

Расчет и исследование снижения шума автотранспортного потока шумозащитным экраном

В.В. Тупов, доцент, канд. техн. наук

О.А. Черешнева, студент

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

e-mail: tupov-vladimir@rambler.ru

Ключевые слова:

автотранспортный шум,
шумозащитный экран,
дифракция звука,
октавный спектр,
акустическая эффективность экрана,
эффект установки экрана.

Применение шумозащитных экранов (ШЭ) – эффективный и относительно недорогой способ защиты примагистральной территории от шума автотранспортных потоков (АТП). В инженерных расчетах часто ШЭ рассматриваются бесконечно протяженным, не учитывая явление дифракции звука на его боковых кромках. Предлагаемый метод расчета позволяет учесть дифракционные процессы по всему открытому периметру ШЭ, благодаря чему повышается точность вычисления эффекта его установки. Исследован вклад звука, дифрагированного на боковых кромках экрана, в общий шум АТП в расчетной точке (РТ) в зависимости от ее положения относительно ШЭ, его размеров и звукопоглощающих свойств поверхности примагистральной территории. Получены математические зависимости для расчета снижения шума за счет ряда факторов вместо традиционно применяемых таблиц, номограмм и графиков, что упрощает процесс программирования.

1. Введение

Наблюдающееся в последние годы интенсивное увеличение числа транспортных средств приводит к существенному возрастанию уровня шума в городах, часто превышающего нормативные значения. Известно, что автомобильный транспорт относится к главным источникам шумового загрязнения среды в городской застройке [1, 2]. Воздействие высокого уровня шума приводит к ухудшению сна и физического состояния людей, повышению числа заболеваний сердечно-сосудистой и нервной систем организма.

Снижение уровня автотранспортного шума обеспечивается различными способами, в том числе строительно-акустическими. Практика борьбы с шумом показывает, что весьма эффективным и относительно недорогим средством защиты являются акустические экраны, устанавливаемые вдоль транспортных магистралей [1, 3]. Экраны защищают от шума прилегающие к магистрали территории, на которых могут располагаться жилые, общественные и производственные объекты.

2. Постановка задачи исследования

Процесс проектирования шумозащитных экранов (ШЭ) предусматривает предварительную оценку ожидаемого снижения шума на защищаемой территории в результате их установки. Однако не всегда удается обеспечить требуемую величину снижения шума, так как реальная эффективность экрана может оказаться ниже расчетных значений. Погрешность может составить до 5дБА. В связи с этим совершенствование акустического расчета ШЭ применительно к шуму автотранспортных потоков (АТП) становится актуальной и практически важной задачей.

Проведенный анализ источников информации показал, что пока отсутствует достаточно точный и в то же время универсальный метод расчета ШЭ [1, 3]. Сложность математического описания дифракционных процессов на ШЭ заставляет исследователей вводить ряд упрощающих задачу допущений. Например, рассматривают экран полубесконечным, т.е. не учитывают дифракцию на его боковых кромках [4, 5], применяют ШЭ для защиты от шума

точечных источников излучения [6, 7], предлагают методы расчета, которые обеспечивают точность в ограниченном диапазоне частот [8]. Более совершенны методы расчета, в которых учитывается ограниченность длины экрана и потери акустической энергии в процессе распространения звука от АТП до расчетной точки (РТ) [9, 10]. В [11] предлагаются формулы расчета акустической эффективности экрана и его длины, даны рекомендации по повышению акустической эффективности ШЭ. Однако в перечисленных методах отсутствуют оценка точности расчетов, влияния дифракции на боковых кромках на эффект установки экрана, обоснованность определения его длины.

3. Обоснование модели автотранспортного потока

Применительно к дальнему звуковому полю автотранспортные средства (АТС) могут быть представлены в виде всенаправленных сферических излучателей шума [2]. Уровень звука (УЗ) от одиночных АТС при условии отсутствия потерь акустической энергии уменьшается на 6 дБА при удвоении расстояния от них до точки наблюдения. По мере возрастания интенсивности АТП характер распространения звука приближается к закону распространения акустических волн от линейного источника, т.е. УЗ снижается только на 3 дБА при увеличении расстояния в 2 раза. Таким образом, если АТС располагаются достаточно близко друг к другу, то можно принять, что точечные источники шума образуют в комбинации непрерывный линейный источник с суммарной акустической мощностью, равномерно распределенной вдоль эквивалентной линии источников, представляющей собой траекторию движения АТП [3]. Тогда фронт звуковой волны имеет форму цилиндра с осью, совпадающей с эквивалентной линией источников шума (ИШ). Такая волна претерпевает дифракцию одновременно всеми точками по длине фронта на всей верхней кромке ШЭ, расположенного параллельно эквивалентной линии ИШ. Поэтому расчет эффективности такого экрана можно осуществлять в соответствии с методикой, предложенной Маекавой [12] и развитой затем в ряде исследований.

При рассмотрении дифракции на боковых кромках экрана линейное моделирование АТП не приемлемо. В этом случае его удобно представить в виде модели, состоящей из определенного числа некогерентных ненаправленных точечных ИШ равной звуковой мощности, расположенных по одной прямой линии на одинаковом расстоянии один от другого [13], зависящем от интенсивности АТП и скорости его движения. Этот подход к моделированию АТП применен в данной работе.

4. Описание структурной схемы исследования

В настоящем исследовании рассматривается одностороннее параллельное расположение ШЭ относительно прямолинейной магистрали; не учитывается отражение звука от ее покрытия, от экрана и других объектов; принимается, что ИШ, ШЭ и РТ находятся на горизонтальной поверхности одного уровня. Изучение и учет в расчетах шума, излучаемого АТП вне участка, который закрывает проектируемый ШЭ, не входит в круг задач данной работы.

При оценке эффекта установки ШЭ сначала рассматривался уровень шума АТП в РТ без экрана, затем при дифракции только на верхней кромке экрана, а потом то же при дифракции на его боковых кромках. Методом энергетического суммирования полученных результатов при наличии экрана получали уровень шума, дифрагированного по всему открытому периметру ШЭ. Посредством сопоставления полученных значений оценивался прирост уровня шума в РТ за счет дифракции на боковых кромках и соответствующее снижение эффекта установки экрана. Рассмотрены ШЭ разных размеров, несколько вариантов размещения РТ относительно экрана на акустически мягкой и акустически жесткой поверхности территории. Предложен ряд математических зависимостей вместо номограмм, графиков и таблиц.

5. Расчет эффекта установки экрана при дифракции звука на его верхней кромке

Сначала рассчитываем УЗ и уровень звукового давления (УЗД) в каждой j -й октавной полосе частот до установки ШЭ:

$$L_A = L_A^{\text{экв}} - \Delta L_A^{\text{рас}} - \Delta L_A^{\text{воз}} - \Delta L_A^{\text{пок}} - \Delta L_A^{\text{В/Т}} - \Delta L_A^{\text{зел}} - \Delta L_A^{\alpha}, \text{ дБА} \quad (1)$$

$$\text{и } L_j = L_A + \Delta L_{T,j}, \text{ дБ} \quad (2)$$

где $\Delta L_{T,j}$ — коррекция формы спектра шума ТП в каждой j -й октавной полосе частот. Значения коррекции определяются экспериментально или ориентировочно берутся по табл. 1 [14].

Шумовую характеристику $L_A^{\text{экв}}$ АТП в первом приближении рассчитываем по полученной эмпирической формуле:

$$L_A^{\text{экв}} = 10 \lg N + 13,3 \lg V + 8,4 \lg r + 4(s - 0,13)^{-1} - 0,0079s^2 + q0,51 \lg(0,5r + 2,8) + P + 8,5, \text{ дБА}, \quad (3)$$

Таблица 1

Ориентировочные значения коррекции спектра шума АТП

$f_{\text{ср},j}$, Гц	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
$\Delta L_{T,j}$, дБ	+13	+7	+2	-3	-7	-10	-16	-22

где: N — интенсивность движения (количество единиц АТС, проехавших в обоих направлениях за один час), 1/ч;

V — средневзвешенная скорость движения АТП, км/ч;

r — доля грузовых АТС и средств общественного транспорта в составе АТП, %;

s — число полос движения;

q — продольный уклон магистрали, %;

P — тип покрытия (асфальтобетонное $P = 0$, цементобетонное $P = 3$ дБА).

Вычисляем, используя данные [14], снижение УЗ вследствие дивергенции акустических волн с расстоянием L_A^{pac} , потери при распространении их в воздухе $L_A^{вoз}$ и поглощение звука поверхностью (покрытием) территории $\Delta L_A^{пoк}$ по полученным эмпирическим формулам:

$$\Delta L_A^{pac} = 10 \lg \left[\sqrt{(h_{PT} - h_{иш})^2 + c_1^2} + \left(\frac{s}{4}\right)^2 \right] - \sqrt[3]{s} \left(\ln s - \frac{\sqrt{(s-3,8)^2}}{s} \right) - 8,3, \text{ дБА}, \quad (4)$$

где: $h_{иш}$ и h_{PT} — высота акустического центра ИШ и высота нахождения РТ над поверхностью территории, м;

$c_1 = l + D + a/2$ — расстояние от РТ до оси ближайшей полосы движения АТС, м;

l и D — расстояние от ШЭ до РТ и до бровки дороги, м;

a — ширина одной полосы движения АТС, м.

Погрешность расчета по формуле (4) не превышает 0,5 дБА относительно исходных данных в диапазоне $20 \leq c_1 \leq 1000$ м:

$$\Delta L_A^{вoз} = 0,005 \sqrt{(h_{PT} - h_{иш})^2 + c_1^2}, \text{ дБА}. \quad (5)$$

При акустически мягкой территории:

$$\Delta L_A^{пoк} = 5 \ln(c_2 / h_{PT}) - 3,45 h_{иш} - 8,09, \text{ дБА}, \quad (6)$$

здесь $c_2 = l + D$ м, а при акустически жесткой — $\Delta L_A^{пoк} = 0$.

Погрешность вычислений по формуле (6) не превышает 0,5 дБА в диапазоне $10 \leq \frac{c_2}{h_{PT}} \leq 70$.

Поправка $\Delta L_A^{B/T}$, с помощью которой учитываем влияние турбулентности воздуха и воздействие ветра на процесс распространения звука [11], описывается зависимостью:

$$\Delta L_A^{B/T} = \frac{3}{1,6 + 10^5 / c_1^2}, \text{ дБА}. \quad (7)$$

Эта формула получена при усреднении по различным температурным условиям и в предположении, что частота всех направлений ветра равновероятна.

Загухание звука в шумозащитной полосе зеленых насаждений при их наличии приблизительно описывается выражением [11]:

$$\Delta L_A^{зeп} = 0,08z, \text{ дБА}, \quad (8)$$

где $10 \leq z \leq 100$ м — ширина шумозащитной полосы, а при обычной посадке зеленых насаждений их шумозащитный эффект не учитывается, т.е. $\Delta L_A^{зeп} = 0$.

Поправку, связанную с ограничением угла видимости из РТ участка магистрали, который будет закрыт проектируемым экраном, рассчитываем по формуле:

$$\Delta L_A^{\alpha} = 10 \lg \left(\frac{\pi}{\alpha} \right), \text{ дБА}, \quad (9)$$

где α — угол видимости, рад.

Обобщая данные исследований указанных выше авторов, мы получили выражения для расчета акустической эффективности ШЭ при дифракции звука только на его верхней кромке в каждой j -й октавной полосе частот:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta L_{1,j}^{эк} = 10,8 + 4,8 \lg \left(\frac{F_j}{170} \right), \text{ дБ при } 17 \leq F_j \leq 68; \\ \Delta L_{1,j}^{эк} = 11,6 + 8,4 \lg \left(\frac{F_j}{170} \right), \text{ дБ при } 68 < F_j \leq 14\,000; \\ \Delta L_{1,j}^{эк} = 28 \text{ дБ при } F_j > 14\,000, \end{array} \right. \quad (10)$$

где $F_j = f_j \cdot \delta_1$, Гц·м;

$$\delta_1 = a_1 + b_1 - \sqrt{(h_{PT} - h_{иш})^2 + (l + c)^2}, \text{ м};$$

$$a_1 = \sqrt{c^2 + (h - h_{иш})^2} - \text{расстояние от акустического}$$

центра ИШ до верхней кромки ШЭ, м;

$$b_1 = \sqrt{l^2 + (h - h_{PT})^2} - \text{расстояние от верхней}$$

кромки ШЭ до РТ, м;

$$c = a(s - 0,5) + b_n + D, \text{ м};$$

$$b_n - \text{ширина разделительной полосы, м};$$

$$h - \text{высота ШЭ над поверхностью территории, м};$$

f_j — среднегеометрическая частота j -й октавной полосы частот, Гц.

Погрешность расчетов по формулам (10) не превышает 0,5 дБА относительно исходных данных.

Потери вследствие взаимодействия акустических волн с поверхностью территории при дифракции звука на верхней кромке ШЭ, исходя из данных [14], рассчитываем по полученным соотношениям:

для акустически жесткого покрытия территории:

$$\begin{cases} \Delta L_A^{\text{пок}} = 0 \text{ при } 0,25 \leq \delta_1 \leq 0,35 \text{ м;} \\ \Delta L_A^{\text{пок}} = -0,5 \text{ дБА при } 0,35 < \delta_1 \leq 0,65 \text{ м;} \\ \Delta L_A^{\text{пок}} = 0,026142\delta_1^2 - 0,01234\delta_1^3 - 1,88582\delta_1 + \\ + 0,13674, \text{ дБА} \\ \text{при } 0,65 < \delta_1 \leq 10 \text{ м;} \end{cases} \quad (11)$$

для акустически мягкого покрытия:

$$\begin{cases} \Delta L_A^{\text{пок}} = -0,5 \text{ дБА при } 0,2 \leq \delta_1 \leq 1 \text{ м;} \\ \Delta L_A^{\text{пок}} = 0 \text{ при } 1 < \delta_1 \leq 1,45 \text{ м;} \\ \Delta L_A^{\text{пок}} = 0,4 \text{ дБА при } 1,45 < \delta_1 \leq 1,75 \text{ м;} \\ \Delta L_A^{\text{пок}} = 0,3 \text{ дБА при } 1,75 < \delta_1 \leq 2,95 \text{ м;} \\ \Delta L_A^{\text{пок}} = 0 \text{ при } 2,95 < \delta_1 \leq 10 \text{ м.} \end{cases} \quad (12)$$

Погрешность расчета $\Delta L_A^{\text{пок}}$ по формуле (11) не превышает 0,1 дБА в диапазоне $0,65 < \delta_1 \leq 10$ м относительно исходных данных.

Подставляя результаты вычислений $\Delta L_A^{\text{пок}}$ по формулам (11) и (12) в выражение (1) вместо зависимости (6) и переходя к УЗД в каждой j -й октавной полосе частот с помощью формулы (2), рассчитываем спектр шума в РТ, создаваемый акустическим излучением АТП, дифрагированным поверх ШЭ:

$$L_{1,j} = L_j - \Delta L_{1,j}^{\text{ок}}, \text{ дБ.} \quad (13)$$

Просуммировав энергетически скорректированные по характеристике «А» октавные УЗД, получим соответствующий уровень звука:

$$L_{A,1} = 10 \lg \left(\sum_{j=1}^8 10^{0,1(L_{1,j} - \Delta L_{A,j})} \right), \text{ дБА,} \quad (14)$$

где $\Delta L_{A,1}$ — коррекционная поправка на форму характеристики «А» (табл. 2).

В этом случае эффект установки экрана:

- при расчете УЗД в октавах:

$$\Delta L_{1,j} = L_j - L_{1,j}, \text{ дБ} \quad (15)$$

Таблица 2

Значения поправки $\Delta L_{A,1}$ в октавных полосах частот								
$f_{cp,j}$, Гц	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
$L_{A,1}$, дБ	26,2	16,1	8,6	3,2	0	-1,2	-1	1,1

- при расчете по УЗ:

$$\Delta L_{A,1} = L_A - L_{A,1}, \text{ дБА.} \quad (16)$$

6. Расчет эффекта установки экрана при дифракции звука на его боковых кромках

Оценим вклад звуковых волн, дифрагированных на боковых кромках ШЭ, в общий шум, создаваемый в РТ АТП. Для этого разделим участок АТП, ограниченный двумя лучами, проходящими из РТ через края экрана (рис.1), и представленный в модели в виде отрезка длиной A_1 эквивалентной линии ИШ, на дискретные элементы длиной Δ_1 [13]. Длина элемента зависит от интенсивности N и скорости движения V потока транспорта:

$$A_1 = A \cdot \frac{l+c}{l}, \text{ м;} \quad (17)$$

$$\Delta_1 = V \cdot \frac{1000}{N}, \text{ м,} \quad (18)$$

где A — длина ШЭ.

Основные размеры и углы показаны на рис. 1.

Определяем исходное число элементов на рассматриваемом участке АТП:

$$m_1 = \frac{A_1}{\Delta_1}. \quad (19)$$

Округляем m_1 до целого значения m в большую сторону и уточняем длину элемента:

$$\Delta = \frac{A_1}{m}, \text{ м.} \quad (20)$$

Разность длин звуковых лучей, проходящих из центра i -го элемента в РТ, огибая края ШЭ и напрямую, составит:

$$\delta_{2,3,i} = a_{2,3,i} + b_{2,3} - d_i, \text{ м,} \quad (21)$$

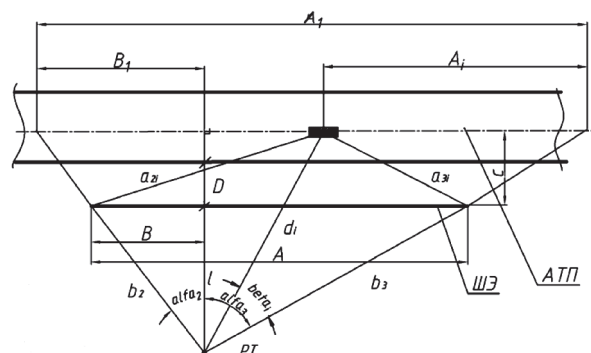


Рис. 1. Расчетная схема для определения эффективности ШЭ при дифракции шума АТП на боковых кромках экрана

где

$$a_{2i} = \sqrt{b_2^2 + d_i^2 - 2b_2 \cdot d_i \cdot \cos(\alpha - \beta_i)}, \text{ м}; \quad (22)$$

$$a_{3i} = \sqrt{b_3^2 + d_i^2 - 2b_3 \cdot d_i \cdot \cos(\beta_i)}, \text{ м}; \quad (23)$$

$$b_{2,3} = \frac{l}{\cos \alpha_{2,3}}, \text{ м}; \quad (24)$$

$$d_i = \sqrt{(l+c)^2 + (A_1 - B_1 - A_i)^2}, \text{ м}; \quad (25)$$

$$\beta_i = \alpha_3 - \arctg\left(\frac{A_1 - B_1 - A_i}{l+c}\right), \text{ рад}; \quad (26)$$

$$B_1 = B \cdot \frac{l+c}{l}, \text{ м}; \quad (27)$$

$$\alpha = \alpha_2 + \alpha_3, \text{ рад}; \quad (28)$$

$$A_i = \frac{\Delta(2i-1)}{2}, \text{ м}; \quad (29)$$

$$i = 1, 2, \dots, m. \quad (30)$$

Эквивалентный уровень звука в РТ, создаваемый i -м элементом АТП, без учета снижения шума по пути распространения акустических волн составит:

$$L_{A,i} = L_A^{\text{эKB}} - \Delta L_A^\alpha - 10 \lg(m), \text{ дБА}. \quad (31)$$

Определим УЗД шума в j -й октаве, поступающего в РТ от i -го элемента АТП, при дифракции звука на боковых кромках экрана раздельно слева и справа. Будем использовать выражение:

$$L_{2,3,i,j} = L_{A,\Delta} - \Delta L_{2,3,i}^{\text{pac}} - \Delta L_{2,3,i,j}^{\text{воз}} - \Delta L_{A,2,3,i}^{\text{пок}} - \Delta L_{A,2,3,i}^{\text{B/T}} - \Delta L_A^{\text{зеп}} - \Delta L_{2,3,i,j}^{\text{эк}} + \Delta L_{T,j}, \text{ дБА}, \quad (32)$$

где $\Delta L_{A,2,3,i}^{\text{пок}}$, $\Delta L_{A,2,3,i}^{\text{B/T}}$ и $\Delta L_A^{\text{зеп}}$ рассчитываются по формулам (6), (7) и (8);

$\Delta L_{T,j}$ см. табл. 1 и пояснения к ней;

$$\Delta L_{2,3,i}^{\text{pac}} = 20 \lg\left(\frac{a_{2,3,i} + b_{2,3}}{7,5}\right), \text{ дБ}; \quad (33)$$

$\Delta L_{2,3,i,j}^{\text{воз}}$ вычисляются по методике [15] с учетом температуры T [К], относительной влажности φ [%] атмосферы и давления p_a [кПа]:

$$\Delta L_{2,3,i,j}^{\text{воз}} = \Delta w_j (a_{2,3,i} + b_{2,3}), \text{ дБ}, \quad (34)$$

где

$$\Delta w_j = 8,686 f_j^2 \left\{ \left[1,84 \times 10^{-11} \left(\frac{101,325}{p_a} \right) \left(\frac{T}{293,15} \right)^{0,5} \right] + \left(\frac{T}{293,15} \right)^{-2,5} A_{a,j} \right\}, \frac{\text{дБ}}{\text{м}}; \quad (35)$$

здесь

$$A_{a,j} = 0,01275 e^{T/2239,1} \left(Fr + \frac{f_j^2}{Fr} \right)^{-1} + 0,1068 e^{T/3352} \left(Fn + \frac{f_j^2}{Fn} \right); \quad (36)$$

$$Fr = \left(\frac{p_a}{101,325} \right) \left[24 + 40400 \frac{H(0,02 + H)}{0,391 + H} \right]; \quad (37)$$

$$Fn = \left(\frac{p_a}{101,325} \right) \left(\frac{T}{293,15} \right)^{-0,5} \left\{ 9 + 280 He^{-4,17 \left[\sqrt[3]{293,15/T} - 1 \right]} \right\}; \quad (38)$$

$$H = 101,325 \times \frac{10^n \varphi}{p_a}; \quad (39)$$

$$n = -6,8346 \left(\frac{273,16}{T} \right)^{1,261}. \quad (40)$$

Снижение уровня шума при его дифракции на боковых кромках ШЭ находим по полученным на основе приведенных в [12] зависимостей:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta L_{2,3,i,j}^{\text{эк}} = 8 + 4,4 \lg\left(\frac{F_{2,3,i,j}}{17}\right), \text{ дБ} \\ \text{при } 17 \leq F_{2,3,i,j} \leq 150; \\ \Delta L_{2,3,i,j}^{\text{эк}} = 1,9 + 11 \lg\left(\frac{F_{2,3,i,j}}{17}\right), \text{ дБ} \\ \text{при } 150 < F_{2,3,i,j} \leq 14000; \\ \Delta L_{2,3,i,j}^{\text{эк}} = 34 \text{ дБ при } F_{2,3,i,j} > 14000, \end{array} \right. \quad (41)$$

где

$$F_{2,3,i,j} = f_j \cdot \delta_{2,3,i}, \text{ Гц} \cdot \text{м}, \quad (42)$$

здесь $\delta_{2,3,i}$ вычисляются по формулам (21)–(30).

Погрешность вычислений $\Delta L_{2,3,i,j}^{\text{эк}}$ по формулам (41) не превышает 0,3 дБ относительно исходных данных.

Просуммировав энергетически УЗД в РТ во всем m элементам АТП в каждой j -й октавной полосе частот, получим спектр шума, дифрагированного на левой и правой кромках ШЭ:

$$L_{2,3,j} = 10 \lg\left(\sum_{i=1}^m 10^{0,1 L_{2,3,i,j}}\right), \text{ дБ}, \quad (43)$$

или по уровню звука:

$$L_{A,2,3} = 10 \lg\left(\sum_{j=1}^8 10^{0,1(L_{2,3,j} - \Delta L_{A,j})}\right), \text{ дБА}. \quad (44)$$

Вычислим в РТ октавный спектр шума и уровень звука, дифрагированного по обеим боковым кромкам, а также по всему открытому периметру ШЭ:

$$L_{\text{бок},j} = 10 \lg \left(10^{0,1L_{2,j}} + 10^{0,1L_{3,j}} \right), \text{ дБ}; \quad (45)$$

$$L_{A,\text{бок}} = 10 \lg \left(10^{0,1L_{A,2}} + 10^{0,1L_{A,3}} \right), \text{ дБА}; \quad (46)$$

$$L_j^{\text{ЭК}} = 10 \lg \left(10^{0,1L_{1,j}} + 10^{0,1L_{\text{бок},j}} \right), \text{ дБ}; \quad (47)$$

$$L_A^{\text{ЭК}} = 10 \lg \left(10^{0,1L_{A,1}} + 10^{0,1L_{A,\text{бок}}} \right), \text{ дБА}. \quad (48)$$

Определим эффект установки экрана:
по спектру шума:

$$\Delta L_j^{\text{ЭК}} = L_j - L_j^{\text{ЭК}}, \text{ дБ}; \quad (49)$$

по уровню звука:

$$\Delta L_A^{\text{ЭК}} = L_A - L_A^{\text{ЭК}}, \text{ дБА}. \quad (50)$$

7. Анализ результатов исследований

На основе полученных математических зависимостей и разработанной программы расчета на ПК было исследовано влияние различных факторов на акустический эффект установки экрана как по отдельности, так и в определенном их сочетании.

Исследование влияния высоты ШЭ на эффект его установки ($\Delta L_A^{\text{ЭК}}$) выполнено при следующих исходных данных: $A = 100$ м; $B = A/2$ м; $l = 30$ м; $D = 1$ м; $a = 3,75$ м; $b_{\text{п}} = 1$ м; $s = 4$; $h_{\text{РТ}} = 1,5$ м; $h_{\text{ИШ}} = 1$ м; $z = 10$ м; $p_a = 100$ кПа; $T = 290$ К; $\varphi = 50\%$.

При $h = 3,5$ м и $h = 12$ м $\Delta L_A^{\text{ЭК}}$ увеличился с 9,73 до 15,1 дБА при акустически жестком покрытии территории ($t = 0$) и с 5,65 до 15,69 дБА — при акустически мягком ($t = 1$). Дифракция на боковых кромках ШЭ (далее боковая дифракция) незначительно снижает $\Delta L_A^{\text{ЭК}}$ ($\leq 0,16$ дБА).

Рассмотрены различные соотношения расстояния (l) от РТ до ШЭ и его длины (A). При увеличении A со 100 до 500 м $\Delta L_A^{\text{ЭК}}$ возрос с 12,59 до 12,65 дБА при $t = 0$, а при $t = 1$ — с 9,93 до 9,97 дБА. Боковая дифракция практически не влияет на $\Delta L_A^{\text{ЭК}}$ ($\leq 0,06$ дБА).

Удаление РТ от ШЭ ($l = 100$ м) приводит к снижению $\Delta L_A^{\text{ЭК}}$ до уровня 7 дБА при $t = 1$ и практически не влияет при $t = 0$. Боковая дифракция мало сказывается на величине $\Delta L_A^{\text{ЭК}}$ ($\leq 0,01$ дБА).

Увеличение расстояния от ШЭ до бровки магистрали ($D = 1$ м и 10 м) при $t = 0$ практически не влияет на $\Delta L_A^{\text{ЭК}}$ (повышение на 0,2 дБА). Влияние боковой дифракции незначительно ($\leq 0,1$ дБА).

При увеличении числа полос движения автотранспорта с двух до восьми $\Delta L_A^{\text{ЭК}}$ снижается с 13,98 до

12,38 дБА при $t = 0$, а при $t = 1$ — с 15,43 до 11,53 дБА. Влияние боковой дифракции мало ($\leq 0,12$ дБА).

Рассмотрим вариант, когда РТ расположена напротив бокового края экрана ($B = 0$); $l = 20$ м; $s = 2$; $h = 6$ м; значения остальных величин те же (см. выше). При укорачивании экрана со 100 до 30 м $\Delta L_A^{\text{ЭК}}$ снижается с 13,98 до 13,41 дБА при $t = 0$ и с 15,44 до 14,66 дБА при $t = 1$, а влияние боковой дифракции увеличивается соответственно с 0,08 до 0,65 дБА и с 0,11 до 0,89 дБА.

Увеличение расстояния от РТ до ШЭ ($l = 100$ м) и $A = 30$ м снижает $\Delta L_A^{\text{ЭК}}$ до 13,55 дБА при $t = 0$ и до 6,97 дБА при $t = 1$ при незначительном влиянии боковой дифракции ($\leq 0,2$ дБА).

Рассмотрим вариант, когда РТ расположена на расстоянии $B = 25$ м от края экрана длиной $A = 250$ м при прежних значениях исходных величин (см. выше). При удалении РТ от ШЭ с 30 до 60 м $\Delta L_A^{\text{ЭК}}$ снижается с 12,41 до 12,27 дБА при $t = 0$ и с 9,97 до 5,97 дБА при $t = 1$.

Увеличение высоты расположения РТ над территорией с 1,5 до 6 м при $t = 0$ приводит к снижению $\Delta L_A^{\text{ЭК}}$ с 12,41 до 10,38 дБА, а при $t = 1$ — к возрастанию с 9,73 до 13,71 дБА. Последнее объясняется увеличением $\Delta L_A^{\text{ЭК}}$ без экрана и снижением при его наличии — см. формулы (6), (11) и (12). Учет боковой дифракции практически не влияет на $\Delta L_A^{\text{ЭК}}$.

При изменении высоты акустического центра ИШ над поверхностью магистрали с 1 до 3 м при $t = 0$ $\Delta L_A^{\text{ЭК}}$ снижается с 12,41 до 11,57 дБА, а при $t = 1$ возрастает с 9,73 до 14,86 дБА по тем же причинам, что и при увеличении $h_{\text{РТ}}$. Влияние боковой дифракции на $\Delta L_A^{\text{ЭК}}$ практически отсутствует.

Исследуем влияние изменения параметров атмосферы на эффект установки экрана. При увеличении температуры с 275 до 305 К при $t = 1$ и относительной влажности с 30 до 70% при $t = 0$ $\Delta L_A^{\text{ЭК}}$ не изменяется и составляет 14,86 дБА.

8. Выводы

1. В процессе расчета дифракционных потерь при огибании звука верхней кромки ШЭ целесообразно АТП моделировать эквивалентным линейным ИШ с суммарной акустической мощностью транспортных средств, равномерно распределенной вдоль линии, представляющей собой траекторию движения АТП.
2. В процессе вычисления дифракционных потерь на боковых кромках экрана АТП можно представить совокупностью ненаправленных точечных ИШ равной звуковой мощности, расположенных на одной прямой линии на одинаковом расстоянии один от другого, зависящем от его интенсивности и средневзвешенной скорости движения.
3. Предложенная формула расчета эквивалентной шумовой характеристики АТП позволяет учесть

его интенсивность, средневзвешенную скорость движения, наличие большегрузных АТС, число полос движения, продольный уклон магистрали, тип покрытия.

4. Полученные выражения для количественной оценки акустической эффективности ШЭ при дифракции звука на его верхней, а также боковых кромках с достаточной степенью точности описывают исходные эмпирические данные (погрешность — не более 0,5 дБА).
5. Предложенные аналитические зависимости для вычисления потерь при распространении звука в воздухе, а также вследствие влияния покрытия территории с достаточной степенью точности описывают исходные графические и табличные источники информации (погрешность — не более 0,5 дБА).
6. Разработанная программа расчета на ПК позволила исследовать влияние различных факторов на акустический эффект установки экрана как в отдельности, так и в их сочетании.
7. Увеличение высоты ШЭ с 3,5 до 12 м приводит, как и ожидалось, к существенному росту акустическо-

го эффекта его установки ($\Delta L_A^{\text{эк}}$) на 5–10 дБА при расположении РТ напротив середины экрана в зависимости от вида покрытия дороги.

8. Удаление РТ от ШЭ с 30 до 100 м снижает $\Delta L_A^{\text{эк}}$ в среднем на 3–7 дБА в зависимости от расположения РТ и вида покрытия территории.
9. Увеличение числа полос движения АТС с двух до восьми снижает $\Delta L_A^{\text{эк}}$ на 1,6 и 3,9 дБА соответственно при акустически жестком и акустически мягком покрытии.
10. Подъем РТ с 1,5 до 6 м и акустического центра ИШ с 1 до 3 м приводит к снижению $\Delta L_A^{\text{эк}}$ соответственно на 2 и 0,8 дБА при акустически жестком покрытии территории, а при мягком — к увеличению на 4 и 5,2 дБА. Последнее объясняется влиянием покрытия ($\Delta L_A^{\text{пок}}$).
11. Изменение длины экрана, расстояния от него до бровки магистрали, а также температуры и влажности воздуха практически не влияет на значение $\Delta L_A^{\text{эк}}$.
12. Влияние дифракции на боковых кромках ШЭ на значение $\Delta L_A^{\text{эк}}$ незначительно (не более 0,9 дБА при данных исследованиях).

ЛИТЕРАТУРА

1. Шубин И.Л. Акустический расчет и проектирование конструкций шумозащитных экранов: Дис. ... д-ра техн. наук / ГОУВПО «Московский институт коммунального хозяйства и строительства». — М., 2011. — 325 с.
2. Шум на транспорте / Пер. с англ. К.Г. Бромштейна / Под ред. В.Е. Тольского, Г.В. Бутакова, Б.Н. Мельникова. — М.: Транспорт, 1995. — 368 с.
3. Осипов Г.Л., Коробков В.Е. Распространение и защита от шума на территориях застройки // Снижение шума в зданиях и жилых районах / Под ред. Г.Л. Осипова, Е.Я. Юдина. — М.: Стройиздат, 1987. — С. 154–255.
4. Kawai K., Flujimoto, Itow T. Noise propagation around a thin half plane. *Acustica*, 1978. — Vol. 38. — P. 313–323.
5. Kawai Y. Sound attenuation by finite barriers / Proc. 11th ICA. Paris, 1983. — Vol. 1. — P. 129–132.
6. Terai T. On calculation of sound fields around three dimensional objects by integral equation methods // *J.S. a V.*, 1980. — 69(1) — P. 71–100.
7. Kurze U.J. Noise reduction by barriers // *JASA*, 55–3, 1974. — P. 504–518.
8. Kohshi N., Katsuo F. Boundary element analysis of the sound field around a finite barrier // *J. Jap. Soc. Precis. Eng.*, 1988. — Vol. 54. — P. 1351–1356.
9. Иванов Н.И., Тюрина Н.В. Проблема снижения шума железнодорожного транспорта // Сборник докладов меж-

дународной научно-технической конференции «Применение акустических экранов для снижения шума и увеличения безопасности движения поездов». — М., 2014. — С. 9–36.

10. Бобровских В.П., Иванов Н.И., Тюрина Н.В. О коэффициенте дифракции акустических экранов // «Новое в теоретической и прикладной акустике», труды семинара / Под ред. Н.И. Иванова. СПб.: ГТУ, 2007. — С. 141–147.
11. Методические рекомендации по оценке необходимого снижения звука у населенных пунктов и определению требуемой акустической эффективности экранов с учетом звукопоглощения. — М.: Минтранс РФ, 2003. — 38 с.
12. Маекава З. Акустические экраны // Снижение шума в зданиях и жилых районах / Под ред. Г.Л. Осипова, Е.Я. Юдина. — М.: Стройиздат, 1987. — С. 426–448.
13. ГОСТ 31295.2–2005 (ИСО 9613–2:1996). Шум. Затухание звука при распространении на местности. ч.2. Общий метод расчета. Межгосударственный стандарт. 2007.
14. Защита от шума в градостроительстве / Под ред. Г.Л. Осипова. — М.: Стройиздат, 1993. — 96 с. (Справочник проектировщика)
15. ГОСТ 31295.1–2005. Шум. Затухание звука при распространении на местности. ч.1. Расчет поглощения звука атмосферой. Межгосударственный стандарт. 2007.

REFERENCES

1. Shubin I.L. *Akusticheskiy raschet i proektirovanie konstruktsiy shumozashchitnykh ekranov. Dokt. Diss.* [Acoustic calculation and design of noise screens. Doct. Diss.].

Moscow Institute of Municipal Economy and Construction Publ., Moscow, 2011.

2. Tol'skiy V.E., Butakov G.V., Mel'nikov B.N. *Shum na transporte* [Noise in the truck]. Moscow, Transport Publ., 1995.
3. Osipov G.L., Korobkov V.E. *Rasprostranenie i zashchita ot shuma na territoriyakh zastroyki* [Distribution and noise protection in the territories development]. Snizhenie shuma v zdaniyakh i zhilykh rayonakh [Noise reduction in buildings and residential areas]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1987. P. 154–255.
4. Kawai T. et al. Noise propagation around a thin half-plane. *Acustica*, 1977, 38.
5. Kawai T. Sound attenuation by finite barriers. Proc. 11th ICA.Paris, 1983. Vol. 1, 129.
6. Firai T. On calculation of sound fields around three dimensional objects by integral equation methods. *J.S. a V.*, 1980, 69.
7. Kurze U.J. Noise reduction by barriers. *JASA*, 55-3, 1974. P. 504–518.
8. Kohshi N., Katsuo F. Boundary element analysis of the sound field around a finite barrier. *J. Jap. Soc. Precis. Eng.*, 1988. Vol. 54. R. 1351–1356.
9. Ivanov N.I., Tyurina N.V. Problema snizheniya shuma zheleznodorozhnogo transporta [The problem of noise reduction of rail transport]. *Sbornik докладов mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Primenenie akusticheskikh ekranov dlya snizheniya shuma i uvelicheniya bezopasnosti dvizheniya poezdov"* [Collected papers of the international scientific conference "Application of acoustic baffles to reduce noise and increase the safety of trains"]. Moscow, 2014. P. 9–36.
10. Bobrovskikh V.P., Ivanov N.I., Tyurina N.V. O koeffitsiente difraktsii akusticheskikh ekranov [On the coefficient of diffraction of acoustic screens]. "Novoe v teoreticheskoy i prikladnoy akustike", *trudy seminar* ["New developments in theoretical and applied acoustics", Proceedings of the Seminar]. St. Petersburg, GTU Publ. P. 141–147.
11. *Metodicheskie rekomendatsii po otsenke neobkhodimogo snizheniya zvuka u naseleennykh punktov i opredeleniyu trebuemoy akusticheskoy effektivnosti ekranov s uchetom zvukopogloshcheniya* [Guidelines on the assessment of the required sound reduction in settlements and the definition of the required acoustic efficiency of screens with the sound absorption]. Moscow, Mintrans RF Publ., 2003.
12. Maekava Z. Akusticheskie ekrany [Acoustic screens]. *Snizhenie shuma v zdaniyakh i zhilykh rayonakh* [Noise reduction in buildings and residential areas]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1987. P. 426–448.
13. GOST 31295.2–2005 (ISO 9613–2:1996). *Shum. Zatukhanie zvuka pri rasprostranении na mestnosti. ch.2. Obshchiy metod rascheta. Mezhdgosudarstvennyy standart* [GOST 31295.2-2005 (ISO 9613-2: 1996). Noise. Attenuation of sound during propagation in the field. Part 2. General method of calculation. Interstate standard]. 2007. (in Russian)
14. Osipov G.L. *Zashchita ot shuma v gradostroitel'stve* [Protection against noise in urban development]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1993.
15. GOST 31295.1–2005. *Shum. Zatukhanie zvuka pri rasprostranении na mestnosti. ch.1. Raschet pogloshcheniya zvuka atmosferoy. Mezhdgosudarstvennyy standart* [GOST 31295.1-2005. Noise. Attenuation of sound during propagation in the field. Part 1. Calculation of the absorption of sound atmosphere. Interstate standard]. 2007.

Calculation and Research of Traffic Flow Noise Abatement by Noise Screens

V.V. Tupov, Associate Professor, Ph.D. in Technical Sciences, Bauman Moscow State Technical University
O.A. Cheresheva, student, Bauman Moscow State Technical University

Noise screen (NS) is an efficient and rather low-cost way of protection of highway-area territories against traffic flow noise (TFN). In engineering calculations NS are often considered infinite, disregarding the phenomenon of sound diffraction on its lateral edges. Presented computational method allows considering diffraction processes along all NS perimeter thus increasing accuracy of calculation of screen installation effect. The research also focuses on contribution of the sound diffracted on lateral edges of the screen to composite TFN at computational point (CP) depending on its position on NS, NS's size, and sound-absorbing qualities of landscape around highway. Mathematical relations for calculating noise abatement have been built due to a number of factors instead of traditionally applied tables, nomograms and graphics thus simplifying programming process.

Keywords: traffic flow noise, noise screen, sound diffraction, octave spectrum, acoustic effectiveness of noise screen, screen installation effect.