

УДК: 331.451
OECD: 01.03.AA

Расчет акустической эффективности насыпи

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

Применение шумозащитных насыпей (валов) является весьма перспективным мероприятием для снижения шума автомобильного и железнодорожного транспорта. Однако проблемы, связанные с оценкой их акустической эффективности, затрудняют их применение. Методы, отраженные в нормативной документации, завышают расчетные значения на 5-10 дБ, особенно в области низких и средних частот. В представленной работе предложен инженерный метод расчета, основанный на методе последовательного преобразования звуковых полей, который учитывает дифракцию на обеих кромках насыпи, а также такие дополнительные параметры, как коэффициенты звукопоглощения ее склонов и подстилающей поверхности. Верификация расчетной формулы показывает, что точность предложенной формулы составляет ± 3 дБ во всем диапазоне частот.

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

Calculation of acoustic efficiency of embankment

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 use of noise protection embankments (shafts) is a very promising measure for reducing noise from road and rail transport. However, problems associated with assessing their acoustic efficiency make their application difficult. The methods reflected in the regulatory documentation overestimate the calculated values by 5-10 dB, especially in the low and medium frequencies range. In given article an engineering calculation method based on the method of sequential transformation of sound fields is proposed. It takes into account diffraction on both edges of the embankment, as well as additional parameters such as the sound absorption coefficients of its slopes and the underlying surface. Verification of the calculation formula shows that the accuracy of the proposed method is ± 3 dB over the entire frequency range.

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

Введение

По масштабам применения шумозащитные насыпи (земляные валы) – вторая по распространению конструкция барьерного типа после акустических экранов.

Шумозащитные насыпи или валы проектируются в соответствии с ОДМ 218.2.013-2011 [1]. Применение шумозащитных насыпей имеет определенные особенности: при необходимости обеспечить одинаковое снижение шума высота шумозащитного грунтового вала должна быть на 15-20% больше высоты вертикального шумозащитного экрана, при этом существенно увеличивается занимаемая шумозащитным валом площадь территории. Так, по оценкам специалистов акустическая эффективность шумозащитного экрана высотой 7 м сопоставима с эффективностью шумозащитного вала высотой 9,5 м. Вал при этом занимает площадь шириной не менее 32 м, в то время как для установки фундамента экрана требуется порядка не более 1 м. При необходимости размещения шумозащитного сооружения в полосе отвода дороги возникает необходимость ее увеличения на ширину вала, что зачастую приводит к необходимости выкупа земельных участков.

Тем не менее, шумозащитные насыпи рекомендуется использовать за пределами городской застройки, в случае прохождения дороги в уровне земли при отсутствии пересечений с другими дорогами. Допустимость применения шумозащитных валов обосновывается расчетом акустической и экономической эффективности.

С точки зрения акустической эффективности, как и для любого экранирующего сооружения, ключевым параметром шумозащитной насыпи (ШН) является её высота. Однако в отличие от остальных барьеров при огибании звуком верхнего ребра ШН в ряде источников отмечен эффект «двойной дифракции» [2]. К сожалению, данный эффект слабо отражен в действующей нормативно-технической документации [3-5], которая крайне противоречиво толкует оценку снижения шума насыпью.

В основе оценки эффективности ШН лежит расчёт эффективности мнимого экрана, «вписанного» под одну или обе кромки ШН. Согласно СП 276 [5] экран следует располагать под ближней к расчетной точке вершиной насыпи. ГОСТ 31295.2 [4] предлагает размещать условный экран-стенку под вершиной ШН, ближней к источнику шума. Второе отличие – знак перед поправочным коэффициентом $K_{скл}$, который учитывает ширину насыпи и позволяет учесть дополнительное влияние склонов на снижение уровней шума. При этом в разных документах знак, стоящий перед этим важным параметром, различен. Применение коэффициента $K_{скл}$ со знаком «+» даёт существенно завышенный результат, к тому же порядок определения коэффициента при помощи эмпирической номограммы усложняет процесс расчёта эффективности ШН.

Проблемы, связанные с проектированием шумозащитных насыпей, ограничивают их применение в качестве шумозащиты. При этом различные авторы сходятся во мнении, что данное мероприятие весьма перспективно для снижения шума как автомобильных, так и железных дорог [6,7].

Целью данной работы является разработка нового метода расчета, лишённого несовершенств, отмеченных в нормативной документации.

1. Разработка расчетного метода для оценки акустической эффективности насыпи

Анализ действующих расчетных методов показывает, что они не дают возможности учесть все влияющие на эффективность насыпи параметры. Предлагаемый в данной работе метод расчета позволяет учесть не только расположение источника шума, кромок насыпи и защищаемого объекта, но и звукопоглощающие коэффициенты склонов

насыпи и подстилающей поверхности, а также геометрические параметры насыпи.

Акустическая эффективность насыпи определяется как:

$$\Delta L_{ш/з} = 10 \lg \frac{I_{РТ}^{б ш/з}}{I_{РТ}^{с ш/з}} \quad (1)$$

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

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

Расчетная схема приведена на рис. 1.

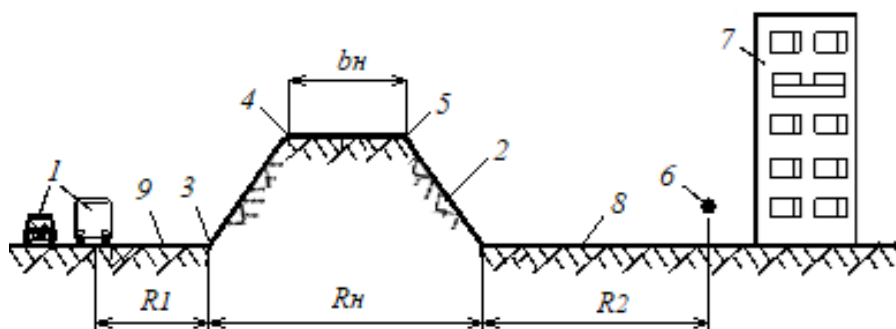


Рис. 1. Расчетная схема прохождения звука за насыпь: 1 – источник шума (ИШ); 2 – насыпь; 3 – основание насыпи; 4 – левая кромка насыпи; 5 – правая кромка насыпи; 6 – расчетная точка (РТ); 7 – защищаемое здание; 8 – опорная поверхность; 9 – часть опорной поверхности между ИШ и насыпью

Выполним расчет звука в РТ при наличии насыпи (рис. 1), используя метод последовательного преобразования звуковых полей [8].

Основные допущения:

- источник шума линейный (фронт звуковой волны цилиндрический);
- длина источника шума (ИШ) принимается равной длине насыпи;
- насыпь, вернее, ее кромки (края) являются вторичными линейными ИШ;
- звук дифрагирует через левую и правую кромки (края) насыпи (двойная дифракция);
- часть опорной поверхности между ИШ и насыпью, склон насыпи и верхняя часть насыпи обладают звукопоглощающими свойствами;
- звукопоглощающие свойства опорной поверхности между насыпью и защищаемым объектом не учитываются.

Интенсивность звука в РТ без насыпи определится как:

$$I_{РТ}^{б/н} = \frac{W_{ист}}{\pi l_{ист} R} \arctg \frac{l_{ист}}{2R}, \text{ Вт/м}^2 \quad (2)$$

где $W_{ист}$ – акустическая мощность источника шума, Вт; $l_{ист}$ – длина ИШ, м; R – расстояние от ИШ до РТ, м:

$$R = R_1 + R_n + R_2 \quad (3)$$

где R_1 – расстояние от ИШ до основания насыпи, м; R_n – ширина нижней части насыпи (по основанию), м; R_2 – расстояние от насыпи до РТ, м.

Интенсивность звука, пришедшего в нижнюю часть насыпи (излучение звука происходит в полупространство):

$$I_{\text{н}} = \frac{W_{\text{ист}}(1 - \alpha_{\text{пов}})}{\pi l_{\text{ист}} R_1} \operatorname{arctg} \frac{l_{\text{ист}}}{2R_1}, \quad (4)$$

где $l_{\text{ист}}$ – длина ИШ условно равная длине насыпи, м; $\alpha_{\text{пов}}$ – коэффициент звукопоглощения части опорной поверхности; R_1 – расстояние между ИШ и насыпью, м.

Акустическая мощность в нижней части насыпи, при этом ее ширина условно принята равной 1 м:

$$W_{\text{н}} = I_{\text{н}} l_{\text{н}} 1 \quad (5)$$

где $l_{\text{н}}$ – длина насыпи, м.

Интенсивность звука на вершине насыпи:

$$I_{\text{в}} = \frac{W_{\text{н}}(1 - \alpha_{\text{ск}})}{\pi/2 l_{\text{н}} h_{\text{н}}} \operatorname{arctg} \frac{l_{\text{н}}}{2h_{\text{н}}} \quad (6)$$

где $h_{\text{н}}$ – высота насыпи, м; $\alpha_{\text{ск}}$ – коэффициент звукопоглощения склона насыпи. Мощность звука на верхней части насыпи:

$$W_{\text{в}} = I_{\text{в}} l_{\text{н}} \lambda \beta_{\text{дифр}}^{\text{н}} \quad (7)$$

где $\beta_{\text{дифр}}^{\text{н}}$ – коэффициент дифракции насыпи; λ – длина звуковой волны, м.

Интенсивность звука в правой верхней части насыпи:

$$I_{\text{в}} = \frac{W_{\text{в}}(1 - \alpha_{\text{в}})}{2\pi l_{\text{н}} b_{\text{н}}} \operatorname{arctg} \frac{l_{\text{н}}}{2b_{\text{н}}} \quad (8)$$

где: $\alpha_{\text{в}}$ – коэффициент звукопоглощения поверхности верхней части насыпи; $b_{\text{н}}$ – ширина верхней поверхности насыпи, м.

Мощность звука вторичного источника, излучающего звук в расчетную точку

$$W_{\text{пр}} = I_{\text{пр}} l_{\text{н}} \lambda \quad (9)$$

Интенсивность звука в расчетной точке (РТ):

$$I_{\text{РТ}} = \frac{W_{\text{пр}}}{\pi l_{\text{н}} R_2} \operatorname{arctg} \frac{l_{\text{н}}}{2R_2} \quad (10)$$

где R_2 – расстояние от насыпи до РТ, м.

Подставим (4)–(9) в (10):

$$I_{\text{РТ}} = \frac{2W_{\text{ист}}(1 - \alpha_{\text{пов}})l_{\text{н}}1(1 - \alpha_{\text{ск}})l_{\text{н}}\lambda\beta_{\text{дифр}}^{\text{н}}(1 - \alpha_{\text{в}})l_{\text{н}}\lambda}{\pi l_{\text{ист}} R_1 \pi l_{\text{н}} h_{\text{н}} \pi l_{\text{н}} b_{\text{н}} \pi l_{\text{н}} R_2} \times \\ \times \operatorname{arctg} \frac{l_{\text{ист}}}{2R_1} \operatorname{arctg} \frac{l_{\text{н}}}{2h_{\text{н}}} \operatorname{arctg} \frac{l_{\text{н}}}{2b_{\text{н}}} \operatorname{arctg} \frac{l_{\text{н}}}{2R_2}, \quad (11)$$

Подставим (2) и (11) в (1):

$$\Delta L_{\text{н}} = 10 \lg \frac{W_{\text{ист}} \pi l_{\text{ист}} R_1 \pi l_{\text{н}} h_{\text{н}} \pi l_{\text{н}} b_{\text{н}} \pi l_{\text{н}} R_2 \operatorname{arctg} \frac{l_{\text{ист}}}{2R_1}}{\pi l_{\text{ист}} R l W_{\text{ист}} (1 - \alpha_{\text{пов}}) l_{\text{н}} (1 - \alpha_{\text{ск}})} \times \\ \times \frac{1}{l_{\text{н}} \lambda \beta_{\text{дифр}}^{\text{н}} (1 - \alpha_{\text{в}}) l_{\text{н}} \lambda \operatorname{arctg} \frac{l_{\text{ист}}}{2R_1} \operatorname{arctg} \frac{l_{\text{н}}}{2h_{\text{н}}} \operatorname{arctg} \frac{l_{\text{н}}}{2b_{\text{н}}} \operatorname{arctg} \frac{l_{\text{н}}}{2R_2}} \quad (12)$$

Приняв $l_{\text{нст}} = l_{\text{н}}$ и $R_2 \gg R_1 + R_{\text{н}}$, сделав сокращения и упрощения, прологарифмировав члены (11), получим акустическую эффективность насыпи:

$$\begin{aligned} \Delta L_{\text{н}} = & 10\lg \frac{R_1 R_2}{R R_0} + 10\lg \frac{h_{\text{н}}}{\lambda} + 10\lg \frac{b_{\text{н}}}{\lambda} - 10\lg(1 - \alpha_{\text{пов}}) - 10\lg(1 - \alpha_{\text{ск}}) - \\ & - 10\lg(1 - \alpha_{\text{в}}) - \text{ПД}_1 - \text{ПД}_2 - 10\lg \arctg \frac{l_{\text{н}}}{2h_{\text{н}}} - 10\lg \arctg \frac{l_{\text{н}}}{2R_1} - \\ & - 10\lg \arctg \frac{l_{\text{н}}}{2b_{\text{н}}} + 10\lg \frac{\pi^3}{2}, \text{ дБ} \end{aligned} \quad (13)$$

где $\text{ПД}_{1,2}$ – показатели дифракции правой и левой частей насыпи, $\text{ПД}_{\text{н}} = 10\lg \frac{1}{\beta_{\text{дифр}}^{\text{н}}}$, дБ (по данным эксперимента $\text{ПД}_1 = \text{ПД}_2$); $R_0 = 1$ м, $10\lg \frac{\pi^3}{2} = 12$ дБ.

2. Верификация расчетного метода

Для того, чтобы оценить, насколько точные результаты могут быть получены при применении предлагаемого в работе расчетного метода, были проведены расчеты по формуле (13) для случая, представленного на рисунке 2, и сравнены с данными, полученными в ходе эксперимента. Результаты пошагового расчета показаны в таблице 1.

Таблица 1

Расчет акустической эффективности насыпи и сравнение с данными эксперимента

Исходные данные для расчета	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц								УЗ, дБА
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
$10\lg \frac{R_1 R_2}{R R_0}$	6	6	6	6	6	6	6	6	6
$10\lg \frac{h_{\text{н}}}{\lambda}$	-1,5	1,7	4,6	7,6	10,6	13,6	16,6	19,6	10,6
$10\lg \frac{b_{\text{н}}}{\lambda}$	-2,5	0,4	3,4	6,4	9,4	12,4	15,4	18,4	9,4
$\alpha_{\text{н}} = \alpha_{\text{пов}} = \alpha_{\text{ск}}$	0,1	0,1	0,15	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
$-10\lg(1 - \alpha)$	0	0	1,5	3	3	3	3	3	3
$-(\text{ПД}_1 = \text{ПД}_2)$ - данные эксперимента	-6	-8	-10	-13	-15	-16	-19	-19	-14
$10\lg \arctg \frac{l_{\text{н}}}{2R_1}$	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2
$10\lg \arctg \frac{l_{\text{н}}}{2h_{\text{н}}}$	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2
$10\lg \arctg \frac{l_{\text{н}}}{2b_{\text{н}}}$	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2
$10\lg \frac{\pi^3}{2}$	12	12	12	12	12	12	12	12	12
$\Delta L_{\text{н}}$ (расчет)	2	6	10,5	16	20	25	28	34	21
$\Delta L_{\text{н}}$ (эксперимент)	3	9	10	17	21	22	25	31	22

Для верификации данных расчета были выполнены экспериментальные исследования акустической эффективности насыпи. Схема расположения точек измерений показана на рисунке 2. Результаты измерений в расчетных точках 1-6, а также в точке 6 при отсутствии насыпи приведены в таблице 2 и на рисунке 3.

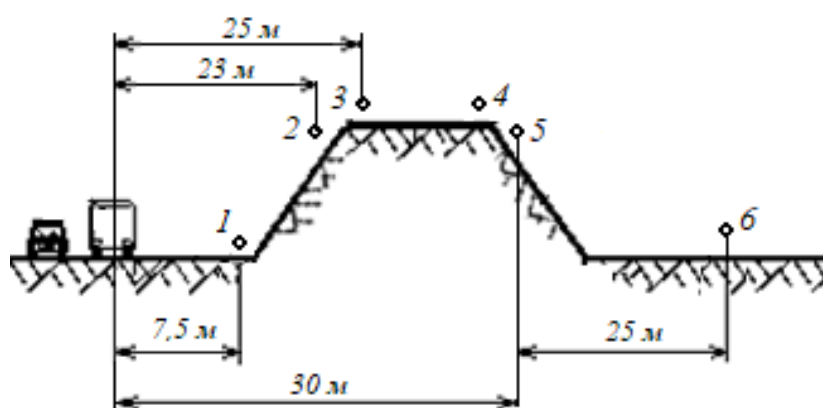


Рис. 2. Схема расположения точек измерений (1-6)

Таблица 2

Усредненные результаты измерений насыпи высотой 6 м

№ измерительной точки (рис. 2)	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц								УЗ, дБА
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
1	80	77	74	74	79	74	64	59	81
2	79	74	71	70	73	68	56	51	75
3	76	70	66	63	65	61	46	41	68
4	74	67	63	60	62	58	42	35	66
5	73	63	58	54	55	52	33	26	59
6	69	59	53	49	49	46	28	22	51
6 (без насыпи)	72	68	63	66	70	68	53	53	73
ΔL_n (эксперимент)	3	9	10	17	21	22	25	31	22

На рисунке 3 приведено сравнение расчетной величины эффективности шумозащитной выемки, полученное по формулам из нормативной документации [3], а также при помощи предлагаемого метода (13) и в результате замеров.

Сравнение расчетных и экспериментальных данных для частотного диапазона 63-8000 Гц показало, что точность предложенной формулы составляет ± 3 дБ во всем диапазоне частот. При этом метод, представленный в ГОСТ 31295.2, завышает расчетные значения на 5-10 дБ в области низких и средних частот.

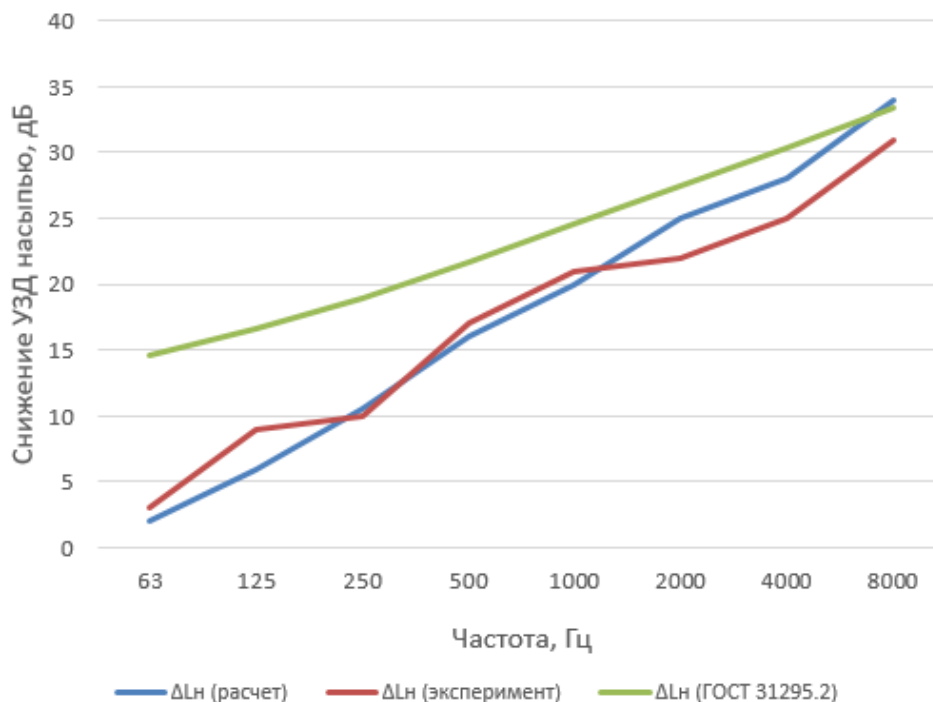


Рис. 3. Сравнение данных расчета и эксперимента

Заключение

Шумозащитные насыпи (земляные валы) – вторая по распространению конструкция барьерного типа после акустических экранов. Однако проблемы, связанные с проектированием шумозащитных насыпей, в особенности, с оценкой их акустической эффективности, ограничивают их применение в качестве шумозащиты.

В работе предложен новый инженерный метод оценки снижения шума за насыпью, основанный на методе последовательного преобразования звуковых полей, который учитывает дифракцию на обеих кромках насыпи, а также такие дополнительные параметры, как коэффициенты звукопоглощения ее склонов и подстилающей поверхности.

Для верификации данных расчета были выполнены экспериментальные исследования акустической эффективности насыпи. Сравнение расчетных и экспериментальных данных для частотного диапазона 63-8000 Гц показало, что точность предложенной формулы составляет ± 3 дБ во всем диапазоне частот. При этом метод, представленный в ГОСТ 31295.2, завышает расчетные значения на 5-10 дБ в области низких и средних частот.

Список литературы

1. ОДМ 218.2.013-2011 Методические рекомендации по защите от транспортного шума территорий, прилегающих к автомобильным дорогам
2. Maekawa Z. Environmental and Architectural Acoustics / Z. Maekawa, J. H. Rindel, P. Lord / Spon Press. - Second edition. – 2011. – 371 p.
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. 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

6. Буторина М.В., Тюрина Н.В., Иванов Н.И., Санников В.А. Классификация автомобильных дорог по уровням шума. Noise theory and practice, Vol.6, No.4, с. 22-32.

7. Буторина М.В., Воронова А.А., Шабарова А.В. Выбор мероприятий для защиты от железнодорожного шума в городской и сельской застройке. Защита от повышенного шума и вибрации: сборник трудов конф. Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, 26-28 апреля 2023 г., СПб/ Под ред. Н.И. Иванова. – СПб., 2023. С. 272-280

8. 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. ODM 218.2.013-2011 Guidelines for protecting areas adjacent to highways from traffic noise.

2. Maekawa Z. Environmental and Architectural Acoustics / Z. Maekawa, J. H. Rindel, P. Lord / Spon Press. - Second edition. – 2011. – 371 p.

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. 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

6. Butorina M.V., Tyurina N.V., Ivanov N.I., Sannikov V.A. Classification of highways by noise levels. Noise theory and practice, Vol.6, No.4, p. 22-32.

7. Butorina M.V., Voronova A.A., Shabarova A.V. Selection of noise protection measures for urban and rural areas. Proceedings of All-Russian scientific-practical conf. with international participation “Protection from increased noise and vibration”, April 26-28, 2023, St.Petersburg / Ed. N.I. Ivanova. – St. Petersburg, 2023. pp. 272-280.

8. 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.