5. Распространение шума за насыпь

Расчетная схема представлена на рис. 4. Интенсивность звука на вершине насыпи со стороны ИШ (излучение в $\frac{1}{4}$ пространства):

$$I_{\text{н}} = \frac{W_{\text{учт}}}{\frac{\pi}{2} l_{\text{н}} h_{\text{эф}}^{\text{н}}} \operatorname{arctg} \frac{l_{\text{н}}}{2h_{\text{эф}}^{\text{н}}}, \quad (20)$$

где $l_{\text{н}}$ – длина насыпи, м; $h_{\text{эф}}^{\text{н}}$ – эффективная высота насыпи, м.

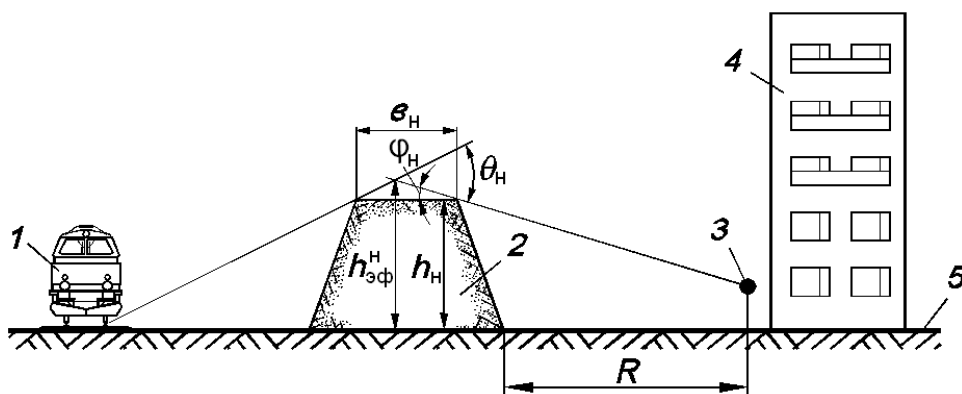


Рис. 4. Схема распространения звука за насыпь:

1 – ИШ; 2 – насыпь; 3 – РТ; 4 – защищаемый от шума объект; 5 – опорная поверхность; θ_n – угол дифракции насыпи; φ_n – угол между поверхностью насыпи и лучом от РТ до ближней вершины насыпи; h_n – высота насыпи; h_n^H – перпендикуляр от точки пересечения лучей (от ИШ до вершины насыпи и от РТ до другой вершины насыпи) на основание насыпи

$$h_n^H = h_n + e_n \sin \varphi_n \quad (21)$$

где φ_n – см. рис. 4; h_n – высота насыпи, м; e_n – ширина насыпи, м.

Условно принимаем, что излучение звука происходит частью насыпи шириной 1 м, тогда звуковая мощность, излучаемая этой частью насыпи:

$$W_n = I_n l_n \beta_{дифр}^H, \quad (22)$$

где $\beta_{дифр}^H$ – коэффициент дифракции насыпи.

Интенсивность звука в противоположной части насыпи

$$I_n' = \frac{W_n (1 - \alpha_n)}{\pi l_n e_n} \arctg \frac{l_n}{2e_n}, \quad (23)$$

где e_n – ширина насыпи, м; α_n – коэффициент звукопоглощения насыпи.

Мощность звука, излучаемого противоположной частью насыпи:

$$W_n' = I_n' \lambda_n \beta_{дифр}^H, \quad (24)$$

Интенсивность звука в РТ:

$$I_{РТ} = \frac{W_n'}{2\pi l_n R_n} \arctg \frac{l_n}{2R_n}, \quad (25)$$

где R_n – расстояние от насыпи до РТ, м.

Подставив (20), (22-24) в (25) получим:

$$I_{РТ} = \frac{W_{ист} (1 - \alpha_n) \cdot l_n \beta_{дифр}^H \lambda_n \beta_{дифр}^H}{2 \frac{\pi}{2} l_n h_n^H \pi l_n e_n \pi l_n R_n} \times \arctg \frac{l_n}{2h_n^H} \arctg \frac{l_n}{2e_n} \arctg \frac{l_n}{2R_n} \quad (26)$$

После преобразований с учетом:

$$L_{PT} = L_{25} + 10\lg(1 - \alpha_n) + ПД_{нас} - 10\lg \frac{h_{эф}^n}{\lambda} - 10\lg \frac{\epsilon_n R_n}{\epsilon_0 r_0} + 10\lg \operatorname{arctg} \frac{l_n}{2h_{эф}^n} + 10\lg \operatorname{arctg} \frac{l_n}{2\epsilon_n} + 10\lg \operatorname{arctg} \frac{l_n}{2R_n} - 10\lg \operatorname{arctg} \frac{l_n}{50} - 10\lg \pi^2, \text{дБ} \quad (27)$$

где $ПД_{нас}$ – показатель дифракции насыпи ($ПД - 20\lg \beta_{дифр}^n$)

$\epsilon_0 = 1$; $r_0 = 1$

Снижение шума насыпью зависит от ее звукопоглощения, высоты, ширины верхней части. Понятие показатель дифракции насыпи вводится впервые.

6. Распространение звука при наличии средств ближней звукоизоляции

Применения средств снижения шума качения в источнике не обеспечивает снижения шума до требуемых величин. Эффективной мерой снижения шума на пути распространения от источника является применение средств ближней звукоизоляции (СБЗ). В качестве такого средства может рассматриваться преграда в виде малого акустического экрана, расположенного вблизи головки рельса в пределах разрешенных габаритов. Расчетная схема такого расположения показана на рис. 5.

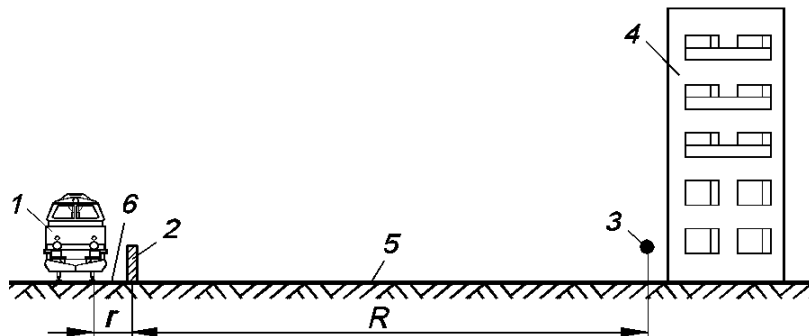


Рис. 5. Расчетная схема СБЗ:

- 1 – источник шума (пара колесо–рельс); 2 – СБЗ; 3 – расчетная точка (РТ);
- 4 – защищаемый от шума объект; 5 – опорная поверхность между СБЗ и РТ;
- 6 – опорная поверхность между источником шума и СБЗ

Рассматривается звуковое поле в замкнутом объеме, образованное:

- элементами подвижного состава (тележка, нижняя часть корпуса подвижного состава);
- отражающей поверхностью между источником шума и СБЗ;
- свободным проёмом в верхней части;
- ближним средством звукоизоляции.

Основные допущения, принятые при выводе формулы:

- звуковое поле в полузамкнутом объеме принимается квазидиффузным;
- источник шума (ИШ) принят линейным излучателем;
- высота источника шума принята равной высоте СБЗ ($h_э$), т.е. $h_{ист} = h_э$;
- длина ИШ ($l_{ист}$) принята равной длине СБЗ ($l_э$), т.е. $l_{ист} = l_э$;
- свободное ребро СБЗ принято вторичным линейным излучателем;
- в связи с малой высотой СБЗ учитываются поглощающие свойства опорной поверхности между СБЗ и расчётной точкой.

Звук, падающий на верхнее свободное ребро СБЗ:

$$I_{nad} = \frac{4W_{uct}}{\Psi_{об} B_{об}} \quad (28)$$

где: $\Psi_{об}$ – коэффициент, показывающий степень диффузности звукового поля в объеме; $B_{об}$ – акустическая постоянная объема, м³

$$B_{об} = \frac{A_{об}}{1 - \alpha_{об}} = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i S_i}{(1 - \alpha)} \quad (29)$$

где: $A_{об}$ – эквивалентная площадь поглощения незамкнутого объема, м²; α_i – коэффициент звукопоглощения i -ой поверхности, образующей незамкнутый объем площадью S_i ; α – средний коэффициент звукопоглощения незамкнутого объема.

После преобразований:

$$B_{об} = \frac{l_3 h_3 \alpha_3 + l_3 h_3 \alpha_u + l_3 r \alpha_u + l_3 r}{(1 - \alpha_{об})} = \frac{l_3 (h_3 \alpha_3 + h_3 \alpha_u + r \alpha_u + r)}{(1 - \alpha_{об})}, \quad (30)$$

где h_3, l_3 – высота и длина БСЗ соответственно; α_3 – коэффициент звукопоглощения БСЗ; α_u – коэффициент звукопоглощения источника шума (со стороны БСЗ); r – расстояние от ИШ до БСЗ, м.

Значение $\alpha_{об}$ определяется: $\alpha_{об} = \frac{A_{об}}{S_{об}}$, где: $S_{об}$ – площадь всех поверхностей, образующих незамкнутый объем $S_{об} = 2S_3 + 2S_n = 2(S_3 + S_n)$, где: $S_3 = h_3 l_3$; $S_n = h_3 r$.

После некоторых преобразований формула (28) может быть представлена в виде:

$$I_{nad} = \frac{4W_{uct}(1 - \alpha_{об})}{l_3 (h_3 \alpha_3 + h_3 \alpha_{uct} + r \alpha_{нов} + r) \Psi_{об}}, \quad (31)$$

Акустическая мощность, излучаемая верхним свободным ребром БСЗ: $W_p = I_{nad} l_3 r \beta_{дифр}$, где $\beta_{дифр}$ – коэффициент дифракции БСЗ, а r – расстояние от ИШ до БСЗ, м. Интенсивность звука в расчётной точке с учётом звукопоглощающих свойств опорной поверхности:

$$I_{PT} = \frac{W_p (1 - \alpha_{нов})}{2\pi_3 R} \arctg \frac{l_3}{2R} \quad (32)$$

где R – расстояние от БСЗ до расчётной точки; $\alpha_{нов}$ – коэффициент звукопоглощения поверхности между БСЗ и РТ.

С учётом сказанного зависимость (32) представим

$$I_{PT} = \frac{4W_{uct}(1 - \alpha_{об})(1 - \alpha_{нов})l_3 r \beta_{дифр}}{\Psi_{об} l_3 (h_3 \alpha_3 + h_3 \alpha_{uct} + r \alpha_{нов} + r) 2\pi_3 R} \quad (33)$$

После преобразований и логарифмирования обеих частей, приняв $10 \lg \beta_{дифр} = ПД$, получим:

$$L_{PT} = L_{25} + 10\lg(1 - \alpha_{об}) + 10\lg(1 - \alpha_{ноб}) + ПД - 10\lg \frac{R}{r} - 10\lg \psi_{об} - 10\lg A + \\ + 10\lg \arctg \frac{l_3}{50} + 10\lg \frac{l_3}{2R} + 3, \text{ дБ} \quad (34)$$

Заключение

Рассмотренные схемы позволяют выбрать оптимальные средства защиты при разработке шумозащитных мероприятий при строительстве жилой застройки, разработке мероприятий по защите природных территорий, при строительстве железных дорог.

Список литературы

1. 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 – Санкт-Петербург: Изд-во «Айсинг», 2015 С. – 125–144.