

**Наджафов Гасан Фамильевич**

*ДВФУ, Политехнический институт (школа), Департамент электроники,  
телекоммуникации и приборостроения*

*Научный руководитель: Сальникова Евгения Николаевна, канд. физ.-мат. наук*

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ  
ЗВУКОИЗОЛЯЦИИ РАЗЛИЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ШУМОЗАЩИТНОГО  
ЭКРАНА ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ТРАНСПОРТНОГО ШУМА В ГОРОДСКОЙ СРЕДЕ**

**Ключевые слова:** шум, шумовое загрязнение, звукоизоляция, измерение шума, шумопоглощающие материалы, шумопоглощающий экран.

Целью работы является оценка эффективности звукоизоляции различных ограждающих конструкций шумозащитных экранов на основе расчета индекса изоляции воздушного шума и выбор наиболее эффективной конструкции для применения в условиях городской транспортной инфраструктуры.

В статье рассмотрена проблема снижения шумового воздействия автомобильного транспорта на прилегающую городскую территорию с использованием шумозащитных экранов. Проведен расчет звукоизоляционных характеристик трех конструкций экранов, отличающихся материалом обшивок и параметрами звукопоглощающего слоя, в соответствии с требованиями действующих нормативных документов. Для каждой конструкции построены частотные характеристики изоляции воздушного шума и определен индекс звукоизоляции. Выполнено сравнение полученных результатов, позволившее оценить влияние толщины листовых обшивок, материала конструкции и параметров звукопоглощающего слоя на акустическую эффективность экранов. По результатам исследования определена конструкция, обеспечивающая наибольшую эффективность снижения транспортного шума и рекомендованная для применения в городских условиях.

**ВВЕДЕНИЕ**

Одной из наиболее актуальных экологических проблем современных городов является повышенный уровень транспортного шума, оказывающий негативное влияние на здоровье населения, комфорт проживания и качество городской среды. Основным источником акустического загрязнения являются автомобильные дороги с высокой интенсивностью движения, где уровни шума нередко превышают допустимые значения, установленные санитарными нормами.

Наиболее распространенным мероприятием по снижению шумового воздействия является установка шумозащитных экранов. Эффективность таких конструкций определяется не только их геометрическими параметрами, но и материалом ограждающих элементов, толщиной листовых обшивок, характеристиками звукопоглощающего слоя и конструктивным исполнением в целом. Поэтому выбор оптимальной конструкции шумозащитного экрана требует предварительной оценки его акустических характеристик.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

- выполнить расчет частотной характеристики изоляции воздушного шума для многослойной ограждающей конструкции графоаналитическим методом в соответствии с требованиями действующих нормативных документов [4];
- определить индекс изоляции воздушного шума для исследуемых конструкций шумозащитных экранов;
- выполнить расчеты для нескольких вариантов конструкций, отличающихся материалом обшивок, толщиной листов и параметрами звукопоглощающего слоя;
- провести сравнительный анализ акустической эффективности исследуемых конструкций;
- определить конструкцию шумозащитного экрана, обеспечивающую наибольшую эффективность снижения транспортного шума и рекомендовать ее для применения в городских условиях.

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Метод расчета и построения частотной характеристики, представленный в СП [4] подразумевает расчет звукоизоляции путем построения кривой звукоизоляции, имеющей на определенных участках линейную зависимость с конкретным углом наклона.

Для построения графика рассчитаны координаты точек В и С для соответствующего материала по таблице 1, при этом значения  $f_B$  и  $f_C$  округляются до ближайшей среднегеометрической частоты треть октавной полосы. На рисунке 1 прямую АВ следует принимать 4,5 дБ на октаву, участок CD – 7,5 дБ на октаву. Примем толщину листа стали  $h = 5$  мм, а толщина воздушной прослойки, заполненной звукопоглотителем  $d = 12$  мм. В качестве звукопоглотителя были выбраны минеральные акустические плиты плотностью  $15 \text{ кг/м}^3$ .

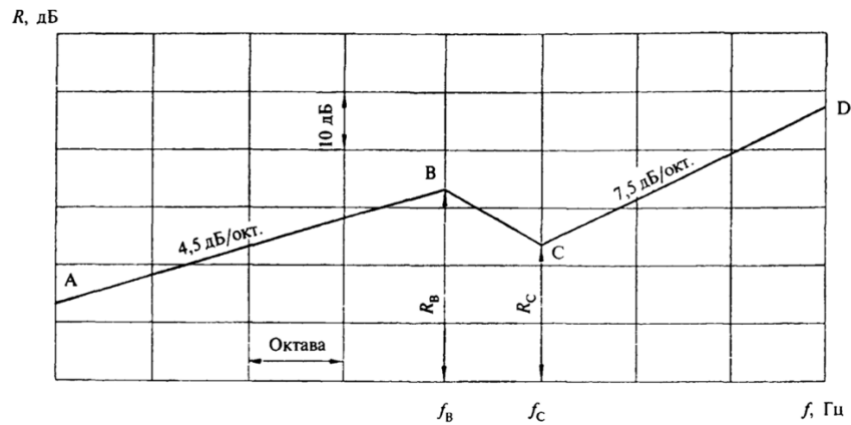


Рисунок 1 – Частотная характеристика изоляции однослойным тонким ограждением

Таблица 1 – Данные для расчета частотных характеристик звукоизоляции для выбранного материала(сталь)

| Материалы | Плотность, кг/м <sup>3</sup> | $f_B$ , Гц | $f_C$ , Гц | $R_B$ , дБ | $R_C$ , дБ |
|-----------|------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| Сталь     | 7800                         | 6000/h     | 12000/h    | 40         | 32         |

$$f_b = \frac{6000}{5} = 1200 \text{ Гц.}$$

$$f_c = \frac{12000}{5} = 2400 \text{ Гц.}$$

Согласно данным из таблицы 1 и рисунку 1 построим расчетную частотную характеристику (ломанную прямую ABCD) одной листовой обшивки. в таблице 2 приведены данные для расчетной частотной характеристики.

Таблица 2 – расчетная частотная характеристика

|      |     |      |     |      |     |      |     |      |     |      |      |      |      |      |      |
|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|------|------|------|------|------|------|
| 100  | 125 | 160  | 200 | 250  | 315 | 400  | 500 | 630  | 800 | 1000 | 1250 | 1600 | 2000 | 2500 | 3150 |
| 23,5 | 25  | 26,5 | 28  | 29,5 | 31  | 32,5 | 34  | 35,5 | 37  | 38,5 | 40   | 37,4 | 34,8 | 32   | 34,5 |

Частоту резонанса двуслойной конструкции с воздушным зазором толщиной d можно определить выражением [4]:

$$f_r = 60 * \sqrt{\frac{m_1 + m_2}{d * m_1 * m_2}},$$

где  $m_1$  и  $m_2$  – это поверхностные плотности 1 и второй стенки ограждающей конструкции.

$$m_1 = \rho_1 * h$$

Поверхностные плотности  $m_1$  и  $m_2$  равны так как толщины передней и задней стенок, сделанных из одинакового материала в данной конструкции, будут одинаковыми.

$$m_1 = m_2 = 39 \text{ кг/м}^2$$

Исходя из этого значение резонансной частоты составляет:

$$f_r = 60 * \sqrt{\frac{2}{d * m}} = 124 \text{ Гц}$$

Округляем до ближайшего значения треть-октавного диапазона 125 Гц.

В ходе расчета также нужно учитывать поверхностную плотность звукопоглощающего слоя, выполненного из пористого материала (минеральной ваты) толщиной  $d$  и плотностью  $\rho_{zp} = 15 \text{ кг/м}^3$ :

$$m_{zp} = \rho_{zp} * d$$

$$m_{zp} = 0,18 \text{ кг/м}^2$$

Общая поверхностная плотность может быть найдена как сумма поверхностных плотностей передней и задней стенок, а также поглотителя

$$m_{ob} = m_1 + m_2 + m_{zp} = 78,18 \text{ кг/м}^2$$

Из отношения  $m_{ob}/m_1$  согласно таблице 3 определим  $\Delta R_1=4,5$  дБ.

Таблица 3 – Значение поправки  $\Delta R_1$  для многослойной ограждающей конструкции

| $m_{ob}/m_1$ | $\Delta R_1$ , дБ |
|--------------|-------------------|
| 1,7          | 3,5               |
| 1,8          | 4                 |
| 2            | 4,5               |
| 2,2          | 5                 |
| 2,3          | 5,5               |

С учетом поправки  $\Delta R_1 = 4,5$  дБ построим ломанную прямую ( $A_1 B_1 C_1 D_1$ )

Вычислим абсциссу точки Е, Гц:

$$f_e = 0,8 * f_r = 0,8 * 125 = 100 \text{ Гц}$$

На участке  $A_1 B_1$  на полученной частоте  $f_e = 100$  Гц, отложим точку Е.

$$R_e = 28 \text{ дБ}$$

На абсциссе равной резонансной частоте  $f_r = 125$  Гц отметим точку F с ординатой:

$$R_f = 25 + 4,5 - 4 = 25,5 \text{ дБ}$$

На частоте  $f_k = 8 * f_r = 1000$  Гц отметим точку К с ординатой:

$$R_k = R_f + H,$$

где H – поправка при использовании многослойной конструкции.

Значение H можно определить по таблице 4.

Таблица 4 – значение величины H для многослойной ограждающей конструкции

| Толщина поглощающего слоя | Величина H, дБ |
|---------------------------|----------------|
| 15-25                     | 22             |
| 50                        | 24             |
| 100                       | 26             |
| 150                       | 27             |
| 200                       | 28             |

$$R_k = 25,5 + H = 47,5 \text{ дБ}$$

На прямой FK на частоте  $f_{q'} = 1,6 * f_r = 200$  Гц отметим точку Q’

Ординату точки Q можно определить с учетом поправки  $\Delta R_4$ , которую можно определить по таблице 5.

Таблица 5 – Значения поправки  $\Delta R_4$  для многослойной ограждающей конструкции с заполнением промежутка между обшивками звукоизоляционным материалом

| Материал заполнения                                 | Процент заполнения, % | $\Delta R_4$ |
|-----------------------------------------------------|-----------------------|--------------|
| Пористо-волоконистый материал<br>(минеральная вата) | 20                    | 2            |
|                                                     | 30                    | 3            |
|                                                     | 40                    | 4            |
|                                                     | 50-100                | 5            |
| Пористый с жестким скелетом                         | 100                   | 3            |

$$R_q = R_{q'} + \Delta R_4 = 32 + 5 = 37 \text{ дБ}$$

Далее до частоты  $f_b$  проводится прямая KL под наклоном 4,5 дБ на октаву и в абсциссе  $f_b$  находится ордината  $R_l$ . До следующей треть-октавной полосы проводится горизонтальная прямая LM. На частоте  $f_c$  отмечается точка N с ординатой:

$$R_n = R_{C_1} + \Delta R_2$$

$\Delta R_2$  равняется расстоянию между точками K и K' по оси ординат

Отрезок MN таким образом должен идти под наклоном 7,5 дБ на октаву, в нашем расчете точка N, будет находиться вне рассматриваемого диапазона частот.

На рисунке 2 представлен график частотной характеристики изоляции воздушного шума описанной ограждающей конструкции.

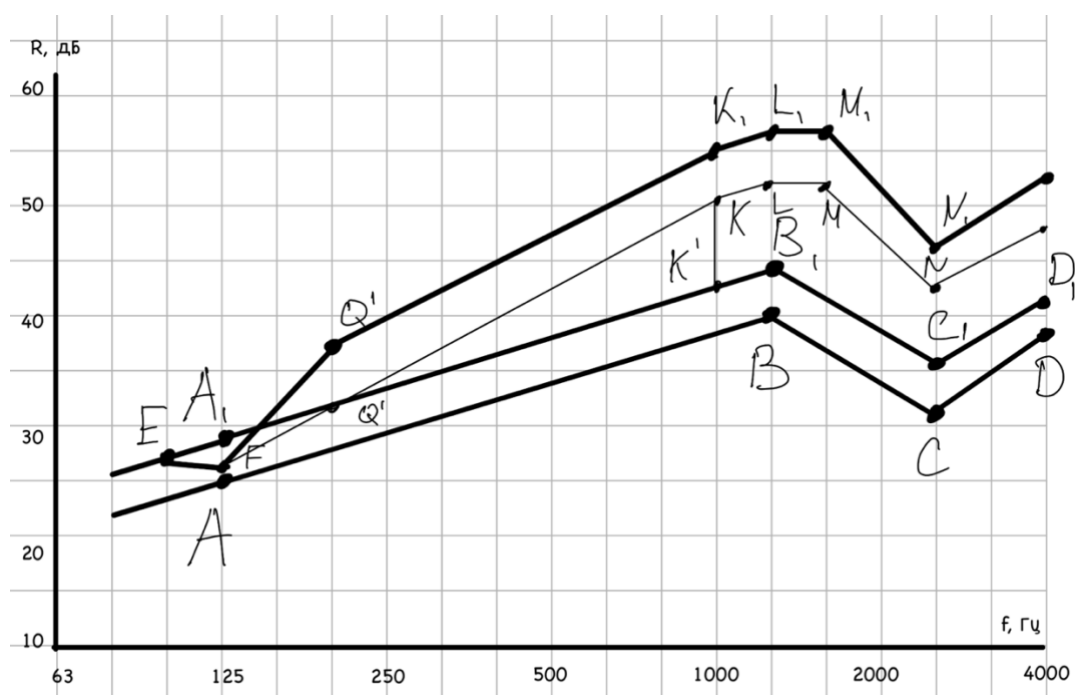


Рисунок 2 – график частотной характеристики изоляции воздушного шума ограждающей конструкции, состоящей из двух стальных листов толщиной 5 мм и шумопоглощающего материала толщиной 12 мм

Для определения индекса звукоизоляции данного ограждения необходимо сравнить полученную ломанную прямую  $EAQK_1L_1M_1N_1$  с оценочной кривой.

Рассчитанные значения звукоизоляции ограждения в 1/3-октавных полосах частот нормируемого диапазона, нормативные значения оценочной линии, а также расчет суммы неблагоприятных отклонений приведены в таблице 6.

Под неблагоприятными отклонениями понимаются значения звукоизоляции рассчитанной кривой ниже значений оценочной кривой на данной частоте. Индексом звукоизоляции будет являться значение сдвинутой оценочной кривой на частоте 500 Гц при сумме неблагоприятных отклонений менее 32 дБ.

Таблица 6 – расчет индекса изоляции воздушного шума для предложенного мероприятия

| Пара-метр | Значения |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |      |
|-----------|----------|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|
| Частота   | 100      | 125 | 160  | 200 | 250 | 315 | 400 | 500 | 630 | 800 | 1000 | 1250 | 1600 | 2000 |
| $R_i$     | 28       | 26  | 31,5 | 37  | 40  | 42  | 45  | 48  | 50  | 53  | 55   | 51   | 51   | 46   |
| $R_{оп}$  | 33       | 36  | 39   | 42  | 45  | 48  | 51  | 52  | 53  | 54  | 55   | 56   | 56   | 56   |
| НО        | 5        | 10  | 7,5  | 5   | 5   | 6   | 6   | 4,5 | 3   | 1   | 0    | 5    | 5    | 10   |
| $R'_{оп}$ | 29       | 32  | 35   | 38  | 41  | 44  | 47  | 48  | 49  | 50  | 51   | 52   | 52   | 52   |
| НО'       | 1        | 6   | 3,5  | 1   | 1   | 2   | 2   | 0,5 | 0   | 0   | 0    | 1    | 1    | 6    |

При сдвиге оценочной кривой на – 4 дБ сумма неблагоприятных отклонений составляет 27 дБ, в иных случаях получается либо больше 32 либо меньше 27

Следовательно индекс изоляции воздушного шума будет составлять 48 дБ (значения сдвинутой оценочной кривой на частоте 500 Гц).

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ДРУГИХ КОНСТРУКЦИЙ

По данной методике были проведены расчеты индекса звукоизоляции для подобной конструкции с меньшей толщиной листа  $h = 2$  мм и большим промежутком заполнения звукопоглотителя  $d = 25$  мм, а также для двуслойной конструкции из алюминиевых листов толщиной  $h = 5$  мм и воздушным промежутком  $d = 20$  мм. В таблице 7 представлены основные характеристики выбранных мероприятий и значения характерных точек для построения частотной характеристики.

Таблица 7 – характеристики предложенных конструкций

| Характеристика/характерная точка | Конструкция 2           | Конструкция 3          |
|----------------------------------|-------------------------|------------------------|
| $f_b$                            | 3000 Гц                 | 1200 Гц                |
| $f_c$                            | 6000 Гц                 | 2400 Гц                |
| $m_1$                            | 15,6 кг/м <sup>2</sup>  | 13,5 кг/м <sup>2</sup> |
| $m_{zp}$                         | 0,375 кг/м <sup>2</sup> | –                      |
| $\Delta R_1$                     | 4,5 дБ                  | 4,5 дБ                 |
| $f_r$                            | 135 Гц                  | 163 Гц                 |
| Точка E                          | 23,5 дБ                 | 22 дБ                  |
| Точка F                          | 21 дБ                   | 19 дБ                  |
| Точка Q                          | 31 дБ                   | –                      |
| Точка $K_1$                      | 49 дБ                   | 40 дБ                  |
| Точка $L_1$                      | 52 дБ                   | 41,5 дБ                |
| Точка $M_1$                      | 52 дБ                   | 41,5 дБ                |

График частотной характеристики для конструкции 2 из стальных листов толщиной 2 мм и прослойкой звукоизолятора толщиной 25 мм представлен на рисунке 3.

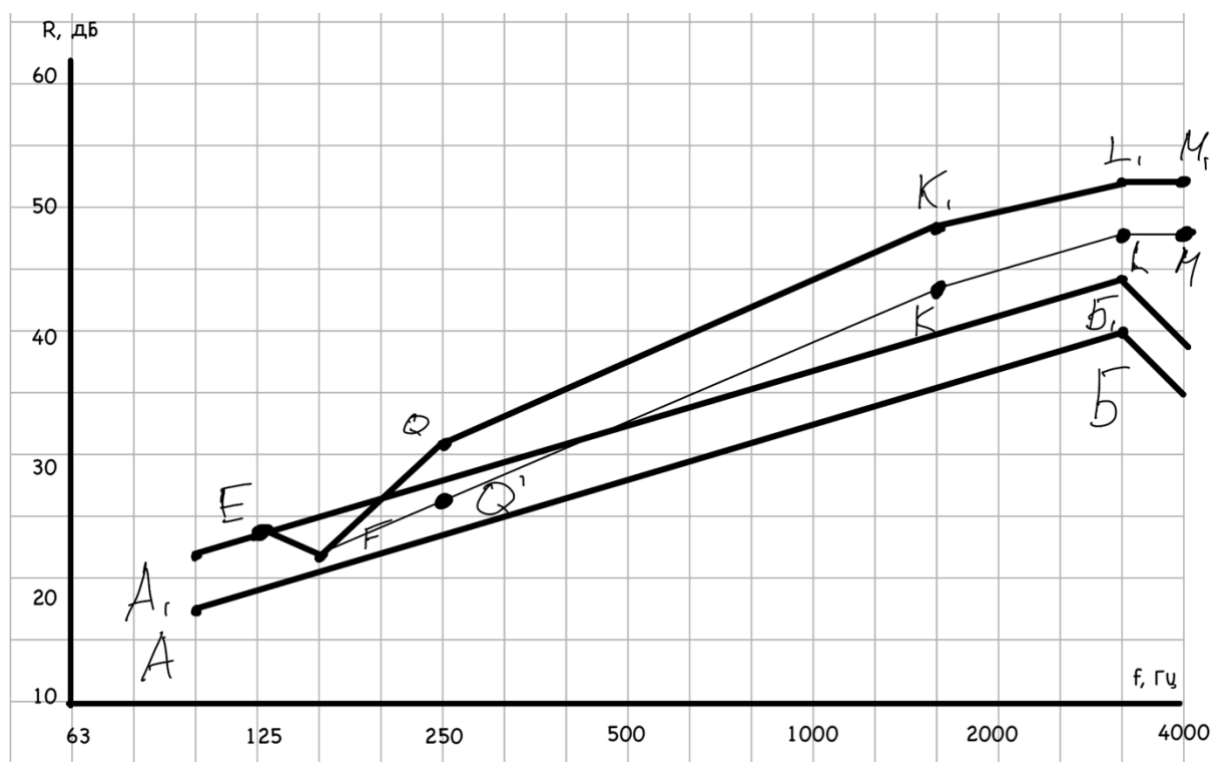


Рисунок 3 – график частотной характеристики изоляции воздушного шума ограждающей конструкции, состоящей из двух стальных листов толщиной 2 мм и шумопоглощающего материала толщиной 25 мм

Для второй конструкции результаты расчета приведены в таблице 8.

Таблица 8 – расчет индекса изоляции воздушного шума для двуслойного экрана с толщиной листа 2 мм и промежутком звукопоглотителя 25 мм.

| Частота   | 100 | 125  | 160 | 200 | 250 | 315  | 400  | 500 | 630  | 800 | 1000 | 1250 | 1600 | 2000 |
|-----------|-----|------|-----|-----|-----|------|------|-----|------|-----|------|------|------|------|
| $R_i$     | 22  | 23,5 | 21  | 26  | 31  | 33,5 | 35,5 | 37  | 39,5 | 42  | 44,5 | 46,5 | 49   | 50   |
| $R_{оп}$  | 33  | 36   | 39  | 42  | 45  | 48   | 51   | 52  | 53   | 54  | 55   | 56   | 56   | 56   |
| НО        | 11  | 12,5 | 18  | 16  | 14  | 14,5 | 15,5 | 15  | 13,5 | 12  | 10,5 | 9,5  | 7    | 6    |
| $R'_{оп}$ | 22  | 25   | 28  | 31  | 34  | 37   | 40   | 41  | 42   | 43  | 44   | 45   | 45   | 45   |
| НО'       | 0   | 1,5  | 7   | 5   | 3   | 3,5  | 4,5  | 4   | 2,5  | 1   | 0    | 0    | 0    | 0    |

При сдвиге оценочной кривой на – 11 дБ сумма неблагоприятных отклонений составляет 32 дБ, следовательно индекс изоляции воздушного шума будет составлять 41 дБ (значения сдвинутой оценочной кривой на частоте 500 Гц). Тем самым можно сделать вывод что данная конструкция 2 будет менее эффективна при воздействии низкочастотного автомобильного шума, в отличии от первой конструкции с толщиной листов 5 мм и прослойкой звукопоглотителя 12 мм.

График частотной характеристики для конструкции 3 из алюминиевых листов толщиной 5 мм и воздушной прослойкой толщиной 20 мм представлен на рисунке 4.

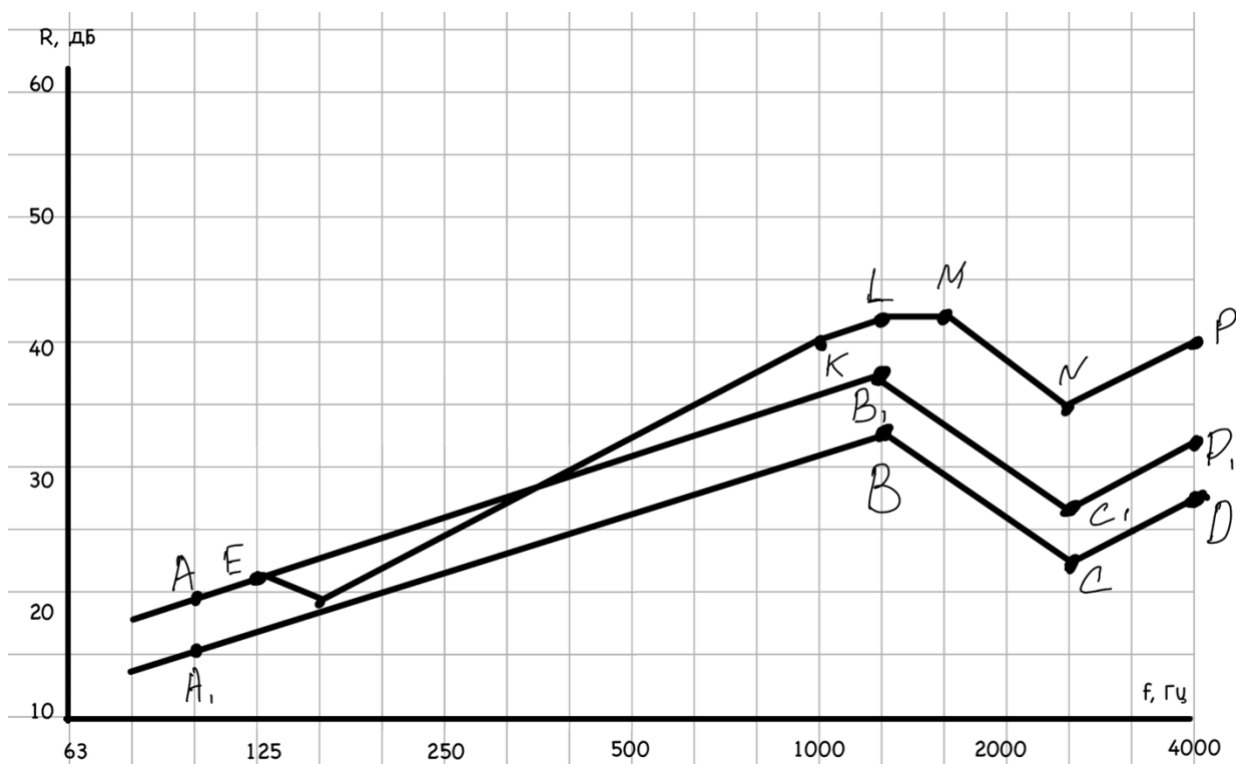


Рисунок 3 – график частотной характеристики изоляции воздушного шума ограждающей конструкции, состоящей из двух алюминиевых листов толщиной 5 мм и воздушной прослойкой 20 мм

Для второй конструкции результаты расчета приведены в таблице 9.

Таблица 9 – расчет индекса изоляции воздушного шума для двуслойного экрана с толщиной листа 5 мм и воздушным промежутком 20 мм.

| Частота   | 100  | 125 | 160 | 200 | 250  | 315 | 400  | 500       | 630 | 800 | 1000 | 1250 | 1600 | 2000 |
|-----------|------|-----|-----|-----|------|-----|------|-----------|-----|-----|------|------|------|------|
| $R_i$     | 20,5 | 22  | 19  | 22  | 24,5 | 27  | 29,5 | 32,5      | 35  | 38  | 41   | 42,5 | 42,5 | 38   |
| $R_{оп}$  | 33   | 36  | 39  | 42  | 45   | 48  | 51   | 52        | 53  | 54  | 55   | 56   | 56   | 56   |
| НО        | 12,5 | 14  | 20  | 20  | 20,5 | 21  | 21,5 | 19,5      | 18  | 16  | 14   | 13,5 | 13,5 | 18   |
| $R'_{оп}$ | 17   | 20  | 23  | 26  | 29   | 32  | 35   | <b>36</b> | 37  | 38  | 39   | 40   | 40   | 40   |
| НО'       | 0    | 0   | 4   | 4   | 4,5  | 5   | 5,5  | 3,5       | 2   | 0   | 0    | 0    | 0    | 2    |

При сдвиге оценочной кривой на  $-16$  дБ сумма неблагоприятных отклонений составляет 30,5 дБ, следовательно индекс изоляции воздушного шума будет составлять 36 дБ (значения сдвинутой оценочной кривой на частоте 500 Гц). Тем самым можно сделать вывод что данная конструкция будет менее эффективна в отличии от других конструкций, расчет эффективности которых был проведен выше.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования была проведена оценка звукоизоляционной эффективности трех конструкций шумозащитных экранов, отличающихся материалом обшивок, толщиной листовых элементов и параметрами звукопоглощающего слоя. Расчет частотных характеристик изоляции воздушного шума выполнен графоаналитическим методом в соответствии с требованиями действующих нормативных документов, что позволило определить индексы изоляции воздушного шума для каждой исследуемой конструкции.

По результатам расчетов установлено, что наибольшей акустической эффективностью обладает конструкция, состоящая из двух стальных листов толщиной 5 мм с прослойкой звукопоглощающего материала толщиной 12 мм. Индекс изоляции воздушного шума данной конструкции составил 48 дБ, что превышает аналогичные показатели остальных рассмотренных вариантов. Конструкция из двух стальных листов толщиной 2 мм с прослойкой звукопоглощающего материала толщиной 25 мм обеспечила индекс звукоизоляции 41 дБ, а конструкция из алюминиевых листов толщиной 5 мм с воздушной прослойкой 20 мм — 36 дБ.

Сравнительный анализ показал, что применение более толстых стальных листов совместно со звукопоглощающим материалом обеспечивает более высокую эффективность снижения транспортного шума, особенно в диапазоне частот, характерном для автомобильного транспорта. Увеличение толщины воздушной прослойки при уменьшении

толщины обшивок не компенсирует снижение звукоизоляционных свойств конструкции, а использование алюминиевых листов без заполнения звукопоглощающим материалом приводит к наименьшей эффективности.

Таким образом, поставленная цель исследования достигнута. Выполненные расчеты позволили оценить акустическую эффективность различных конструкций шумозащитных экранов и определить наиболее рациональный вариант для применения в условиях городской транспортной инфраструктуры. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании шумозащитных мероприятий, направленных на снижение негативного воздействия транспортного шума на городскую среду.

### **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Наджафов Г. Ф. Сравнительный анализ и разработка мероприятий по снижению шума селитебной зоны большого Владивостока / Г. Ф. Наджафов // Материалы региональной научно-практической конференции (Владивосток, май – июнь 2025 г.). — Владивосток : Дальневост. федер. ун-т, 2025. — С. 335
2. Наджафов Г. Ф. Сравнительный анализ и разработка мероприятий по снижению шума селитебной зоны большого Владивостока/ Г. Ф. Наджафов // Наука, техника, промышленное производство: история, современное состояние, перспективы: материалы региональной науч.- практич.конф. молодых ученых (Владивосток, 15 декабря 2025 – 16 января 2026 гг.) – Владивосток :Дальневост. федерал.ун-т, 2026. – С. 424–428
3. Боголепов И. И. Современные способы борьбы с шумом в зданиях и на селитебных территориях/ И. И. Боголепов// Инженерно-строительный журнал, №2 – Санкт-Петербург, 2008.
4. СП 23-103-2003 Проектирование звукоизоляции ограждающих конструкций жилых и общественных зданий// Госстрой России – Москва, 2004.