

*А.П. Савельев, А.Н. Скворцов*  
(Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва;  
e-mail: squortsow.sasha@yandex.ru)

## **ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ АКУСТИЧЕСКОЙ ШИРМЫ ДЛЯ ПРЕДПРИЯТИЙ МОЛОЧНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

*Предложен вариант акустической ширмы для защиты окружающего населения от шума на предприятиях молочной промышленности.*

*Ключевые слова: шум, акустическая ширма, охрана труда.*

*A.P. Savelev, A.N. Skvorcov*

## **EVALUATING OF EFFICIENCY OF THE ACOUSTIC BAFFLE FOR DAIRY INDUSTRY ENTERPRISES**

*A variant of acoustic screens to protect the surrounding population from the noise on the dairy industry enterprises was proposed.*

*Key words: noise, acoustic baffle, labor protection.*

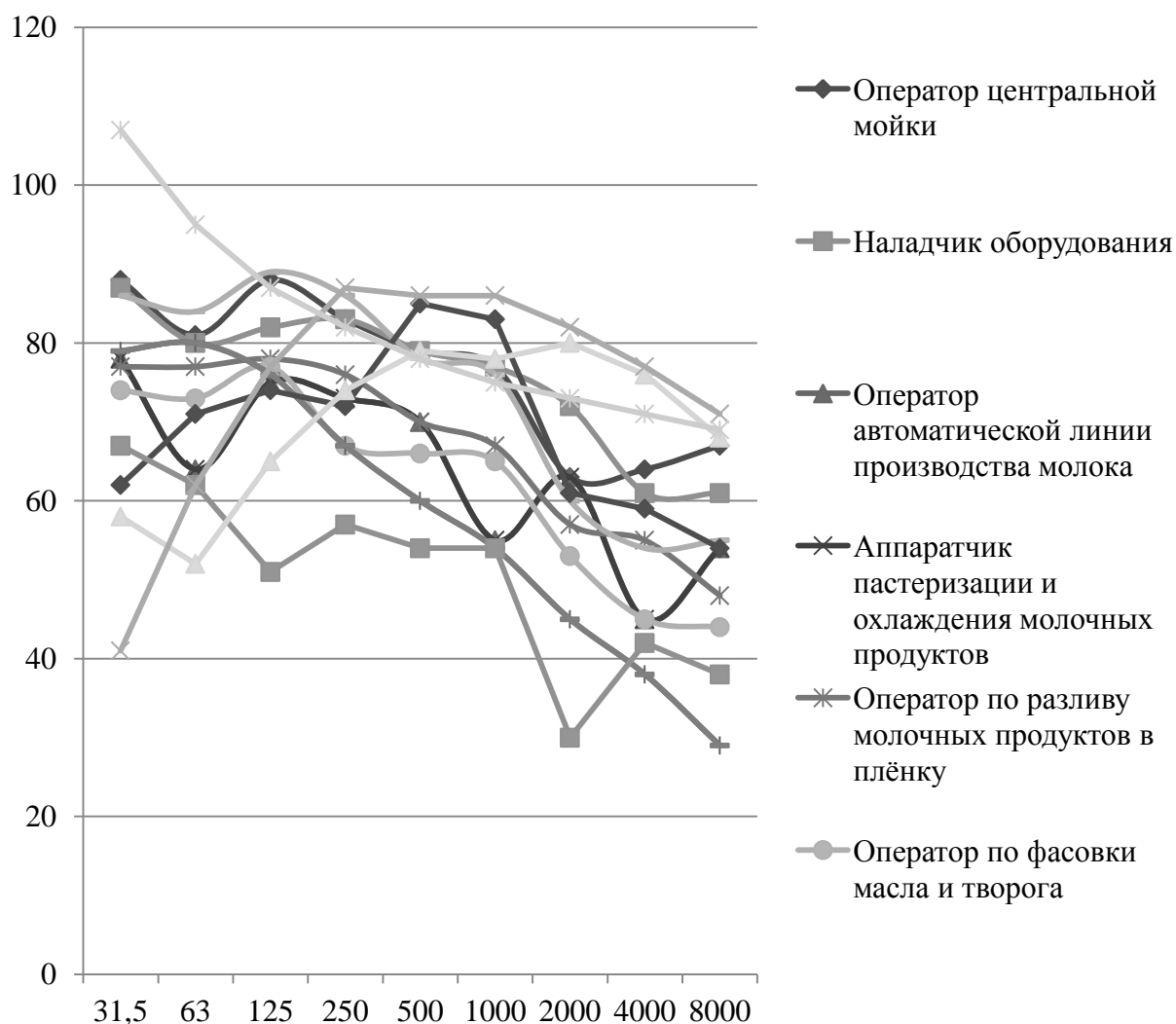
Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 21 августа 2015 г.

За последний год в России наблюдается рост производства продукции пищевой промышленности, где планируется полное перевооружение технической базы [6]. Увеличение производства в большинстве случаев приводит к повышению уровня шума, который входит в тройку наиболее значимых "загрязнений" (по статистическим данным, от шума во всём мире страдают более 16 % персонала сферы производства) [4].

Авторами данной статьи проведена оценка уровня шума на предприятиях молочной промышленности, где были сделаны измерения на рабочих местах прибором SVAN-943 [3]. Полученные результаты сравнили с **предельно допустимым уровнем (ПДУ)** шума по ГОСТ 12.4.062-78 и показали на рис. 1.

Из рис. 1 можно заметить:

- Превышение ПДУ шума машиниста холодильных установок – (250 Гц – 5 дБА; 500 Гц – 8 дБА; 1000 – 11 дБА; 2000 – 9 дБА; 4000 – 6 дБА; 8000 – 2 дБА).
- Превышение ПДУ шума оператора автомата по разливу молока в пакеты – (125 Гц – 2 дБА; 250 Гц – 4 дБА; 1000 Гц – 1 дБА).
- Превышение ПДУ шума маслодела – (500 Гц – 7 дБА; 1000 Гц – 8 дБА).
- Превышение ПДУ шума оператора газовой котельной – (500 Гц – 1 дБА; 1000 Гц – 3 дБА; 2000 – 7 дБА; 4000 Гц – 5 дБА).
- Превышение ПДУ шума оператора центральной мойки – (250 Гц – 1 дБА; 500 Гц – 1 дБА; 1000 Гц – 2 дБА).
- Превышение предельно допустимого уровня шума наладчика оборудования – (250 Гц – 1 дБА; 500 Гц – 1 дБА; 1000 Гц – 2 дБА).



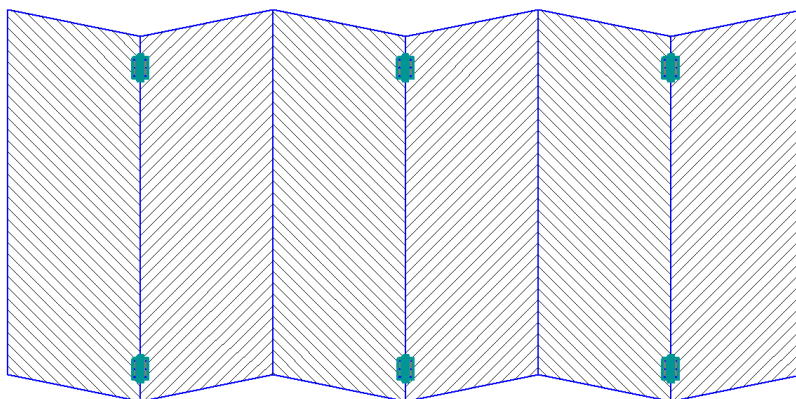
**Рис. 1.** Результаты измерений уровня шума на предприятиях молочной промышленности

Для защиты от повышенного шума используются различные звукоизолирующие материалы. Однако практически все они работают по принципу естественного затухания звуковых волн. Недостатком данных материалов является то, что для достижения нужного результата в помещениях с большой громкостью приходится увеличивать толщину материала.

Эффективность выбора конструкций должны обосновываться в каждом конкретном случае и удовлетворять критериям:

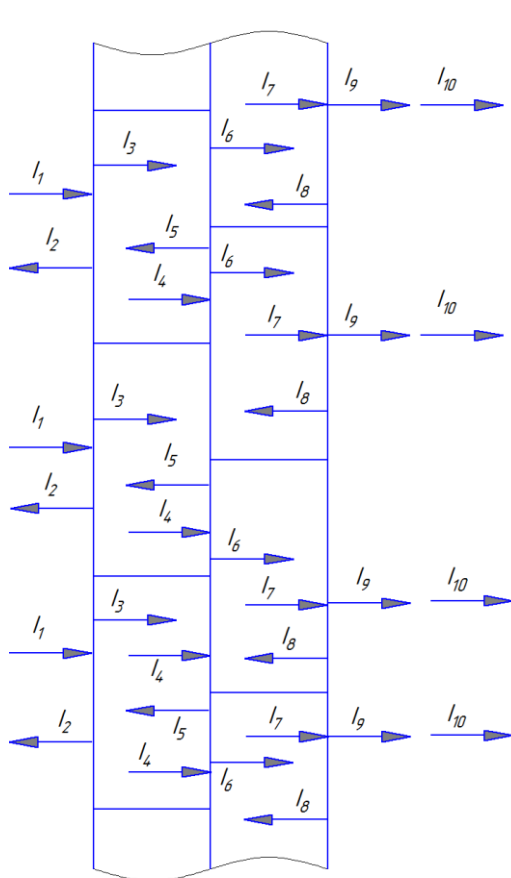
- применение звукоизолирующей конструкции не должно повлиять на работоспособность защищаемого оборудования;
- звукозащитные конструкции должны занимать как можно меньший объём помещения;
- звукозащитные свойства должны обеспечивать задаваемые значения;
- затраты, касающиеся производства звукозащитных конструкций, должны быть минимальными.

Выполнять все вышеизложенные условия достаточно сложно. В данной статье предлагается методика оценки эффективности сложной конструкции новой звукозащитной *акустической ширмы (АШ)* (рис. 2).



**Рис. 2.** Акустическая ширма

АШ представляет собой сочленение секций, соединённых между собой петлями. Каждая секция изготовлена из 3-х листового акустического материала с воздушными полостями между листами (рис. 3).



**Рис. 3.** Схема прохождения звука через 3-слойную конструкцию АШ

Каждый лист представляет собой тонкую пластину, соединённую параллельно с соседним листом.

Обозначения потоков:  $I_1$  – поток звука, падающего на лист 1;  $I_2$  – поток звука, отражённого от листа 1;  $I_3$  – поток звука, прошедшего через лист 1;  $I_4$  – поток звука, падающего на лист 2;  $I_5$  – поток звука, отражённого от листа 2;  $I_6$  – поток звука, прошедшего через лист 2;  $I_7$  – поток звука, падающего на лист 3;  $I_8$  – поток звука, отражённого от листа 3;  $I_9$  – поток звука, прошедшего через лист 3;  $I_{10}$  – поток звука, ушедшего с листа 3.

Произведём расчёт акустической эффективности АШ, пользуясь формулой Н.В. Тюриной для офисных и производственных объектов [8]:

$$\Delta L_{\text{АЭ}}^{\text{пом}} = 10 \lg \left( \frac{x_{\text{ист}}}{2\pi(r_1+r_2)^2} + \frac{4}{B_{\text{пом}} \cdot \Psi_{\text{пом}}} \right) - 10 \lg \left[ \frac{4}{B_{\text{пом}} \cdot \Psi_{\text{пом}}} + \frac{x_{\text{ист}}(1-\alpha_{\text{экр}}) \cdot \tau_{\text{экр}}}{2\pi^2 r_1^2} \cdot \arctg \frac{h_{\text{экр}} \cdot b_{\text{экр}}}{2\pi^2 r_2 \sqrt{4r_2^2 + h_{\text{экр}}^2 + b_{\text{экр}}^2}} + \frac{x_{\text{ист}} \beta_{\text{дифр}} (1-\alpha_{\text{экр}}) \lambda}{2\pi^3 r_1^2 h_{\text{экр}} r_2} \cdot \arctg \frac{b_{\text{экр}}}{2h_{\text{экр}}} \cdot \arctg \frac{b_{\text{экр}}}{2r_2} \right], \quad (1)$$

где  $x_{\text{ист}}$  – коэффициент, учитывающий размеры источника шума;

$\tau_{\text{экр}}$  – коэффициент звукопроводности АШ;

$B_{\text{пом}}$  – акустическая постоянная помещения,  $\text{м}^2$ ;

$\Psi_{\text{пом}}$  – коэффициент, учитывающий неравномерность звукового поля в помещении;

$b_{\text{экр}}$  – ширина АШ,  $\text{м}$ ;

$\beta_{\text{дифр}}$  – коэффициент дифракции АШ, рассчитывается по формуле (2) [5].

$$\beta_{\text{дифр}} = \frac{I_{\text{дифр}}}{I_{\text{пад}}^{\text{экр}}}, \quad (2)$$

где  $I_{\text{дифр}}$  – интенсивность звука, дифрагирующего на свободном ребре;

$I_{\text{пад}}^{\text{экр}}$  – интенсивность звука, падающего на поверхность АШ.

Для определения коэффициента поглощения АШ необходимо определить отношение интенсивности поглощённого в конструкции звука к интенсивности падающего звука, для этого воспользуемся соотношением [5]:

$$\alpha = \frac{I_{\text{погл}}}{I_{\text{пад}}}, \quad (3)$$

где  $I_{\text{пад}}$  – интенсивность падающего звука;

$I_{\text{погл}}$  – интенсивность поглощённого звука.

Принимая во внимание все звуковые потоки, изображённые на рис. 2, получим:

$$\alpha = \frac{I_2 + I_{n_1} + I_5 + I_{n_2} + I_8 + I_{n_3}}{I_1}. \quad (4)$$

Интенсивность отражённого звука определяется [5]:

$$I_{\text{отр}} = I_{\text{пад}}(1 - \tau), \quad (5)$$

где  $I_{\text{пад}}$  – интенсивность падающего звука;

$\tau$  – коэффициент звукопроводности материала.

При диффузном падении звуковой волны применим преобразованную формулу Пэриса [7]:

$$\tau = \frac{\ln(1 + Q^2)}{Q^2}, \quad (6)$$

где  $Q = \frac{\rho \cdot (2 \cdot \delta) \cdot f}{\rho \cdot c}$  – безразмерный комплекс;

$f = \frac{\omega}{2\pi}$  – частота, Гц;

$m_p$  – поверхностная плотность листового материала, кг/м<sup>2</sup>;

$\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$c$  – скорость звука в воздухе, м/с.

Интенсивность отражённого потока  $I_2$  от листа 1 определяем [1]:

$$I_2 = I_1 - I_3 = I_1 - I_1 \cdot \tau = I_1(1 - \tau), \quad (7)$$

где  $I_3 = I_1 \cdot \tau$  – интенсивность звука, прошедшего через лист 1, берём из формулы (5).

Потеря  $I_{n_1}$  на демпфирование окружающим воздухом будет рассчитываться по формуле (6) [5]:

$$I_{n_1} = I_3 \cdot \varepsilon, \text{ отсюда } I_{n_1} = I_1 \cdot \tau \cdot \varepsilon, \quad (8)$$

где  $\varepsilon$  – коэффициент звукопоглощения из формулы (6).

Поток звука, падающий на лист, заставляет его колебаться, это приводит к демпфированию окружающим воздухом и превращению части звуковой энергии в тепловую. Потеря звуковой энергии пропорциональна теоретическому количеству прошедшей энергии, используется коэффициент звукопоглощения [7]:

$$\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{\left(\frac{4}{3}\alpha + \frac{2}{3}Q\right)^2}}} = \frac{I_v}{I_{np}} \text{ или } I_v = I_{np}\varepsilon, \quad (9)$$

где  $I_v$  – энергия диссипации;

$\alpha$  – коэффициент звукопоглощения материала, м/с;

$Q, f, m_p, \rho, c$  – то же, что в формуле (6).

Определим интенсивность звукового потока, падающего на лист 2 [5]:

$$I_4 = I_3 - I_{n_1} = I_1 \cdot \tau - I_1 \cdot \tau \cdot \varepsilon = I_1 \cdot \tau(1 - \varepsilon). \quad (10)$$

Интенсивность звукового потока, отражённого от листа 2 [2]:

$$I_5 = I_4 - I_6 = I_1 \cdot \tau(1 - \varepsilon) - I_1 \cdot \tau^2(1 - \varepsilon) = I_1 \cdot \tau^2(1 - \varepsilon). \quad (11)$$

Прошедший через лист 2 звуковой поток будет определяться [1]:

$$I_6 = I_4 \cdot \tau = I_1 \cdot \tau^2(1 - \varepsilon). \quad (12)$$

Потеря на демпфирование окружающим воздухом [1]:

$$I_{n_2} = I_6 \cdot \varepsilon = I_1 \cdot \tau^2(1 - \varepsilon) \cdot \varepsilon = I_1 \cdot \tau^2 \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \varepsilon. \quad (13)$$

Определим интенсивность звукового потока, падающего на лист 3 [1]:

$$I_7 = I_6 - I_{n_2} = I_1 \cdot \tau^2(1 - \varepsilon) - I_1 \cdot \tau^2(1 - \varepsilon)\varepsilon = I_1 \cdot \tau^2(1 - \varepsilon)^2. \quad (14)$$

Интенсивность звукового потока, отражённого от листа 3 [1]:

$$I_8 = I_7 - I_9 = I_1 \cdot \tau^2(1 - \varepsilon)^2 - I_1 \cdot \tau^3(1 - \varepsilon)^2 = I_1 \cdot \tau^3(1 - \varepsilon)^2. \quad (15)$$

Потеря на демпфирование окружающим воздухом [1]:

$$I_{n_3} = I_9 \cdot \varepsilon = I_1 \cdot \tau^3(1 - \varepsilon)^2 \cdot \varepsilon = I_1 \cdot \tau^3(1 - \varepsilon)^2 \cdot \varepsilon. \quad (16)$$

Прошедший через лист 3 звуковой поток [1]:

$$I_9 = I_7 \cdot \tau = I_1 \cdot \tau^2(1 - \varepsilon)^2 \cdot \tau = I_1 \cdot \tau^3(1 - \varepsilon)^2. \quad (17)$$

Подставляя найденные значения в формулу (4), найдём коэффициент звукопоглощения АШ:

$$\alpha = 1 - \tau + \tau \cdot \varepsilon + \tau^2(1 - \varepsilon) + \tau^2(1 - \varepsilon)\varepsilon + \tau^3(1 - \varepsilon)^2 + \tau^3(1 - \varepsilon)^2\varepsilon. \quad (18)$$

Упрощаем выражение и получаем:

$$\alpha = (\varepsilon - 1)^2 \cdot (\varepsilon + 1) \cdot \tau^3 - (\varepsilon^2 - 1) \cdot \tau^2 + (\varepsilon - 1) \cdot \tau + 1. \quad (19)$$

Подставляя значения в формулу (19), получаем:

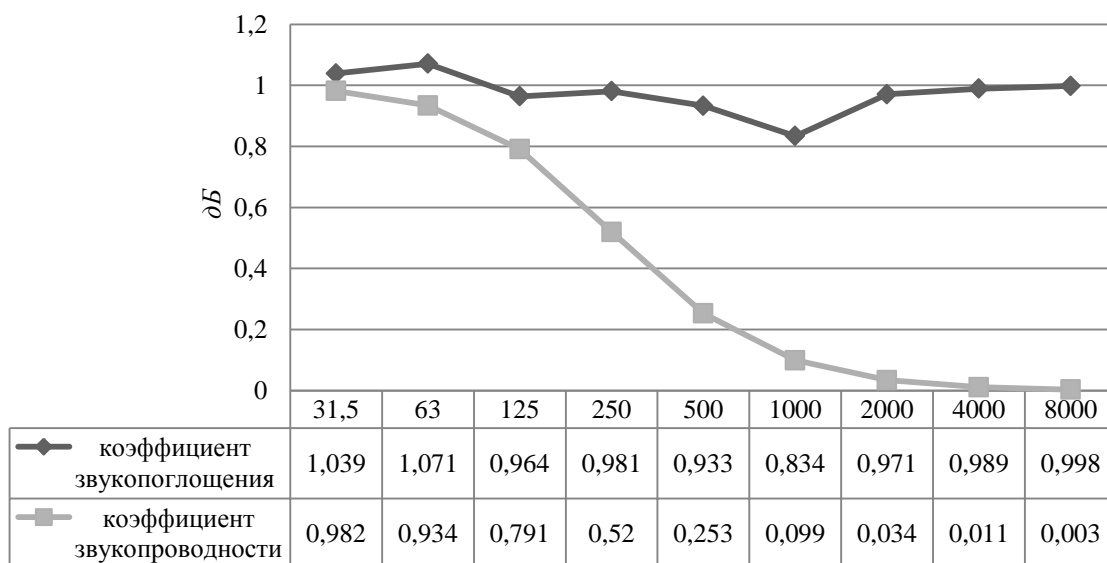
$$\alpha = \left[ \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{\left(\frac{4}{3}\alpha + \frac{2}{3}Q\right)^2}}} - 1 \right]^2 \cdot \left[ \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{\left(\frac{4}{3}\alpha + \frac{2}{3}Q\right)^2}}} + 1 \right] \cdot \left( \frac{\ln(1+Q^2)}{Q^2} \right)^3 - \left[ \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{\left(\frac{4}{3}\alpha + \frac{2}{3}Q\right)^2}}} - 1 \right] \cdot \left( \frac{\ln(1+Q^2)}{Q^2} \right)^2 + \left[ \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{\left(\frac{4}{3}\alpha + \frac{2}{3}Q\right)^2}}} - 1 \right] \cdot \frac{\ln(1+Q^2)}{Q^2} + 1. \quad (20)$$

Подставляя значения в полученные формулы, находим  $\alpha_{\text{АШ}}, \tau_{\text{АШ}}, \Delta L_{\text{АШ}}^{\text{пом}}$ , полученные результаты сводим в табл. 1 и покажем на рис. 2, 3.

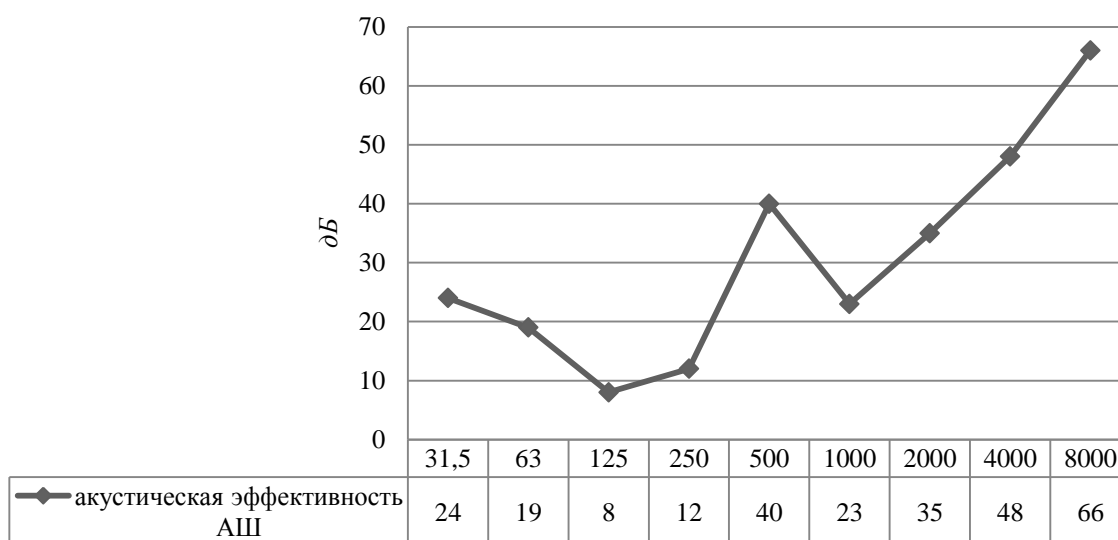
Таблица 1

**Коэффициенты звукопоглощения, звукопроводности, акустической эффективности АШ (полистирол)**

Частота, Гц	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Коэффициент звукопоглощения $\alpha_{\text{АШ}}$	1,039	1,071	0,964	0,981	0,933	0,834	0,971	0,989	0,998
Коэффициент звукопроводности $\tau_{\text{АШ}}$	0,982	0,934	0,791	0,520	0,253	0,099	0,034	0,011	0,003
Акустическая эффективность $\Delta L_{\text{АШ}}^{\text{пом}}$	24	19	8	12	40	23	35	48	66



**Рис. 2.** Коэффициенты звукопроводности и звукопоглощения АШ



**Рис. 3.** Акустическая эффективность АШ

Предлагаемая конструкция АШ позволит существенно снизить нежелательный шум на производственных объектах. АШ обладает небольшой толщиной и неплохой акустической эффективностью.

Исследования показали, что АШ в диапазоне частот 31,5-8000 Гц в среднем уменьшает уровень шума на 40 дБ.

Подводя итог данной статьи, можно сказать, что применение АШ для защиты персонала на производственных объектах позволит снизить заболевания персонала, возникающие при нахождении в местах с повышенным шумом.

### Литература

1. **Савельев А.П., Скворцов А.Н.** Звукоподавляющий облегчённый акустический экран // Охрана и экономика труда. 2015. № 2 (19). С. 56-61.
2. **Савельев А.П., Скворцов А.Н.** Расчёт коэффициента звукопоглощения сложной конструкции звукоподавляющего акустического экрана (ЗПАЭ) // Охрана и экономика труда. 2015. № 3 (20). С. 56-61.
3. **Савельев А.П., Савельева С.А., Малова О.В.** Влияние шума на работников молочной промышленности // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2010. № 19. С. 338-343.
4. **Скворцов А.Н.** Анализ исследования источников шума объектов животноводства // Электронный периодический научный журнал "SCI-ARTICLE.RU". 2014. № 5. С. 159-164.
5. **Иванов Н.И.** Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом. М., Логос, 2008. 422 с.
6. **Мансурова А.Ф.** Последствия санкций США и ЕС для Российской экономики // Электронный периодический научный журнал "SCI-ARTICLE.RU". 2014. № 14. С. 228-230.
7. **Мурзинов П.В.** Выбор листового материала для звукоизолирующих облегчённых структурированных панелей // Экология. Риск. Безопасность: матер. междунар. науч.-практ. конф. Курган: Курганский гос. ун-т, 2010. С. 149-150.
8. **Тюрина Н.В.** Исследование акустических экранов // XXVII сессия Российского акустического общества, посвящённая памяти учёных-акустиков ФГУП "Крыловский государственный научный центр" А.В. Смольякова и В.И. Попкова: Санкт-Петербург, 16-18 апреля 2014 г.