

УДК 628.517:625.1.08

РАСЧЕТ ЗВУКОИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ ДВОЙНОГО ОСТЕКЛЕНИЯ СИСТЕМ ШУМОЗАЩИТЫ НА УЧАСТКЕ ИСПЫТАНИЙ ДВИГАТЕЛЕЙ ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН

И.В. КОЛЕСНИКОВ, Ю.И. БАГИЕВ

(Ростовский государственный университет путей сообщения),

П.Д. МОТРЕНКО

(Донской государственный технический университет)

Представлен расчет звукоизоляции двойного остекления для систем шумозащиты на участке испытаний двигателей транспортных машин. Выявлены зависимости прохождения звуковой энергии через двойной стеклопакет. Рассмотрены возможные пути увеличения звукоизоляции двойного остекления.

Ключевые слова: шум, звукоизоляция, двойное остекление, системы шумозащиты.

Введение. Теоретическое исследование генерации шума при обкатке двигателей транспортных машин, разработка моделей шумообразования позволяют рассчитать уровни шума, возникающие в рабочей зоне операторов. Наиболее «слабым» элементом в ограждающих конструкциях является остекление и можно предположить, что именно оно излучает повышенные уровни шума. Само остекление имеет малый эффективный коэффициент потерь колебательной энергии. Применение вибродемпфирующих материалов в этом случае исключено. Для таких конструкций вибрационное поле определяется резонирующими формами собственных колебаний.

Современные технологии позволяют широко применять двойные и тройные стеклопакеты, которые обладают высокими характеристиками не только термоизоляции, но и шумоизоляции, по сравнению с однослойным остеклением. Предлагаемый расчет звукоизоляции таких многослойных элементов остекления позволяет подбором толщин стеклянных пластин и воздушных промежутков достичь санитарных норм шума на рабочем месте оператора.

Методы решения. Метод расчета звукоизоляции многослойных конструкций типа «сэндвич» существенно отличается от однослойных. Элементы ограждения следует выполнять многослойными, с различным количеством и механическими характеристиками слоев. Согласно данным работ [1-3] система уравнений для многослойной конструкции имеет вид:

$$\begin{aligned} \rho_1 \cdot (A_1 + A'_1) &= \rho_2 \cdot (A_2 + A'_2); \\ -a_1 A_1 + a_1 A'_1 &= -a_2 A_2 + a_2 A'_2; \\ \rho_2 [A_2 \exp(-ia_2 x_1) + A'_2 \exp(ia_2 x_1)] &= \rho_3 [A_3 \exp(-ia_3 x_1) + A'_3 \exp(ia_3 x_1)]; \\ a_2 [-A_2 \exp(-ia_2 x_1) + A'_2 \exp(ia_2 x_1)] &= a_3 [-A_3 \exp(-ia_3 x_1) + A'_3 \exp(ia_3 x_1)]; \\ &\dots\dots\dots \\ \rho_{k-1} [A_{k-1} \exp(-ia_{k-1} x_{k-2}) + A'_{k-1} \exp(ia_{k-1} x_{k-2})] &= \rho_k A_k \exp(-ia_k x_{k-2}); \\ a_{k-1} [-A_{k-1} \exp(-ia_{k-1} x_{k-2}) + A'_{k-1} \exp(ia_{k-1} x_{k-2})] &= -a_k A_k \exp(-ia_k x_{k-2}). \end{aligned} \quad (1)$$

Из этой системы уравнений определяются коэффициенты отражения r_{p_k} и проникновения t_{p_k} волны давления

$$r_{p_k} = \frac{A'_k}{A_k}; \quad t_{p_k} = \frac{A_k}{A_{k-1}}.$$

Звукоизоляция определяется по формуле

$$ЗИ = 10 \lg \frac{1}{t_p^2},$$

где $t_p = \prod_2^k t_{p_k} = \frac{A_k}{A_1}.$

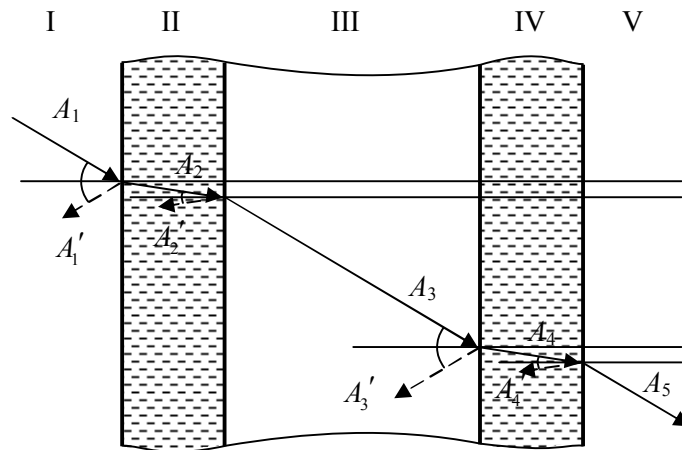


Рис.1. Схема прохождения звуковой энергии через двойное остекление

Поскольку двойное остекление имеет воздушный промежуток между стеклами, то количество границ между различными средами $k=5$ (рис.1). С точки зрения вычислений расчет коэффициента многослойной звукоизоляции сводится к следующей задаче: для каждой частоты f_j из заданной последовательности (среднегеометрические полосы октавных или третьоктавных фильтров) найти

$$R = 10 \lg \frac{1}{|t_p|^2},$$

где $|t_p|$ — действительная часть комплексной величины t_p .

Система уравнений для пяти сред будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{cases} \rho_1 (A_1 + A_1') = \rho_2 (A_2 + A_2'); \\ a_1 (-A_1 + A_1') = a_2 (-A_2 + A_2'); \\ \rho_2 (A_2 \exp(-ia_2 x_1) + A_2' \exp(ia_2 x_1)) = \rho_3 (A_3 \exp(-ia_3 x_1) + A_3' \exp(ia_3 x_1)); \\ a_2 (-A_2 \exp(-ia_2 x_1) + A_2' \exp(ia_2 x_1)) = a_3 (-A_3 \exp(-ia_3 x_1) + A_3' \exp(ia_3 x_1)); \\ \rho_3 (A_3 \exp(-ia_3 x_2) + A_3' \exp(ia_3 x_2)) = \rho_4 (A_4 \exp(-ia_4 x_2) + A_4' \exp(ia_4 x_2)); \\ a_3 (-A_3 \exp(-ia_3 x_2) + A_3' \exp(ia_3 x_2)) = a_4 (-A_4 \exp(-ia_4 x_2) + A_4' \exp(ia_4 x_2)); \\ \rho_4 (A_4 \exp(-ia_4 x_3) + A_4' \exp(ia_4 x_3)) = \rho_5 A_5 \exp(-ia_5 x_3); \\ a_4 (-A_4 \exp(-ia_4 x_3) + A_4' \exp(ia_4 x_3)) = -a_5 A_5 \exp(-ia_5 x_3). \end{cases} \quad (2)$$

Здесь ρ_k — плотности материала слоев системы; i — мнимая единица;

$$a_k = \begin{cases} \frac{2\pi f_j}{c_k} \cos \theta_k, & \text{где } \theta_k = \arcsin h_k; \quad h_k \leq 1; \\ -i|a|, & \text{где } |a| = \frac{2\pi f_j}{c_{k-1}} \sqrt{h_{k-1}^2 - \frac{c_{k-1}^2}{c_k^2}}, \quad h_k > 1, \end{cases}$$

c_k – скорости распространения звука в материале слоев системы, причем:

$$\frac{c_1}{h_1} = \frac{c_2}{h_2} = \dots = \frac{c_5}{h_5},$$

где h_k – толщина k -го слоя материала.

Угол падения звуковой волны на стекло со стороны источника шума является случайной величиной с равномерной плотностью распределения на участке $0 \div 2\pi$. Поэтому $\theta_1 = \arccos 0,637$, а $h_1 = \sin \theta_1$.

Двойное остекление представляет собой среду, состоящую из пяти компонент, в которой I, III и V среды являются воздушной составляющей, а II и IV – остекление. В системе (2) учтено, что в I – IV средах имеют место две волны: падающая (или пройденная) – A_k ; и отраженная – A'_k . Пятая среда представляет собой воздушный объем производственного помещения, который имеет большие габаритные размеры. Поэтому в производственном помещении учитывается только пройденная волна. Тогда для двойного остекления система уравнений будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{cases} \rho_1 (A_1 + A'_1) = \rho_2 (A_2 + A'_2); \\ a_1 (-A_1 + A'_1) = a_2 (-A_2 + A'_2); \end{cases}$$

$$\begin{cases} \rho_2 (A_2 \exp(-ia_2 h_1) + A'_2 \exp(ia_2 h_1)) = \rho_1 (A_3 \exp(-ia_3 h_1) + A'_3 \exp(ia_3 h_1)); \\ a_2 (-A_2 \exp(-ia_2 h_1) + A'_2 \exp(ia_2 h_1)) = a_3 (-A_3 \exp(-ia_3 h_1) + A'_3 \exp(ia_3 h_1)); \end{cases}$$

$$\begin{cases} \rho_1 (A_3 \exp(-ia_3 h_2) + A'_3 \exp(ia_3 h_2)) = \rho_2 (A_4 \exp(-ia_4 h_2) + A'_4 \exp(ia_4 h_2)); \\ a_3 (-A_3 \exp(-ia_3 h_2) + A'_3 \exp(ia_3 h_2)) = a_4 (-A_4 \exp(-ia_4 h_2) + A'_4 \exp(ia_4 h_2)); \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \rho_2 (A_4 \exp(-ia_4 h_3) + A'_4 \exp(ia_4 h_3)) = \rho_1 A_5 \exp(-ia_5 h_3); \\ a_4 (-A_4 \exp(-ia_4 h_3) + A'_4 \exp(ia_4 h_3)) = -a_5 A_5 \exp(-ia_5 h_3). \end{cases}$$

Здесь h_1 и h_3 – толщина стекла; h_2 – толщина воздушного промежутка.

Величина a во второй и четвертой средах (в элементах остекления) определяется

$$a_{2(4)} = i |a_{2(4)}|,$$

где $|a_{2(4)}| = \frac{2\pi}{c_2} \sqrt{\sin^2 \theta - \left(\frac{c_1}{c_2}\right)^2}$.

Здесь c_1 и c_2 – скорости звука в воздухе и стекле (соответственно), м/с. Тогда

$$a_1 = a_3 = a_5 = 0,012 f_j,$$

$$a_2 = a_4 = 0,002 f_j.$$

С учетом этого систему уравнений приведем к виду

$$\begin{cases} A_1 + A'_1 = 1458 (A_2 + A'_2); \\ 6 (-A_1 + A'_1) = -A_2 + A'_2; \end{cases}$$

$$\begin{cases}
1458(A_2 \exp(-i0,002f_j h_1) + A_2' \exp(i0,002f_j h_1)) = A_3 \exp(-i0,012f_j h_1) + A_3' \exp(i0,012f_j h_1); \\
-A_2 \exp(-i0,002f_j h_1) + A_2' \exp(i0,002f_j h_1) = 6(-A_3 \exp(-i0,012f_j h_1) + A_3' \exp(i0,012f_j h_1)); \\
A_3 \exp(-i0,012f_j h_2) + A_3' \exp(i0,012f_j h_2) = 1458(A_4 \exp(-i0,002f_j h_2) + A_4' \exp(i0,002f_j h_2)); \\
6(-A_3 \exp(-i0,012f_j h_2) + A_3' \exp(i0,012f_j h_2)) = -A_4 \exp(-i0,002f_j h_2) + A_4' \exp(i0,002f_j h_2); \\
1458(A_4 \exp(-i0,002f_j h_3) + A_4' \exp(i0,002f_j h_3)) = A_5 \exp(-i0,012f_j h_3); \\
-A_4 \exp(-i0,002f_j h_3) + A_4' \exp(i0,002f_j h_3) = -6A_5 \exp(-i0,012f_j h_3).
\end{cases} \quad (4)$$

Приведенная система (4) состоит из 4 подсистем, каждая из которых содержит по два не-известных: A_k и A_{k+1} , а также промежуточные величины A_k' и A_{k+1}' .

Введем обозначения:

$$\begin{aligned}
\frac{A_1'}{A_1} = Z_1; \quad \frac{A_2}{A_1} = Z_2; \quad \frac{A_2'}{A_1} = Z_3; \quad \frac{A_2'}{A_2} = Z_4; \quad \frac{A_3}{A_2} = Z_5; \quad \frac{A_3'}{A_2} = Z_6; \\
\frac{A_3'}{A_3} = Z_7; \quad \frac{A_4}{A_3} = Z_8; \quad \frac{A_4'}{A_3} = Z_9; \quad \frac{A_4'}{A_4} = Z_{10}; \quad \frac{A_5}{A_4} = Z_{11}.
\end{aligned}$$

Такие подстановки дают возможность исключить в каждой паре уравнений вспомогательные величины и вести вычисления в отношениях Z_m , $m = 1, 2, \dots, 11$. Покажем это на примере преобразований последней пары уравнений.

Поделим оба уравнения последней пары на A_4 :

$$\begin{cases}
1458 \left(\exp(-i0,002f_j h_3) + \frac{A_4'}{A_4} \exp(i0,002f_j h_3) \right) = \frac{A_5}{A_4} \exp(-i0,012f_j h_3); \\
-\exp(-i0,002f_j h_3) + \frac{A_4'}{A_4} \exp(i0,002f_j h_3) = -6 \frac{A_5}{A_4} \exp(-i0,012f_j h_3).
\end{cases}$$

С учетом введенных обозначений:

$$\begin{cases}
1458 \left(\exp(-i0,002f_j h_3) + Z_{10} \exp(i0,002f_j h_3) \right) = Z_{11} \exp(-i0,012f_j h_3); \\
-\exp(-i0,002f_j h_3) + Z_{10} \exp(i0,002f_j h_3) = -6Z_{11} \exp(-i0,012f_j h_3).
\end{cases}$$

Решая эту систему методом подстановки, получаем:

$$\begin{aligned}
Z_{10} = \frac{A_4'}{A_4} = -\frac{8747}{8749} \exp(-i0,004f_j h_3); \\
Z_{11} = \frac{A_5}{A_4} = 1458 \left(\exp(i0,010f_j h_3) + Z_{10} \exp(i0,014f_j h_3) \right).
\end{aligned}$$

Аналогично из остальных пар уравнений получаем $Z_1, Z_2, \dots, Z_8$ и можем найти

$$t_p = Z_{11} \cdot Z_8 \cdot Z_5 \cdot Z_2,$$

а, исходя из этого выражения, определяется звукоизоляция

$$3II = 10 \lg \frac{1}{|t_p|^2}$$

Заключение. Как видно из полученных выражений, конструктивными размерами элементов двойного остекления (в частности толщинами), как «слабого» звена в системе шумозащиты, можно добиться выполнения санитарных норм шума на рабочем месте оператора. Необходимая звукоизоляция в этом случае достигается рациональным подбором не только толщин стекол, но и воздушного промежутка между ним.

Библиографический список

1. Ржевкин С.Н. Курс лекций по теории звука / С.Н. Ржевкин. – М.: Изд-во МГУ, 1960. – 335 с.
2. Чукарин А.Н. Теория и методы акустических расчетов и проектирования технологических машин для механической обработки / А.Н. Чукарин. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2004. – 152 с.
3. Шамшура С.А. Моделирование процессов шумообразования и вибраций оборудования виброупрочнения и динамических испытаний: монография / С.А. Шамшура // – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2010. – 177 с.

Материал поступил в редакцию 15.10.2011.

References

1. Rzhevkin S.N. Kurs lekcij po teorii zvuka / S.N. Rzhevkin. – M.: Izd-vo MGU, 1960. – 335 s. – In Russian.
2. Chukarin A.N. Teoriya i metody` akusticheskix raschyotov i proektirovaniya texnologicheskix mashin dlya mexanicheskoy obrabotki / A.N. Chukarin. – Rostov n/D: Izdatel`skij centr DGTU, 2004. – 152 s. – In Russian.
3. Shamshura S.A. Modelirovanie processov shumoobrazovaniya i vibracij oborudovaniya vibrouprochneniya i dinamicheskix ispy`tanij: monografiya / S.A. Shamshura. – Rostov n/D: Izdatel`skij centr DGTU, 2010. – 177 s. – In Russian.

SOUND-PROOFING CALCULATIONS FOR DOUBLE GLAZING ELEMENTS OF NOISE PROTECTION SYSTEMS IN SECTION FOR VEHICULAR ENGINE TESTS

I.V. KOLESNIKOV, Y.I. BAGIYEV

(Rostov State Transport University),

P.D. MOTRENKO

(Don State Technical University)

Calculations of the double glazing sound-proofing for the noise protection systems in the section for the vehicular engine tests are presented. The dependences of the acoustic energy passing through the double-pane insulated window are revealed. Possible ways of increase of the double glazing sound-proofing are considered.

Keywords: noise, sound-proofing, double glazing, noise protection systems.