

УДК: 331.451
OECD: 01.03.AA

Расчет акустической эффективности выемки

Борцова С.С.¹, Буторина М.В.^{2*}, Иванов Н.И.³

¹ Ст. преподаватель ^{2,3} Д.т.н., профессор

^{1,2,3} Кафедра «Экология и производственная безопасность», Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург, РФ

Аннотация

В статье рассмотрена проблема оценки акустической эффективности выемок, применяемых как шумозащитное средство для снижения шума автомобильного и железнодорожного транспорта. Существующие методы расчета, отраженные в нормативной документации, позволяют получить значения эффективности, завышенные на 5-6 дБА по отношению к данным измерений. В работе предложен новый расчетный метод для оценки эффективности выемки, более точно учитывающий не только расположение источника шума, кромки выемки и расчетной точки, но также позволяющий учесть звукопоглощающие коэффициенты склонов выемки и подстилающей поверхности и геометрические параметры выемки. Анализ сравнения результатов расчетов, полученных по разным методикам, показывает, что предлагаемый метод позволяет получить величины акустической эффективности, приближенные к результатам измерений, не завышая расчетное снижение шума выемкой.

Ключевые слова: шумозащитная выемка, акустическая эффективность, расчетный метод, звукопоглощение, дифракция.

Calculation of acoustic efficiency of excavations

Bortsova S.S.¹, Butorina M.V.^{2}, Ivanov N.I.³*

¹ Senior Lecturer ^{2,3} DSc, Professor

^{1,2,3} Department of Ecology and Industrial Safety, Baltic State Technical University 'VOENMEH', St. Petersburg, Russia

Abstract

The article discusses the problem of assessing the acoustic efficiency of excavations used as a noise barrier to reduce acoustic pollution coming from road and rail transport. Existing calculation methods, presented in regulatory documentation, make it possible to obtain efficiency values that are overestimated by 5-6 dBA in relation to measurement data. The paper proposes a new calculation method for assessing the efficiency of excavation, which takes into account not only the location of the noise source, the edge of the excavation and the receiver, but also allows taking into account the sound absorption coefficients of the slopes of the excavation, the underlying surface and the geometric parameters of the excavation. An analysis of calculation results obtained using different methods shows that the proposed method helps to obtain acoustic efficiency values that are better correlated to the measurement results, without overestimating the calculated noise reduction by the excavation.

Keywords: *noise protection excavation, acoustic efficiency, calculation method, noise absorption, diffraction.*

Введение

Для снижения шума автомобильного и железнодорожного транспорта в жилой застройке применяются мероприятия, снижающие шум на пути его распространения. По пути распространения шум может быть уменьшен за счет увеличения расстояния, применения акустических экранов и других экранирующих сооружений, таких как выемки, насыпи, тоннели и т.п. Одним из наиболее эффективных шумозащитных мероприятий является расположение дороги в выемке, что позволяет значительно снизить шум [1].

Применение выемок позволяет значительно сократить размеры защитных зон (санитарных разрывов), устанавливаемых для транспортных источников шума. Так, согласно ранее действовавшего СП 42.13330-2011 жилую застройку следовало отделять от железных дорог санитарно-защитной зоной шириной не менее 100 м, но при размещении железных дорог в выемке это расстояние сокращалось вдвое. Аналогичные требования представлены в действующих «Правилах и нормах технической эксплуатации жилищного фонда»: расстояние от железной дороги до жилой застройки должно быть не менее 100-200 м (выбирается в соответствии с категорией железнодорожной линии), но при устройстве железнодорожной линии в выемке, оно сокращается до 50 м.

Выемки рекомендуется устраивать в пригородных зонах, там, где позволяют местные условия. Они являются более дешевым видом экранов по сравнению с экранами-стенками.

Требования к устройству выемок закреплены в ВСН 04-71 [2], согласно которым откосы выемок должны иметь уклон 1:2 или 1:1,5 и быть укреплены с помощью облицовки их бетонными или каменными плитами или дерном.

Специальные шумозащитные выемки (ШВ) рекомендуется устраивать при невозможности обеспечить снижения шума до нормативных значений в расчетной точке при проложении дороги в обычной выемке с пологими откосами. Расчет акустической эффективности шумозащитной выемки в составе проектной документации рекомендуется производить в соответствии с положениями ГОСТ 33325 [3] как для проложения железной дороги в выемке. Согласно ГОСТ 33325 расчет эффективности выемки производится в соответствии с положениями ГОСТ 31295.2 [4] как для экрана, дополнительно вносится поправка на крутизну склона (внутренний угол) величиной 1-6 дБА. С учетом того, что максимальная расчетная эффективность экрана достигает 25 дБА, с учетом поправки расчетная эффективность выемки может превышать значение в 30 дБА [5].

Исследованиями эффективности выемки занимались различные ученые, среди которых следует упомянуть работы Мининой Н.Н. [6], Куклина Д.А. [7], в соответствии с их исследованиями реальная эффективность выемок не превышает величины 15-20 дБА, что значительно ниже расчетной величины. Поэтому необходим новый более точный метод расчета эффективности шумозащитной выемки.

1. Существующие методы оценки эффективности выемки

Обычно оценку эффективности шумозащитной выемки производят при помощи метода Маекавы, основанного на теории линейной акустики [8]. Он первым предложил производить оценку эффективности экранирующего сооружения на основании числа Френеля, а для широких экранов (насыпей, выемок, зданий) — дополнительно учитывать их ширину. Его методы положены в основу существующих инженерных методов, реализованных в [3, 4].

Согласно теории Маекавы эффективность шумозащитной выемки (ΔL^B , дБА) может быть описана как:

$$\Delta L^B = 9,4 \cdot \lg(2 + 50 \cdot \delta) \quad (1)$$

где δ – разность путей хода звукового луча – параметр, учитывающий расположение ШВ относительно ИШ и РТ:

$$\delta = a + b - c \quad (2)$$

где a – расстояние от источника шума до дифракционной кромки, м; b – расстояние от дифракционной кромки до РТ, м; c – расстояние от ИШ до РТ, м (расстояния указаны рис. 1).

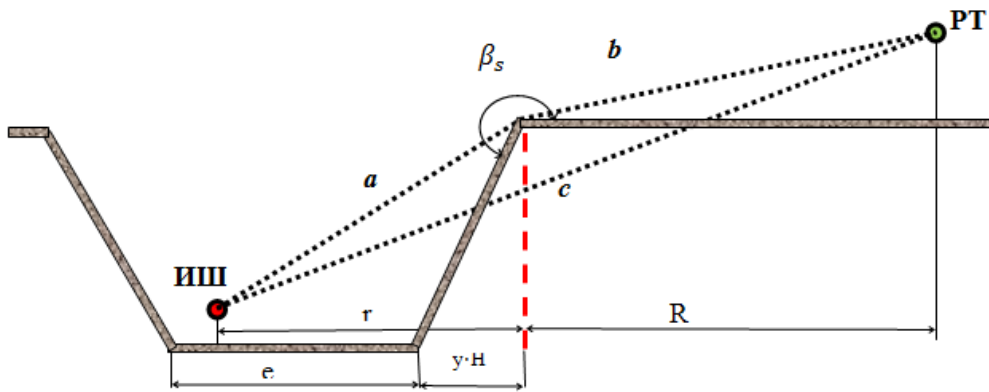


Рис. 1. Схема для определения эффективности ШВ

В соответствии с действующими инженерными методами расчета выемка имеет эффективность мнимого экрана, условно вписанного под бровку откоса ШВ, той же высоты, дополненную влиянием склона – коэффициент $K_{\text{скл}}$. Воплощение данного положения в нормативной документации несколько различается, так, расчётная формула по ГОСТ 33325 [3] может быть представлена в виде:

$$\Delta L^B = 10 \cdot \lg(3 + 58,8 \cdot \delta \cdot K_{\text{мет}}) + K_{\text{скл}} \quad (3)$$

Согласно СП 276.1325800.2016 [9]:

$$\Delta L^B = 18,2 + 7,8 \cdot \lg(\delta + 0,02) + K_{\text{скл}} \quad (4)$$

где ΔL^B – эффективность ШВ, дБА; $K_{\text{мет}}$ – коэффициент, учитывающий влияние метеорологических условий; δ определяется по формуле (2).

$K_{\text{скл}}$ – коррекция на склон выемки. Он одинакова во всех документах и составляет от 1 до 6 дБА независимо от коэффициента звукопоглощения склона выемки и определяется только его внутренним углом.

Ширина нижней площадки выемки определяется категорией дороги, поэтому возможность изменять ее для увеличения эффективности выемки весьма ограничена. На снижение шума влияет уклон ШВ, который вместе с главным параметром – глубиной – учтен в формуле для δ (2).

2. Разработка расчетного метода оценки эффективности выемки

Анализ действующих расчетных методов показывает их ограниченность с точки зрения учета всех влияющих на эффективность выемки параметров. Предлагаемый в данной работе метод позволяет более точно учесть расположение источника шума, кромки выемки и расчетной точки, звукопоглощающие коэффициенты склонов выемки и подстилающей поверхности, а также геометрические параметры выемки.

Акустическая эффективность шумозащитного сооружения определяется как:

$$\Delta L_{ш/з} = 10 \lg \frac{I_{РТ}^{бш/з}}{I_{РТ}^{сш/з}} \quad (5)$$

где $I_{РТ}^{бш/з}$ – интенсивность звука без шумозащитной конструкции в расчетной точке (РТ), Вт/м²;

$I_{РТ}^{сш/з}$ – то же с установленной шумозащитной конструкцией в РТ, Вт/м².

Определяем значение числителя в формуле (5), где обозначения даны на схеме (рис. 2) для линейного источника шума (ИШ).

$$I_{РТ}^{б/в} = \frac{W_{ист}}{2\pi l_{ист}(R_1 + b_в + R)} \arctg \frac{l_{ист}}{2(R_1 + b_в + R)}, \quad (6)$$

где $W_{ист}$ – акустическая мощность источника шума, Вт;

$l_{ист}$ – длина источника шума (участка транспортного потока), условно принимаемая равной длине выемки, м;

$R_1, b_в, R$ – расстояния, указанные на рис. 2: $b_в$ – ширина выемки, м; R_1 – расстояние от ИШ до нижнего края выемки, м; R – расстояние от края выемки до РТ, м.

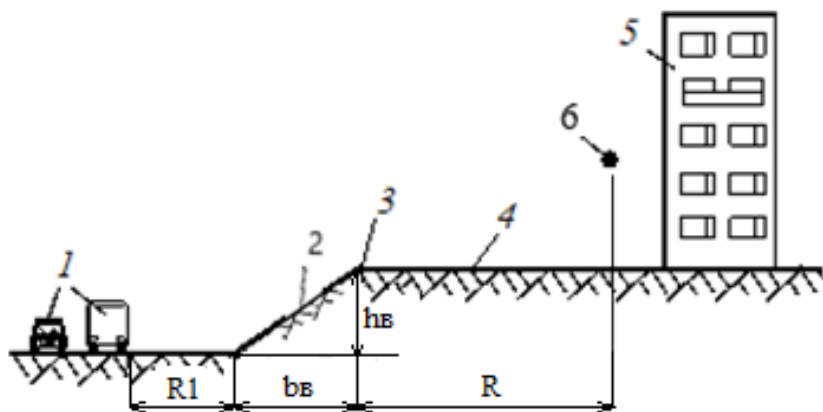


Рис. 2. Расчетная схема распространения звука за выемку: 1 – источники шума; 2 – склон выемки; 3 – край выемки; 4 – опорная поверхность; 5 – защищаемый от шума объект; 6 – расчетная точка

Выполним вывод знаменателя в формуле (5), используя метод преобразования звуковых полей [10].

Принятые допущения:

- звук проходит через верхнюю грань выемки;
- длина выемки условно принимается равной длине источника шума;
- источник шума линейный (транспортный поток);

- склон выемки, а также опорная поверхность, обладают определенными звукопоглощающими свойствами.

Тогда интенсивность звука, падающего на нижнюю часть выемки, определится как:

$$I_{\text{пад}} = \frac{W_{\text{ист}}(1 - \alpha_{\text{пов1}})}{2\pi l_{\text{ист}} R_1} \operatorname{arctg} \frac{l_{\text{ист}}}{2R_1}, \quad (7)$$

где $W_{\text{ист}}$ – акустическая мощность источника шума (ИШ), Вт; $\alpha_{\text{пов1}}$ – коэффициент звукопоглощения поверхности между ИШ и основанием выемки; $l_{\text{ист}}$ – условная длина ИШ, принятая равной длине выемки, м; R_1 – расстояние между ИШ и основанием выемки, м.

Акустическую мощность условного вторичного ИШ, расположенного в основании выемки, получаем, приняв его ширину условно равной 1 м:

$$W_{\text{осн}} = I_{\text{пад}} \cdot l_{\text{в}} \cdot 1, \quad (8)$$

где $l_{\text{в}}$ – длина выемки, м.

Интенсивность звука на кромке выемки:

$$I_{\text{к}} = \frac{W_{\text{осн}}(1 - \alpha_{\text{в}})}{\pi \sqrt{h_{\text{в}}^2 + b_{\text{в}}^2} l_{\text{в}}} \operatorname{arctg} \frac{l_{\text{в}}}{2\sqrt{h_{\text{в}}^2 + b_{\text{в}}^2}}, \quad (9)$$

где $h_{\text{в}}$ – высота выемки; $b_{\text{в}}$ – расстояние от нижнего края (кромки) выемки до перпендикуляра, опущенного из верхнего края на основание, м; $\alpha_{\text{в}}$ – коэффициент звукопоглощения склона выемки.

Мощность звука очередного вторичного источника, образовавшегося на краю (кромке) выемки равна:

$$W_{\text{в}} = I_{\text{к}} \cdot l_{\text{в}} \cdot \lambda \cdot \beta_{\text{дифр}}^{\text{в}}, \quad (10)$$

где $\beta_{\text{дифр}}^{\text{в}}$ – коэффициент дифракции звука, огибающего край выемки (определяется по результатам измерений).

Интенсивность звука в расчетной точке (РТ) с учетом звукопоглощения поверхности между краем выемки и РТ ($\alpha_{\text{пов2}}$):

$$I_{\text{РТ}} = \frac{W_{\text{в}}(1 - \alpha_{\text{пов2}})}{2\pi l_{\text{в}} R} \operatorname{arctg} \frac{l_{\text{в}}}{2R}, \quad (11)$$

где: $\alpha_{\text{пов2}}$ – коэффициент звукопоглощения опорной поверхности; R – расстояние от края выемки до РТ, м.

Подставив (7)-(10) в (11), получим:

$$I_{\text{РТ}} = \frac{W_{\text{ист}}(1 - \alpha_{\text{пов1}}) l_{\text{в}} (1 - \alpha_{\text{в}}) l_{\text{в}} \lambda \cdot \beta_{\text{дифр}}^{\text{в}} (1 - \alpha_{\text{пов2}})}{2\pi l_{\text{ист}} R_1 \pi \sqrt{h_{\text{в}}^2 + b_{\text{в}}^2} 2\pi l_{\text{в}} R} \times \\ \times \operatorname{arctg} \frac{l_{\text{в}}}{2R} \operatorname{arctg} \frac{l_{\text{ист}}}{2R_1} \operatorname{arctg} \frac{l_{\text{в}}}{2\sqrt{h_{\text{в}}^2 + b_{\text{в}}^2}}, \quad (12)$$

Подставив (6) и (12) в (5) получим:

$$\Delta L_{\text{в}} = 10 \lg \frac{W_{\text{ист}} 2\pi l_{\text{ист}} R_1 \pi \sqrt{h_{\text{в}}^2 + b_{\text{в}}^2} 2\pi l_{\text{в}} R}{2\pi l_{\text{ист}} (R_1 + b_{\text{в}} + R) W_{\text{ист}} (1 - \alpha_{\text{пов2}}) l_{\text{в}} (1 - \alpha_{\text{в}}) l_{\text{в}} \beta_{\text{дифр}}^{\text{в}} (1 - \alpha_{\text{пов1}})} \times \\ \times \operatorname{arctg} \frac{\frac{l_{\text{ист}}}{2(R_1 + b_{\text{в}} + R)}}{\operatorname{arctg} \frac{l_{\text{в}}}{2R_1} \operatorname{arctg} \frac{l_{\text{в}}}{2\sqrt{h_{\text{в}}^2 + b_{\text{в}}^2}} \operatorname{arctg} \frac{l_{\text{в}}}{2R_1}} \quad (13)$$

После сокращений, перестановок и логарифмирования получим акустическую эффективность выемки (приняв допущение, что $R \ll R_1 + b_b$):

$$\begin{aligned} \Delta L_b = & 10\lg \frac{R_1 R}{(R_1 + b_b + R) R_0} + 10\lg \sqrt{h_b^2 + b_b^2} - 10\lg(1 - \alpha_{пов1}) - 10\lg(1 - \alpha_b) - \\ & - 10\lg(1 - \alpha_{пов2}) + ПД_b - 10\lg \operatorname{arctg} \frac{l_{ист}}{2\sqrt{h_b^2 + b_b^2}} - 20\lg \operatorname{arctg} \frac{l_b}{2R_1} + \\ & + 10\lg \operatorname{arctg} \frac{l_{ист}}{2(R_1 + b_b + R)} + 10\lg 2\pi^2, \text{ дБ} \end{aligned} \quad (14)$$

где $ПД_b$ – показатель дифракции выемки ($ПД_b = 10\lg \frac{1}{\beta_{диф}^b}$), $R_0 = 1$ м, $10\lg 2\pi^2 = 13$ дБ.

3. Оценка точности предлагаемого расчетного метода

В исследовании [6] были произведены попытки экспериментально оценить зависимость эффективности ШВ (ΔL_b , дБА) от её глубины (H^b , м). Полученные данные достаточно противоречивы, так, например, при глубине выемки в 10 м снижение шума за ней составило 15 дБА, а снижение шума выемкой в 9 м, полученное в аналогичных условиях – 20 дБА, что значительно превышает данные, полученные в ходе первой серии измерений. Тем не менее, результаты измерений свидетельствуют о том, что предельная эффективность шумозащитных выемок не превышает 20 дБА.

На рисунке 3 приведено сравнение расчетной величины эффективности шумозащитной выемки, полученное по формулам из нормативной документации (3) и (4), а также при помощи предлагаемого метода (14).

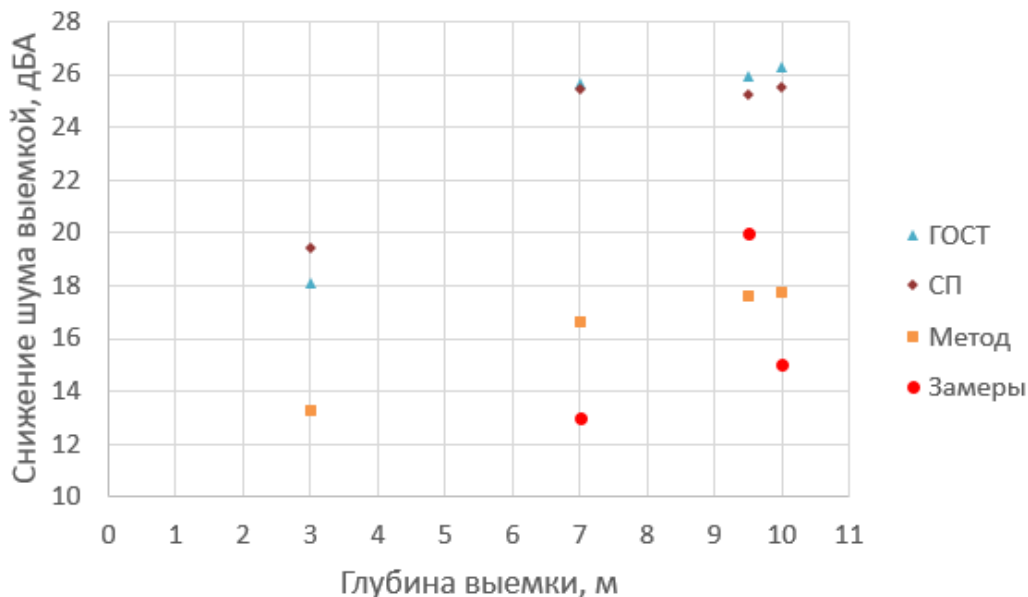


Рис. 3. Зависимость акустической эффективности выемки, дБА, от глубины, м

Результаты анализа полученных данных показывают, что данные, полученные при помощи предлагаемого расчетного метода показывают хорошую сходимость с данными, полученными при помощи нормативной документации, при этом он позволяет получить величины, которые лучше коррелируют с результатами измерений, не завышая расчетное снижение шума за выемкой.

Следует отметить, что для получения достоверных данных необходимо выполнить дополнительные эксперименты, устанавливающие связь эффективности выемки с её глубиной. Также необходимо уточнить величину показателя дифракции, т.к. нормативной методики для его определения нет, а имеющиеся результаты замеров вызывают определенные сомнения.

Заключение

Одним из наиболее эффективных шумозащитных мероприятий является расположение дороги в выемке, что позволяет значительно снизить шум, а также сократить размеры санитарных разрывов, устанавливаемых для транспортных источников шума.

Сооружение выемок строго регламентировано нормативными документами. Расчёт акустической эффективности шумозащитной выемки в составе проектной документации рекомендуется производить в соответствии с положениями ГОСТ 33325 либо СП 276.1325800.2016. Результаты расчетов, произведенных при помощи данной нормативной документации, демонстрируют завышенные значения снижения шума выемкой (до 30 дБА), в то время как результаты измерений свидетельствуют о том, что предельная эффективность шумозащитных выемок не превышает 20 дБА.

На основании метода преобразования звуковых полей был разработан инженерный метод оценки снижения шума выемкой, который позволяет более точно учесть расположение источника шума, кромки выемки и расчетной точки, звукопоглощающие коэффициенты склонов выемки и подстилающей поверхности, а также геометрические параметры выемки.

Данные, полученные при помощи предлагаемого расчетного метода, показывают хорошую сходимость с данными, полученными при помощи нормативной документации, при этом он позволяет получить величины, более близкие к результатам измерений, не завышая расчетное снижение шума выемкой.

Список литературы

1. Буторина М.В., Куклин Д.А. Классификация железнодорожных линий по уровням шума и шумозащитные мероприятия Путь и путевое хозяйство, 2019. №9. С. 15-19.
2. ВСН 04-71/Минэнерго СССР. Ведомственные строительные нормы. Указания по расчету устойчивости земляных откосов. Издание второе (утв. Главтехстройпроектком Минэнерго СССР 21.01.1971).
3. ГОСТ 33325-2015 (с изменениями). Методы расчета уровней внешнего шума, излучаемого железнодорожным транспортом.
4. ГОСТ 31295.2-2005 (ИСО 9613-2:1996). Межгосударственный стандарт. Шум. Затухание звука при распространении на местности. Часть 2. Общий метод расчета
5. Шабарова А.В., Буторина М.В., Куклин Д.А. Сравнение методов расчета распространения шума железнодорожного транспорта в различных типах застройки Noise Theory and Practice. 2022; 3 (8): с. 16-33.
6. Минина, Н.Н. Проблема снижения акустического воздействия на жилую застройку при проектировании, строительстве и функционировании транспортных сооружений: диссертация докт. техн. наук: 01.04.06 / Минина Наталия Николаевна. - Санкт-Петербург, 2012. - 286 с.

7. Куклин Д.А. Снижение внешнего шума поездов в источнике и на пути распространения / Д. А. Куклин ; БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова. - СПб. : [б. и.], 2016. - 154 с. : граф., схемы, табл., фото. - Библиогр.: с. 150-152. - Список принят. сокращ.: с. 3. - ISBN 978-5-85546-953-0
8. Maekawa Z. Environmental and Architectural Acoustics / Z. Maekawa, J. H. Rindel, P. Lord / Spon Press. - Second edition. - 2011. - 371 p.
9. СП 276.1325800.2016. Свод правил. Здания и территории. Правила проектирования защиты от шума транспортных потоков // Принят: Министерством строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации 03.12.2016
10. Иванов Н.И. Защита от шума и вибрации [Текст] : учебное пособие [для вузов] / Н. И. Иванов, А. Е. Шашурин. - 2-е изд., перераб. и доп. - СПб. : Печатный Цех, 2019. - 282 с. : граф., схемы, табл.

References

1. Butorina M.V., Kuklin D.A. Classification of railway lines by noise levels and noise protection measures. Put' i putevoye khozyaystvo, 2019. No. 9. pp. 15-19.
2. VSN 04-71/Ministry of Energy of the USSR. Department building standards. Instructions for calculating the stability of earthen slopes. Second edition (approved by Glavtekhstroyproekt of the USSR Ministry of Energy on January 21, 1971).
3. GOST 33325-2015 (as amended). Noise. Calculation methods for external noise emitted by railway transport
4. GOST 31295.2-2005 (ISO 9613-2:1996). Noise. Attenuation of sound during propagation outdoors. Part 2. General method of calculation
5. Shabarova A.V., Butorina M.V., Kuklin D.A. Comparison of methods for calculating the propagation of railway noise in various types of development. Noise Theory and Practice. 2022; 3 (8): p. 16-33.
6. Minina, N.N. The problem of reducing the acoustic impact on residential buildings during the design, construction and operation of transport structures: dissertation of Dr. tech. Sciences: 01.04.06 / Minina Natalia Nikolaevna. - St. Petersburg, 2012. - 286 p.
7. Kuklin D.A. Reducing external train noise at the source and along the propagation path / D. A. Kuklin; BSTU "VOENMEH" named after. D. F. Ustinova. - St. Petersburg. : [b. i.], 2016. - 154 p. : graphs, diagrams, tables, photos. - Bibliography: p. 150-152. - The list has been accepted. abbreviation: p. 3. - ISBN 978-5-85546-953-0
8. Maekawa Z. Environmental and Architectural Acoustics / Z. Maekawa, J. H. Rindel, P. Lord / Spon Press. -Second edition. - 2011. - 371 p.
9. SP 276.1325800.2016. Set of rules. Buildings and territories. Protection design rules from traffic noise // Adopted by: Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation 12/03/2016
10. Ivanov N.I. Protection from noise and vibration [Text]: textbook [for universities] / N. I. Ivanov, A. E. Shashurin. - 2nd ed., revised. and additional - St. Petersburg. : Printing Shop, 2019. - 282 p.