

УДК: 534.836.2  
OECD: 1.03. AA

## Расчет затухания шума железнодорожного транспорта в условиях жилой городской застройки

Васильева А.В.<sup>1\*</sup>, Забалканская Л.Э.<sup>2</sup>, Буторина М.В.<sup>3</sup>, Васильев А.П.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Старший преподаватель кафедры «Экология и производственная безопасность»,

<sup>2</sup>К.ф.-м.н., доцент кафедры «Высшая математика»,

<sup>3</sup>Д.т.н., доцент, профессор кафедры «Экология и производственная безопасность»,

<sup>4</sup>Старший преподаватель кафедры «Экология и производственная безопасность»

<sup>1,2,3,4</sup>Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»

им. Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург, РФ

### Аннотация

Данная статья является продолжением исследования влияния различных параметров застройки на затухания звука. Определен коэффициент, связывающий такие параметры как отношение длин сторон зданий и отношение длины пролетов между зданиями к общей длине участка. Данный параметр может быть определен для двух групп, включающих в себя по два типа застройки: строчная параллельная и ленточная; строчная перпендикулярная и периметральная. Определен критерий отнесения застройки к той или иной группе. Также найдена коррекция, учитывающая шероховатость застройки (параметр, зависящий от средней высоты зданий). Представлены формулы для определения затухания звука в различных типах застройки, проведены расчеты затухания звука на различных участках застройки, прилегающей к железной дороге, для всех расчетов получена хорошая сходимость с результатами эксперимента.

**Ключевые слова:** распространение шума, затухание звука, шум в городской застройке, шероховатость застройки, шум железнодорожного транспорта.

### *Calculation of noise reduction of railway transport in conditions of residential urban development*

Vasilyeva A.V.<sup>1\*</sup>, Zabalkanskaya L.E.<sup>2</sup>, Butorina M.V.<sup>3</sup>, Vasiliev A.P.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Senior lecturer at the Department of Ecology and Industrial Safety

<sup>2</sup>PhD, Associate Professor of the Department of Higher Mathematics

<sup>3</sup>DSc, Associate Professor, Professor of the Department of Ecology and Industrial Safety

<sup>4</sup>Senior Lecturer of the Department of Ecology and Industrial Safety

<sup>1,2,3,4</sup>Baltic State Technical University 'VOENMEH', St. Petersburg, Russia

### Abstract

This article is a continuation of the study of the influence of various building parameters on sound attenuation. A coefficient has been determined linking parameters such as the ratio of the lengths of the sides of buildings and the ratio of the length of the gaps between buildings to the total length of the site. This parameter can be defined for two groups, which include two types of buildings: lowercase parallel and ribbon; lowercase perpendicular and perimeter. The criterion for assigning buildings to a particular group has been determined. An adjustment for the roughness of the building was also found (a parameter depending

on the average height of buildings). Formulas for determining sound attenuation in various types of buildings are presented, calculations of sound attenuation in various sections of the building adjacent to the railway are carried out, good convergence with the experimental results is obtained for all calculations.

**Keywords:** noise propagation, sound attenuation, noise in urban areas, roughness of buildings, noise of railway transport.

## Введение

На процесс распространения шума железнодорожного транспорта в застройке влияет множество явлений, в первую очередь это экранирование зданиями, отражение звука, снижение звука за счет ограничения угла видимости источника шума, дифракция звука на боковых кромках зданий, прямое прохождение звука через просветы между домами и пр. При этом от расположения зданий относительно друг друга и источника шума зависит какие из этих явления будут превалирующими и окажут большее влияние на снижение шума [1, 2]. Среди типовых вариантов расположений зданий можно выделить четыре наиболее часто встречающиеся: периметральная, строчная перпендикулярная, строчная параллельная и ленточная [3, 4]. В работах [5, 6] были рассмотрены зависимости затухания шума железнодорожного транспорта в застройке различных типов от таких параметров как: плотность застройки, отношение длин сторон зданий, длина просветов между зданиями и шероховатости застройки. Так как существующие расчетные методики недостаточно точно учитывают геометрию зданий и их высоту, необходимо разработать расчетные формулы, учитывающие данные параметры.

## 1. Описание применяемого подхода

Для расчета снижения шума в данной работе предлагаются расчетные схемы для оценки распространения шума на территории застройки и математические модели для различных массивов зданий, учитывающие особенности распространения в них звука. При этом жилые массивы рассматриваются как области затухания шума, в которых реализуются процессы геометрической дивергенции, дифракции, поглощения и отражения звука, молекулярного затухания и пр., рассматриваемые совместно.

По результатам исследований снижения звука при его распространении в городской застройке был сделан вывод, что снижение звука зависит от отношения длин сторон зданий, отношения длины просветов между зданиями к общей длине участка, а также от шероховатости застройки [5, 6]. Для разработки расчетных формул был применен метод эмпирических коэффициентов, полученных методами линейной регрессии по данным натурных измерений. Такой подход нашел широкое применение и используется в различных методиках, таких как СП 23-104-2004 [7], ОДМ 218.2.013-2011 [8], СП 276.1325800.2016 [9], ГОСТ Р 54933 [10]. Для установления зависимостей от различных параметров данные методики используют коэффициент, на который умножается логарифм. [11, 12]

Для установления зависимости с отношением длин сторон зданий, отношением длины просветов между зданиями к общей длине участка используем коэффициент. Следует отметить, что данный подход применим только к застроенным участкам. Расчет распространения шума в пространстве, свободном от застройки, производится по стандартной методике [9].

Поскольку снижение звука в пространстве описывается логарифмической зависимостью, за основу расчетной формулы принята зависимость для линейного

источника:

$$\Delta L = 10 \lg \frac{R}{r_0}, \quad (1)$$

где  $\Delta L$  – снижение уровня звука в расчетной точке, дБА;

$R$  – расстояние от источника шума до расчетной точки, м;

$r_0$  – опорное расстояние, м.

Другой параметр влияющий на снижение шума в застройке – шероховатость застройки  $Z_0$ , определяемая высотой зданий на рассматриваемом участке [6, 13]. Для учета данного параметра введем коррекцию  $K_{\text{выс}}$ , определяемую по формуле:

$$K_{\text{выс}} = 10^{(0,1 * Z_0)} \quad (2)$$

В таблице 1 приведено значение коррекции  $K_{\text{выс}}$  в зависимости от шероховатости застройки.

Таблица 1

Значения коррекции  $K_{\text{выс}}$

Тип застройки	Высота, м	Уровень шероховатости застройки $Z_0$ , м	Коррекция, учитывающая высоту застройки, $K_{\text{выс}}$ , дБА
Пористая поверхность $G=1$ (трава)	0,2	0,02	1
Сельская застройка 1 – 2 этажа	5-8	1	1,3
Городская застройка 3 – 5 этажей	11-15	1,5	1,5
Городская застройка более 5 этажей	15-30	3	2

С учетом всего вышеуказанного формула 1 будет иметь вид:

$$\Delta L = C \lg \frac{R}{r_0} + K_{\text{выс}}, \quad (3)$$

где  $\Delta L$  – снижение уровня звука в расчетной точке, дБА;

$C$  – коэффициент, зависящий от параметров застройки;

$R$  – ширина участка застройки, м;

$r_0$  – опорное расстояние, м;

$K_{\text{выс}}$  – коррекция, учитывающая шероховатость застройки, дБА.

Коэффициент определяется в зависимости от типа застройки. Периметральная и строчная перпендикулярная застройка выделяются в первую группу, строчная параллельная и ленточная – во вторую группу. Данное разделение связано со схожим расположением зданий в объединенных типах. В строчной параллельной и ленточной застройке здания играют роль экранирующих сооружений, и снижение происходит за счет экранирование шума зданием: чем здание длиннее, тем меньше эффект боковой

дифракции сказывается на уровне шума за зданием. Строчная перпендикулярная и периметральная подразумевают наличие зданий, расположенных перпендикулярно источнику шума, разрывы между зданиями в данных типах застройки часто бывают больше, чем в других, снижение шума достигается в основном за счет ограничения угла видимости источника шума.

Критерием отнесения городской застройки к какому-либо типу является отношение длин сторон зданий ( $l$ ), определяемое по формуле:

$$l = a/b, \quad (4)$$

где  $a$  – средняя длина фасадов здания, обращенных к источнику шума (параллельных источнику шума), м;

$b$  – средняя длина фасадов здания, перпендикулярных источнику шума, м.

Если  $l \leq 2$  застройка относится к первой группе (строчная перпендикулярная и периметральная). Если  $l > 2$  застройка относится ко второй группе (строчная параллельная и ленточная).

В таблице 2 представлены значения параметров, от которых зависит коэффициент  $C$ , и затухания звука. Величины затуханий звука были определены экспериментально [14], путем измерений уровней звука на территории застройки.

Таблица 2

Значения параметров, от которых зависит коэффициент и затухания шума на различных участках

Участок	A, м	B, м	Отношение длин сторон здания (l)	Лпросв, м	Лобщ, м	Длина просветов к общей длине (p)	Снижение шума, дБА
Строчная параллельная застройка							
Ст. Столбовая	65	10	6,5	35	100	0,35	14,5
Ст. Путепровод	60	15	4,0	52	170	0,31	12,9
Ст. Бугач	92	13	7,1	17	200	0,29	15,7
Среднее	-	-	5,9	-	-	0,31	14,3
Строчная перпендикулярная застройка							
Ст. Детская	13	59	0,2	94	120	0,78	11,1
Марьяна Роца (северный участок)	13	45	0,3	141	180	0,78	8,8
Ст. Серп и Молот	13	45	0,3	53	84	0,63	5,5
Ст. Куровская	11	48	0,2	47	80	0,59	7,6
пл. Верхние котлы	14	24	0,6	41	70	0,58	10,5
Среднее	-	-	0,3	-	-	0,67	8,7
Периметральная застройка							
ст. Матвеевская – ст. Очаково	33	46	0,7	10	120	0,08	12,9

Участок	А, м	В, м	Отношение длин сторон здания (l)	Лпросв, м	Лобщ, м	Длина просветов к общей длине (p)	Снижение шума, дБА
пос. Железнодорожный	23	31	0,7	89	170	0,52	5,8
пл. Маленковская	81	36	2,3	18	240	0,08	16,0
Среднее	-	-	1,2	-	-	0,22	11,6
Ленточная застройка							
Ст. Лосиноостровская	258	26	9,9	5	410	0,01	20,3
Ст. Северное шоссе – ст. Бугач	113	13	8,7	15	190	0,08	22,6
Среднее	-	-	9,3	-	-	0,05	21,5

Для определения значения коэффициента  $C$  рассмотрим его зависимость от двух параметров  $C(l,p)$ , где  $l$  соответствует соотношению средней длины и ширины зданий данного типа застройки и определяется по формуле (4), а  $p$  – отношению длины просветов между зданиями к общей длине участка:

$$p = l_{\text{просв}}/l_{\text{общ}}, \quad (5)$$

где  $l_{\text{просв}}$  – длина просветов между зданиями, м;

$l_{\text{общ}}$  – длина рассматриваемого участка, м.

Значения  $C$  были определены по имеющимся экспериментальным данным о затуханиях на участках и данным о параметрах застройки (таблица 2).

Предполагая наличие функциональной зависимости, аппроксимируем эту зависимость функцией вида:

$$f(x,y) = K_1 + K_2 x + K_3 y + K_4 xy + K_5 x^2 + K_6 y^2 \quad (6)$$

Коэффициенты определяются методом наименьших квадратов, т.е. находятся коэффициенты, обеспечивающие минимум следующего функционала:

$$\sum_{i=1}^n [C_i - [K_1 + K_2 l_i + K_3 p_i + K_4 l_i p_i + K_5 l_i^2 + K_6 p_i^2]]^2 \quad (7)$$

Мерой «близости» значений аппроксимирующей функции к значениям, полученным с использованием результатов измерений, будет считаться усреднённая по всем точкам среднеквадратичная разность значений, полученных по результатам измерений, и значений аппроксимирующей функции в этих же точках т.е.

$$DS = \frac{\sum_{i=1}^n [C_i - [K_1 + K_2 l_i + K_3 p_i + K_4 l_i p_i + K_5 l_i^2 + K_6 p_i^2]]^2}{n} \quad (8)$$

Получены следующие коэффициенты аппроксимирующей функции:  
для 1 группы (периметральная и строчная перпендикулярная застройка):

$$K^T = (39,402 \quad 6,562 \quad -109,846 \quad 9,358 \quad -5,706 \cdot 10^{-3} \quad 113,175), \quad (9)$$

при этом  $DS = 1,598$ ;

для 2 группы (ленточная и строчная параллельная застройка):

$$K^T = (4,666 \quad 6,009 \quad 126,182 \quad -6,015 \quad -1,928 \cdot 10^{-4} \quad -260,877), \quad (10)$$

при этом  $DS = 1,073$ .

Таким образом, значения коэффициента  $C$  могут быть рассчитаны по формулам: периметральная и строчная перпендикулярная застройка:

$$C = 39,4 + 6,6l - 109,8p + 9,4lp - 0,0057l^2 + 113,2p^2, \quad (11)$$

ленточная и строчная параллельная застройка:

$$C = 4,7 + 6,0l + 1262p - 6,0lp - 0,00019l^2 - 260,9p^2 \quad (12)$$

## 2. Расчет распространения шума в городской застройке

Для подтверждения корректности предложенных расчетных формул 6 – 10, были проведены расчеты затухания звука в различных типах застройки. Так как данные формулы могут быть применены только для типовой городской застройки, расчет проводился для тех расстояний от железной дороги, на которых данное условие соблюдается.

На рисунке 1 представлены схемы расположения расчетных точек (точек, в которых проводились измерения) для некоторых участков.

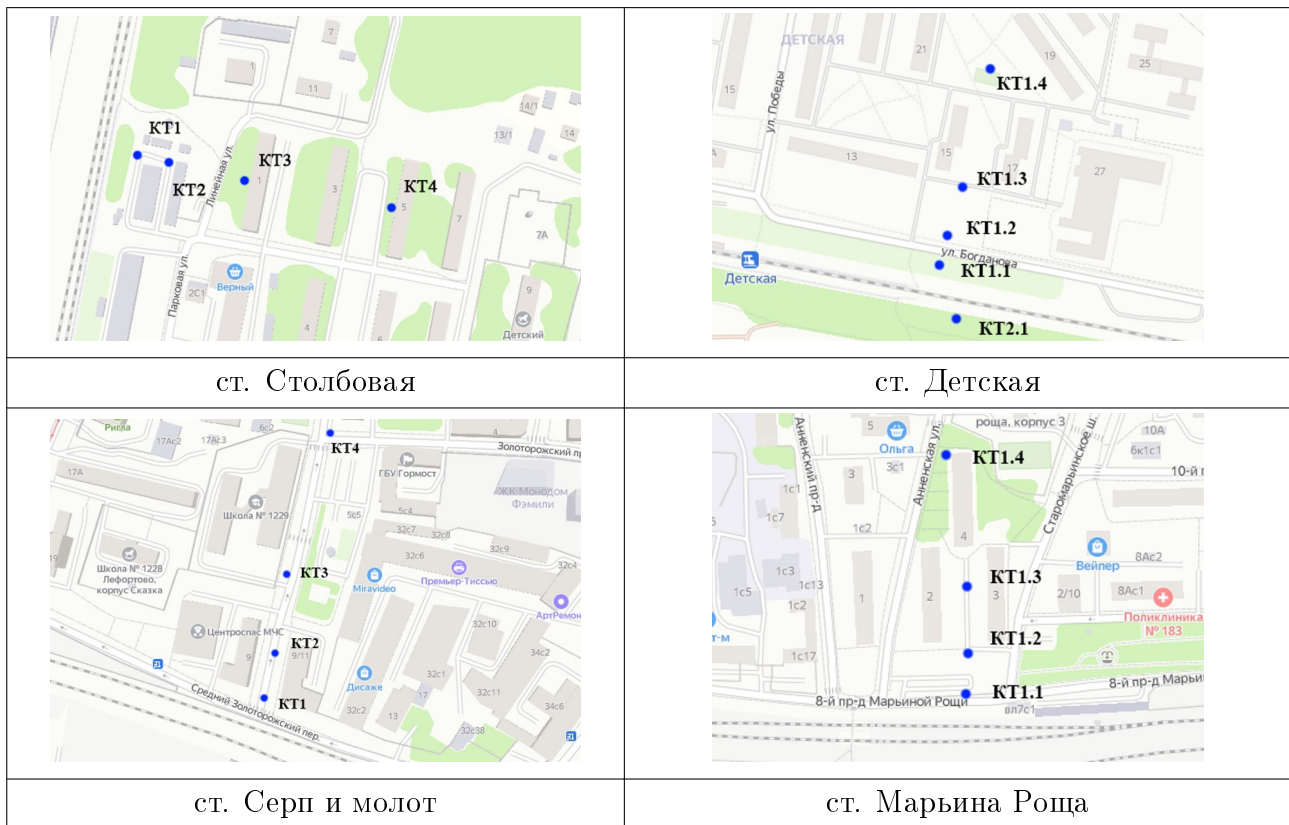


Рис. 1. Примеры схем расположения контрольных точек

В таблице 3 представлены результаты, полученные экспериментальным путем, рассчитанные по формулам 6 – 10 и рассчитанные по ГОСТ 31295.2-2005.

Таблица 3

Сравнение результатов расчета и экспериментальных данных

№ п/п	Участки	Снижение шума, дБА, полученное по		
		Эксперимент	ГОСТ 31295.2	Расчетные формулы
<b>Строчная параллельная застройка</b>				
Затухание 100-200 м, дБА				
1	Ст. Столбовая	14,5	7,9	14,3
2	Ст. Путепровод	12,9	6,8	12,7
3	Ст. Бугач	15,7	15,2	16,6
<b>Ленточная застройка</b>				
Затухание 25-50 м, дБА				
4	Ст. Северное шоссе – ст. Бугач	8,1	4,7	10,6
Затухание 100-200 м, дБА				
5	Ст. Лосиноостровская	20,3	5,7	21,8
6	Ст. Северное шоссе – ст. Бугач	22,6	6,8	20,7
<b>Строчная перпендикулярная застройка</b>				
Затухание 25-50 м, дБА				
7	Ст. Серп и Молот	6,9	8,8	8,4
Затухание 50-100 м, дБА				
8	Пл. Верхние Котлы	5,4	5,1	5,6
Затухание 100-200 м, дБА				
9	Ст. Детская	11,1	8,6	9,7
10	Марьино Роцца	8,8	5,8	10,1
11	Ст. Серп и Молот	5,5	5,3	7,1
12	Ст. Куровская	7,6	4,8	6,4
13	Пл. Верхние Котлы	10,5	8,7	7,7
<b>Периметральная застройка</b>				
Затухание 100-200 м, дБА				
14	ст. Матвеевская – ст. Очаково	12,9	6,1	13,0
15	пос. Железнодорожный	7,9	5,8	8,3
16	пл. Маленковская	15,5	16,0	16,5

На рисунке 2 предоставлено графическое отображение результатов, полученных в таблице 3.

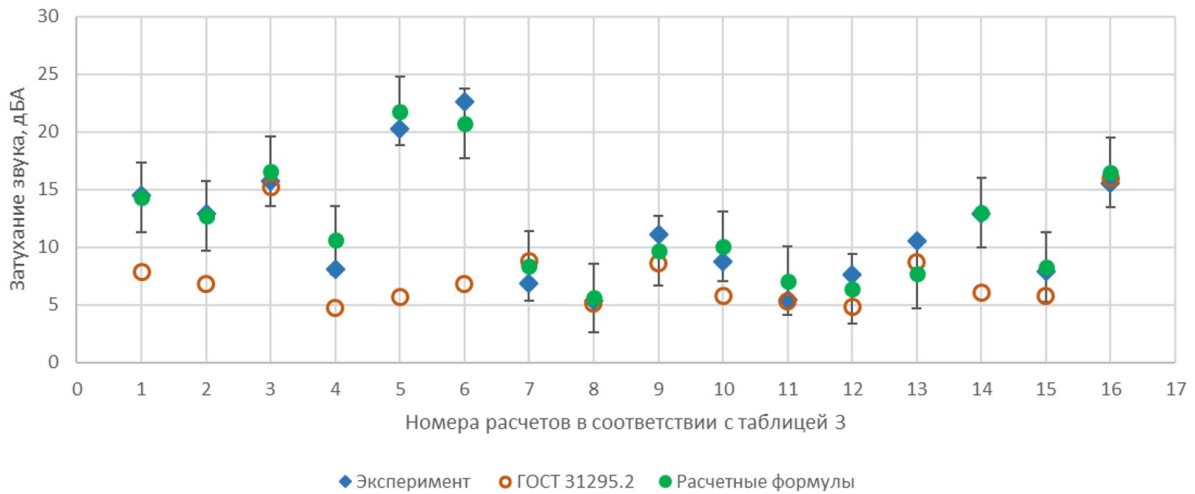


Рис. 2. График затуханий звука, полученных различными способами

Проанализировав результаты расчетов в таблице 3 и график на рисунке 2, можно увидеть, что разница результатов, полученных по расчетным формулам, с результатами эксперимента не превышает 3 дБА, что можно считать хорошей сходимостью [15]. При этом сходимость расчетов по ГОСТ 31295.2 с результатами эксперимента намного ниже: разница между значениями, полученными экспериментальным и расчетным путем, достигает 15 дБА. Это позволяет сделать вывод, что расчет по предлагаемым формулам является более точным, чем расчет по ГОСТ.

### Заключение

Как показывают результаты проведенных исследований, существующие методики расчета распространения звука в условиях городской застройки не учитывают такие важные параметры, характеризующие тип застройки, как отношение длин сторон зданий и высоту застройки. Были найдены зависимости величины затухания звука в застройке от отношений длин сторон зданий и отношений пролетов между зданиями к общей длине рассматриваемого участка.

На основании данных, полученных экспериментальным путем, был найден коэффициент, связывающий два этих параметра, а также определена коррекция, зависящая от шероховатости застройки.

Представленные в данной статье новые расчетные формулы позволяют проводить расчеты уровней звука на территории городской жилой застройки и имеют лучшую сходимость с результатами эксперимента, чем существующие расчетные методики.

### Список литературы

1. Дроздова Л.Ф. Оценка снижения уровней шума зданиями различной формы / Л.Ф. Дроздова, М.В. Буторина, Д.А. Куклин // *Noise Theory and Practice*. 2020. №4 (22) С. 95-102.
2. Germanova, T. Important factor in generating acoustic environment within the territories adjacent to highways / T. Germanova // *Akustika*. – 2021. – Vol. 41. – P. 79-82.



3. Калабин А.В. Виды жилой застройки: современное состояние / А.В. Калабин // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2017. №4 (35) С. 50-58.
4. Крашенинников И.А. Плотность и пористость городской ткани как характеристики застройки / И.А. Крашенинников // Теория и история архитектуры. – 2021. – № 4. – С. 44-64.
5. Васильева А.В. Зависимость снижения шума железнодорожного транспорта в городской застройке от ее параметров / А.В. Васильева // Noise Theory and Practice. – 2024. – Т. 10, № 3(10). – С. 60-68.
6. Шабарова А.В. Снижение шума железнодорожного транспорта в различных типах жилой застройки / А.В. Шабарова, М.В. Буторина // Акустика среды обитания: IX всероссийская конференция молодых ученых и специалистов, Москва, 23-24 мая 2024 года. – Москва: МГТУ им. Баумана, 2024. – С. 408-414.
7. СП 23-104-2004 Оценка шума при проектировании, строительстве и эксплуатации объектов метрополитена. официальное издание М.: Госстрой России, ФГУП ЦПП, 2004 год.
8. ОДМ 218.2.013-2011 «Методические рекомендации по защите от транспортного шума территорий, прилегающих к автомобильным дорогам». Отраслевой дорожный методический документ от 13.12.2012 N 218.2.013-2011.
9. СП 276.1325800.2016 Здания и территории. Правила проектирования защиты от шума транспортных потоков (с Изменениями N 1, 2) Официальное издание. М.: Стандартинформ, 2017 год.
10. ГОСТ Р 54933-2012 Шум. Методы расчета уровней внешнего шума, излучаемого железнодорожным транспортом. Официальное издание. М.: Стандартинформ, 2013 год.
11. Голубничий А.А., Шимкив А.В., Сайфуллин В.Р. Эволюция базовой статистической модели расчета транспортного шума // Современные научные исследования и инновации. 2015. № 1. Ч. 1 [Электронный ресурс]. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2015/01/43485> (дата обращения: 14.10.2024).
12. Bolt R.H. Handbook of acoustic noise control / R.H. Bolt, L.L. Beranek, R.B. Newman // Wright Air Development Center technical report 1952, 52-204.
13. Сумеркин Ю.А. Моделирование тепловой нагрузки на территории городского двора в условиях плотной застройки: специальность 2.1.10 диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: / Сумеркин Юрий Алексеевич – Москва, 2023. 120 с.
14. Шабарова, А.В. Сравнение методов расчета распространения шума железнодорожного транспорта в различных типах застройки / А.В. Шабарова, М.В. Буторина, Д.А. Куклин // Noise Theory and Practice. – 2022. – Т. 8, № 3(30). – С. 16-33.
15. Буторина М.В. Учет погрешностей при построении карт шума / М.В. Буторина, А.В. Осетров, В.В. Светлов, К.П. Фиев // Noise Theory and Practice. - 2020. - Т. 6. - № 4(22). - С. 81-89.

## References

1. Drozdova L.F. Assessment of noise reduction by buildings of various shapes / L.F. Drozdova, M.V. Butorina, D.A. Kuklin // Noise Theory and Practice. 2020. No. 4 (22) P. 95-102.
2. Germanova, T. Important factor in generating acoustic environment within the territories adjacent to highways / T. Germanova // Akustika. – 2021. – Vol. 41. – P. 79-82.

3. Kalabin A.V. Types of residential development: current state / A.V. Kalabin // Academic Bulletin of the UralNIIproekt RAASN. 2017. No. 4 (35) P. 50-58.
4. Krasheninnikov I.A. Density and porosity of urban fabric as characteristics of development / I.A. Krasheninnikov // Theory and history of architecture. - 2021. - No. 4. - P. 44-64.
5. Vasilyeva A.V. Dependence of noise reduction of railway transport in urban development on its parameters / A.V. Vasilyeva // Noise Theory and Practice. - 2024. - Vol. 10, No. 3 (10). - P. 60-68.
6. Shabarova AV Noise reduction of railway transport in various types of residential buildings / AV Shabarova, MV Butorina // Acoustics of the living environment: IX All-Russian Conference of Young Scientists and Specialists, Moscow, May 23-24, 2024. - Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 2024. - P. 408-414.
7. SP 23-104-2004 Noise assessment during the design, construction and operation of metro facilities. official publication M.: Gosstroy of Russia, FSUE CPP, 2004.
8. ODM 218.2.013-2011 "Methodological recommendations for protection from transport noise of areas adjacent to highways". Industry road methodological document dated 13.12.2012 N 218.2.013-2011.
9. SP 276.1325800.2016 Buildings and territories. Rules for designing protection from traffic noise (with Amendments N 1, 2) Official publication. Moscow: Standartinform, 2017.
10. GOST R 54933-2012 Noise. Methods for calculating external noise levels emitted by rail transport. Official publication. Moscow: Standartinform, 2013.
11. Golubnichy A.A., Shimkiv A.V., Saifullin V.R. Evolution of the basic statistical model for calculating transport noise // Modern scientific research and innovation. 2015. No. 1. Part 1 [Electronic resource]. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2015/01/43485> (date of access: 10/14/2024).
12. Bolt R.H. Handbook of acoustic noise control / R.H. Bolt, L.L. Beranek, R.B. Newman // Wright Air Development Center technical report 1952, 52-204.
13. Sumerkin Yu.A. Modeling of heat load on the territory of an urban courtyard in densely populated areas: specialty 2.1.10 dissertation for the degree of candidate of technical sciences: / Sumerkin Yuri Alekseevich - Moscow, 2023. 120 p.
14. Shabarova, A.V. Comparison of methods for calculating the propagation of railway noise in various types of development / A.V. Shabarova, M.V. Butorina, D.A. Kuklin // Noise Theory and Practice. - 2022. - Vol. 8, No. 3 (30). - P. 16-33.
15. Butorina M.V. Accounting for errors in constructing noise maps / M.V. Butorina, A.V. Osetrov, V.V. Svetlov, K.P. Fiev // Noise Theory and Practice. - 2020. - Vol. 6. - No. 4 (22). - P. 81-89.