

УДК: 534

OECD: 01.03.AA

Использование метода преобразования звуковых полей для расчёта эффективности шумозащитных конструкций

Иванов Н.И.¹, Тюрина Н.В.², Шашурин А.Е.^{3*}, Курченко П.С.⁴¹ Д.т.н., профессор, заведующий кафедрой^{2,3} Д.т.н., профессор, ⁴ Соискатель

^{1,2,4} Кафедра «Экология и производственная безопасность», Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург, РФ

Аннотация

Описан новый подход в расчётах эффективности шумозащитных экранов (ШЭ), основанный на принципе последовательного преобразования звуковых полей при наличии ШЭ. Получена формула расчёта, в которой учитывается: расположение ШЭ в пространстве, высота ШЭ, звукопоглощающие свойства экрана и опорной поверхности. Для увеличения точности расчётов введено понятие показателя дифракции ШЭ ($ПД = 10 \log \frac{1}{\beta_{\text{дифр}}}$, $\beta_{\text{дифр}}$ – коэффициент дифракции экрана). Выполнены теоретические, а также экспериментальные исследования акустической эффективности. Экспериментально определён показатель дифракции ШЭ. Проверка предложенного метода расчёта проведена на стенде и в натуральных условиях (всего было испытано более 50 акустических экранов). Экспериментальная проверка не утвердила более высокую точность расчётов по сравнению с используемой в расчётах оптико-дифракционной теорией.

Ключевые слова: шумозащита, дифракция, звукопоглощение, звукоизоляция, акустическая эффективность.

Using the sound field conversion method to calculate the efficiency of noise protection structures

Ivanov N.I.¹, Turina N.V.², Shashurin A.E.^{3*}, Kurchenko P.S.⁴¹ DSc, professor, head of the department,^{2,3} DSc, professor, ⁴ Applicant

^{1,2,4} The department of Ecology and Industrial Safety, Baltic State Technical University 'VOENMEH' named after D. F. Ustinov, St. Petersburg, Russia

Abstract

A new approach to calculating the efficiency of noise barriers (NB) based on the principle of sequential sound field transformation subject to NB availability is described. The calculation formula is obtained, which takes into account: the location of the NB in the space, the NB height, sound-absorbing properties of the barrier and the reference surface. To increase the accuracy of calculations, the concept of the NB diffraction index (DI) is introduced ($DI = 10 \log \frac{1}{\beta_{\text{diffr}}}$, β_{diffr} is the barrier diffraction coefficient). Theoretical and experimental studies of acoustic efficiency were performed. The NB diffraction index was determined experimentally. The proposed calculation method was tested on a stand and in full-scale conditions (more than 50 acoustic barriers were tested

*E-mail: 7596890@mail.ru (Шашурин А.Е.)

in total). The experimental verification did not confirm a higher accuracy of calculations in comparison with the optical-diffraction theory used in calculations.

Keywords: noise protection, diffraction, sound absorption, sound insulation, acoustic efficiency.

Введение

Для расчётов эффективности широко используются полученные Д. Маекавой и У. Курце формулы, основанные на теории дифракции Кирхгофа - Френеля, где основным показателем служит число Френеля (N). Число Френеля показывает разность хода звуковых лучей в присутствии шумозащитного экрана (ШЭ) [1-3]. Отметим, что фундаментальная теория дифракции разрабатывалась для задач оптики, где длины волн очень малы по сравнению с размером препятствия и расстоянием между источником и расчётной точкой. Поэтому используемая для расчётов экранов теория получила название оптико - дифракционной.

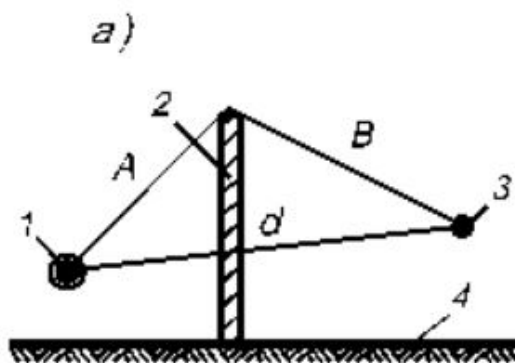


Рис. 1. Схема дифракции на тонком АЭ (а)

1 – источник шума; 2 – плоский (тонкий) АЭ; 3 – расчётная точка;
4 – опорная поверхность

Отметим несколько недостатков этого подхода. На рис. 1 приведена расчётная схема ШЭ, где A – расстояние от источника шума (ИШ) до свободного ребра (вершины) ШЭ, B – расстояние от вершины ШЭ до расчётной точки (РТ). Эти расстояния и определяют эффективность ШЭ. Нетрудно отметить, что при этом подходе звук сразу попадает на вершину ШЭ, как бы «не замечая» ни опорной поверхности, ни самого экрана с его звукопоглощающими или отражающими свойствами. Сам экран принимается бесконечным и звуконепроницаемым, а ИШ – точечным. Это не соответствует более сплошной физической картинке образовавшихся звуковых полей в присутствии ШЭ. В связи с этим отмечено, что методы расчётов, базирующиеся на оптико-дифракционной теории, дают, как правило, весьма завышенные значения эффективности ШЭ. Проведенными одним из авторов исследованиями более 50 экранов в натуральных условиях было установлено, что только около 10% из них выполняют свою основную функцию, т.е. снижают шум в прилегающем жилье до нормы.

1. Теория ШЭ с методом преобразования звуковых полей.

Теория ШЭ, базирующаяся на последовательном преобразовании звуковых полей в присутствии экрана рассмотрена в [4,5].

Представим, какие в действительности происходят явления, когда в свободном звуковом поле установлен ШЭ. Примем, что ИШ – линейный: эта аппроксимация корректна для поездов и автотранспортных потоков, заметим, что основной источник шума расположен очень низко (место контакта колеса с рельсом или шин с дорожным полотном). Поэтому вначале звук от ИШ взаимодействует с опорной поверхностью, отражаясь от нее или частично поглощаясь ею. Это явление учитывается методом мнимых источников, где коэффициент звукопоглощения поверхности ($\alpha_{пов}$). Звук приходит в нижнюю часть ШЭ, а затем распространяется по его поверхности. При этом наблюдается картина, показанная на рис 2, где показаны переотражения звука от ШЭ и ИШ и обратно.

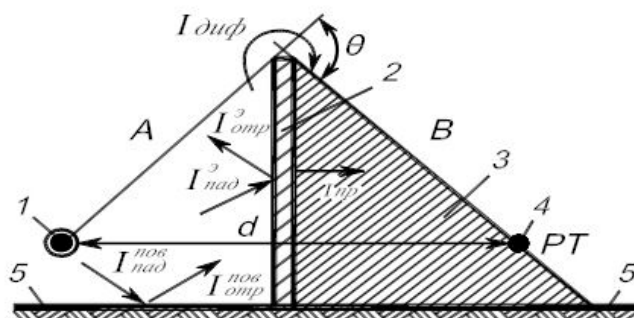


Рис. 2. Схема расчета эффективности акустического экрана:
 1 – источник шума (ИШ); 2 – акустический экран (АЭ); 3 – область звуковой тени;
 4 - расчетная точка (РТ); 5 – близрасположенная поверхность
 (отражающая или поглощающая)

Процесс распространения звука по ШЭ связан с тремя явлениями:

- дивергенция звука, в результате которой его интенсивность с увеличением высоты заметно снижается (это было экспериментально подтверждено одним из авторов);
- поглощением звука акустическими панелями ШЭ, если они обладают звукопоглощающими свойствами ($\alpha_{экр}$);
- отражением звука от акустических панелей, обладающих звукоизолирующими свойствами ($ZI_{экр}$).

Далее звук равномерно распределяется по верхней кромке (свободному ребру ШЭ), которое, согласно принципу Гюйгенса становится вторичным излучателем звука. При этом звук дифрагирует через свободное ребро ШЭ ($\beta_{дифр}$). И, наконец, звук от вторичного линейного источника снижается в результате дивергенции при распространении от свободного ребра до расчётной точки.

$$ZI_{экр} = 10 \lg \frac{1}{\tau_{экр}}; \quad (1)$$

$$\tau_{экр} = \frac{I_{пр}}{I_{пад}}; \quad (2)$$

$$\alpha_{экр} = \frac{I_{погл}}{I_{пад}}; \quad (3)$$

$$\beta_{дифр} = \frac{I_{дифр}}{I_{пад}}; \quad (4)$$

где $I_{\text{пад}}$ - интенсивность падающего звука, Вт/м²; $I_{\text{погл}}$ - интенсивность поглощенного звука, Вт/м²; $I_{\text{пр}}$ - интенсивность прошедшего через панель звука, Вт/м²; $I_{\text{дифр}}$ - интенсивность дифрагированного звука, Вт/м²; $ЗИ_{\text{экр}}$ - звукоизоляция экрана, дБ; $\tau_{\text{экр}}$ - коэффициент звукопроводности; $\alpha_{\text{экр}}$ - коэффициент звукопоглощения; $\beta_{\text{дифр}}$ - коэффициент дифракции.

Расчёт акустических экранов [6-10]. Для расчёта используется расчётную схему, приведённую на рис. 2.

Принятые допущения:

- ИШ линейный;
- длина ИШ равна длине ШЭ ($l_{\text{экр}}$);
- звукопоглощающие свойства поверхности между ШЭ и РТ не учитываются;
- вторичный источник шума в нужной части ШЭ условно принят шириной, равной 1 м.;
- звукоизоляция ШЭ существенно выше эффективности ШЭ и в расчётах не учитываются.

Акустическая эффективность ШЭ $\Delta L_{\text{экр}}$, дБ:

$$\Delta L_{\text{экр}} = 10 \lg \frac{I_{\text{РТ}}^{6/\varepsilon}}{I_{\text{РТ}}^{c/\varepsilon}}, \quad (5)$$

где $I_{\text{РТ}}^{6/\varepsilon}$ - интенсивность звука в РТ без ШЭ, Вт/м²; $I_{\text{РТ}}^{c/\varepsilon}$ - т. ж. с установленным ШЭ, Вт/м².

Интенсивность звука от линейного ИШ без ШЭ $I_{\text{РТ}}^{6/\varepsilon}$:

$$I_{\text{РТ}}^{6/\varepsilon} = \frac{W_{\text{ист}}}{2\pi l_{\text{экр}}(R+r)} \arctg \frac{l_{\text{экр}}}{2(R+r)}, \quad (6)$$

$W_{\text{ист}}$ - акустическая мощность ИШ; $l_{\text{экр}}$ - длина ШЭ, м; R - расстояние от ШЭ до РТ, м; r - расстояние от ИШ до ШЭ, м.

Выполним последовательные операции, описывающие изменение звукового поля в присутствии ШЭ для получения знаменателя в формуле (5).

Интенсивность звука падающего на нижнюю часть ШЭ $I_{\text{пад}}$, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$:

$$I_{\text{пад}} = \frac{W_{\text{ист}}(1 - \alpha_{\text{пов}})}{2\pi l_{\text{экр}} r} \arctg \frac{l_{\text{экр}}}{2r}, \quad (7)$$

где $\alpha_{\text{пов}}$ - коэффициент звукопоглощения опорной поверхности между ИШ и ШЭ; $W_{\text{ист}}$, $l_{\text{экр}}$, r - то же, что и в формуле (6).

Акустическая мощность этого вторичного линейного излучателя $W_{\text{н}}$, Вт:

$$W_{\text{н}} = I_{\text{пад}} l_{\text{экр}1}, \quad (8)$$

где $I_{\text{пад}}$ - то же, что и в формуле (1); $l_{\text{экр}1}$ - длина экрана №1, м.

Интенсивность звука на верхнем свободном ребре ШЭ, $I_{\text{эк}}$, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ при условии, что интенсивность звука уменьшается по высоте ШЭ:

$$I_{\text{эк}} = \frac{W_{\text{н}}(1 - \alpha_{\text{экр}})}{\pi l_{\text{экр}} h_{\text{экр}}} \arctg \frac{l_{\text{экр}}}{2h_{\text{экр}}}, \quad (9)$$

где $h_{\text{экр}}$ - высота ШЭ, м; $W_{\text{н}}$ - то же, что и в формуле (8); $l_{\text{экр}}$ - то же, что и в формуле (6); $\alpha_{\text{экр}}$ - то же, что и в формуле (3).

Частично зависимая акустическая мощность, излучаемая вторичным линейным ИШ с учётом дифракции, W_p , Вт:

$$W_p = I_p l_{\text{экp}} \lambda \beta_{\text{дифр}}, \quad (10)$$

где $l_{\text{экp}}$ – то же, что и в формуле (6); λ – длина звуковой волны, м; I_p – интенсивность звука на свободном ребре экрана, Вт/м²; $\beta_{\text{дифр}}$ – коэффициент дифракции ШЭ (теоретическая $\beta_{\text{дифр}} = \frac{1}{\pi} \div \frac{1}{2\pi}$).

Интенсивность звука в РТ в результате дивергенции от вторичного линейного излучателя, $I_{\text{рт}}^{c/\text{э}}$, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$:

$$I_{\text{рт}}^{c/\text{э}} = \frac{W_p}{2\pi l_{\text{экp}} R} \arctg \frac{l_{\text{экp}}}{2R}, \quad (11)$$

где W_p – то же, что и в формуле (10); $l_{\text{экp}}$, R – то же, что и в формуле (6). Подставим (7) – (10) в (11):

$$I_{\text{рт}}^{c/\text{э}} = \frac{W_{\text{ист}}(1 - \alpha_{\text{пов}})l_{\text{экp}1}(1 - \alpha_{\text{экp}})l_{\text{экp}}\lambda\beta_{\text{дифр}}}{2\pi l_{\text{экp}} r \pi l_{\text{экp}} h_{\text{экp}} 2\pi l_{\text{экp}} R} \arctg \frac{l_{\text{экp}}}{2r} \arctg \frac{l_{\text{экp}}}{2h_{\text{экp}}} \arctg \frac{l_{\text{экp}}}{2R}, \quad (12)$$

Упростим (12), а затем подставим упрощенную (12) и (6) в формулу (5). После логарифмирования получим акустическую эффективность ШЭ в виде:

$$\begin{aligned} \Delta L_{\text{экp}} = & 10 \lg \frac{rR}{(r+R)r_0} + 10 \lg \frac{h_{\text{экp}}}{\lambda} - 10 \lg(1 - \alpha_{\text{пов}}) - 10 \lg(1 - \alpha_{\text{экp}}) + \\ & + \text{ПД} - 10 \lg \arctg \frac{l_{\text{экp}}}{2(R+r)} - 10 \lg \arctg \frac{l_{\text{экp}}}{2h_{\text{экp}}} - 10 \lg \frac{l_{\text{экp}}}{2R} + 10, \end{aligned} \quad (13)$$

где: $r = 4$ м, r_0 – опорное расстояние, м.

Примем, что $R \gg r$, а $l_{\text{экp}} \gg h_{\text{экp}}$, $l_{\text{экp}} \gg r$, $l_{\text{экp}} \gg R$, тогда (13) можно упростить:

$$\begin{aligned} \Delta L_{\text{экp}} = & 10 \lg \frac{rR}{(r+R)r_0} + 10 \lg \frac{h_{\text{экp}}}{\lambda} - 10 \lg(1 - \alpha_{\text{пов}}) - 10 \lg(1 - \alpha_{\text{экp}}) + \\ & + \text{ПД} + 6, \end{aligned} \quad (14)$$

Акустическая эффективность ШЭ увеличивается с:

- уменьшением r и R ;
- увеличением $h_{\text{экp}}$ и уменьшением λ ;
- увеличением $\alpha_{\text{пов}}$ и $\alpha_{\text{экp}}$.

Были проведены эксперименты ШЭ в натуральных условиях с целью проверки точности полученной формулы, а также определения значений показателя дифракции.

Измеренные на 50 ШЭ в натуральных условиях и усреднённые значения ПД приведены в таблице.

2. Экспериментальная апробация расчетов эффективности экрана

Таблица 1

Значения экспериментально полученных ПД

Значения среднегеометрических частот, Гц	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Показатель дифракции, дБ	-4	-6	-7	-9	-11	-13	-14	-19

Сравнительные данные эффективности ШЭ, полученные расчётом и экспериментально приведены на рис.3. Даны также данные расчётов по формуле Д. Маекавой[6]. Отмечена хорошая сходимость расчётных данных по формуле (14) по сравнению с экспериментами: отклонение во всём частотном диапазоне не более $\pm 0,15$. Отклонение расчётных данных по формуле Маекавой в высокочастотном диапазоне составило 4–7 дБ.

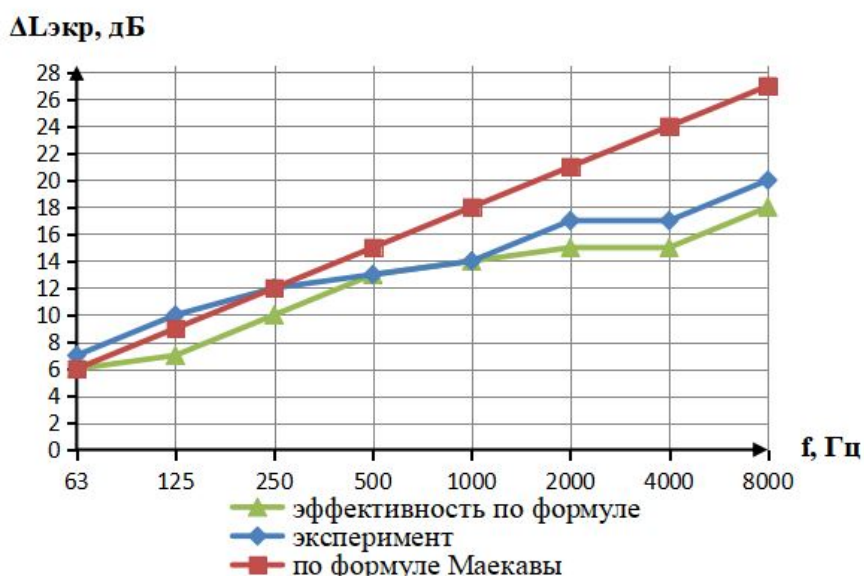


Рис. 3. Сравнение эффективности экрана от линейного источника шума, полученное по формуле, с экспериментом и с методом Маекавы

Заключение

Предложен новый подход для расчётов акустической эффективности ШЭ, основанный на последовательном описании и изменениях характера звуковых полей при наличии экрана. В полученной формуле учитываются: расположение ШЭ в пространстве, высота ШЭ, звукопоглощение свойства опорной поверхности и ШЭ, а также явление дифракции. Проведённая экспериментальная проверка показала более высокую точность расчётов по предложенной формуле, чем при расчётах с использованием оптико-дифракционной теории.

Список литературы

1. Иванов, Н. И. Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом: учебник / Н. И. Иванов. – 4-е изд., перераб. и доп. – Санкт-Петербург: изд-во Логос, 2015. – с.432

2. Kurze U. J. Noise reduction by barriers : Journal off the Acoustical Society of America, 1974. – Vol. 55, №3. – pp. 157-173.

3. Шашурин А.Е. Определение эффективной высоты и акустических характеристик шумового экрана/ Noise Theory and Practice. – 2018. – Том 4, №2. – с. 5-10.

4. Новые технические и технологические решения для снижения акустического загрязнения шумозащитными экранами. Монография / А. Е. Шашурин (лва 100%). – СПб.: Изд-во Балт. гос. техн. ун-т, 2018. – с.134

5. Теоретические принципы расчета эффективности шумозащиты высокоскоростных железных дорог, Шашурин А.Е., 25th International Congress on Sound and Vibration, ICSV 2018 – с. 3963-2968, ISBN 978-1-5108-6845-8

6. Справочник проектировщика. Защита от шума. / Под ред. Е. Я. Юдина. – М.: «Стройиздат», 1974. – с.134

References

1. Ivanov N.I., Inzhenernaya akustika. Teoriya i praktika bor'by s shumom: uchebnik / N. I. Ivanov. – 4-e izd., pererab. i dop. – Sankt-Peterburg: Logos, 2015. – p.432

2. Kurze U. J. Noise reduction by barriers : Journal off the Acoustical Society of America, 1974. – Vol. 55, №3. – pp. 157-173.

3. Shashurin A.E. Analysis of calculation of effeciency noise barriers methodologies; / Noise Theory and Practice. – 2018. – Vol. 4, №2. – pp. 5-10.

4. Noveye tekhnicheskie i tekhnologicheskie resheniya dlya snizheniya akusticheskogo zagryazneniya shumozashchitnymi ekranami. Monography / A. E. SHashurin – SPb.: Balt. gos. tekhn. un-t, 2018. – p.134

5. Shashurin A.E., Theoretical principles for efficiency calculations for the noise barriers along high-speed railways, 25th International Congress on Sound and Vibration, ICSV 2018 – pp.3963-2968, ISBN 978-1-5108-6845-8

6. Spravochnik proektirovshchika. Zashchita ot shuma. / Pod red. E. YA. YUdina. – М.: «Strojizdat», 1974. – p.134