
СОВРЕМЕННОЕ ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСКОЕ РЕШЕНИЕ ДЛЯ ЗАЩИТЫ НАСЕЛЕНИЯ ОТ ЭНЕРГИИ ШУМА

А.Н. Скворцов

Институт механики и энергетике
Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва
ул. Российская, д. 7, р.п. Ялга, республика Мордовия, Россия, 430904

Одной из актуальных проблем современной экологии является исследование воздействия неблагоприятных факторов среды жизни на физическое развитие и здоровье населения. Статья посвящена решению актуальной задачи защиты населения от энергии шума производственных объектов. Производственные объекты повсеместно оснащены шумящим оборудованием. Если уровень энергии шума превышает (ПДУ), то проводятся шумозащитные мероприятия. Установлено, что длительное воздействие шума приводит к нарастанию медленноволновой активности, а также изменению зрительного и слухового коркового ответа с нарастанием латентности и снижением амплитудных значений основных пиков, что свидетельствует о стрессовой реакции на раздражитель. В данной статье рассмотрен одним из наиболее распространенных средств защиты от энергии шума, а именно акустический экран. Автором предложен вариант акустического экрана. Расчетным путем произведена оценка звукоизоляции акустического экрана от прямого воздействия энергии шума.

Ключевые слова: шум, акустический экран, охрана труда, акустическое загрязнение, звукозащитный материал

Перевооружение пищевых отраслей промышленности на новой технической основе [1], повышение производства в большинстве случаев приводят к значительному повышению энергии шума производственных помещений. Это объясняется прежде всего стремлением постоянно уменьшать коэффициент свободного пространства за счет увеличения концентрации производственного оборудования с интенсивным шумоизлучением [2; 3].

Повышенный шум оказывает вредное воздействие не только на слуховые органы человека, но и на весь организм, являясь катализатором болезней, прежде всего ЦНС. Акустическое загрязнение вызывает быструю утомляемость, снижение концентрации внимания. Воздействие шума на сердечно-сосудистую систему приводит к аритмии и расслаблению тонуса сердечных сосудов. При длительном воздействии шумовой экспансии происходит нарушение работы желудочно-кишечного тракта, что выражается в ухудшении поступления желудочного сока. В связи с этим работа по снижению шума направлена в большинстве случаев на сохранение здоровья трудящихся, следовательно, проблема повышенного шума занимает важное место в комплексе мероприятий, направленных на оздоровление всего человечества [2—4].

Другим отрицательным последствием повышенного производственного шума является снижение производительной силы труда. Принимаем производительность труда при уровне шума 75 дБ за 100%, тогда при шуме 80 дБ производительность понижается до 96%, до 85 дБ — 90%, до 90 дБ — 80%, а при 95 дБ — 70%.

Снижение шума, исходящего от оборудования, имеет не только социальное, но экономическое значение.

Для выявления машин, которые создают повышенный шум в помещениях пищевой промышленности, были выполнены замеры звукового давления некоторого оборудования в производственном цехе с помощью измерительного прибора шума и вибрации SVAN—943. Полученные результаты были сравнимы с предельно допустимыми уровнями (ПДУ) по ГОСТ Р ИСО 9612-2013 (табл. 1).

Цель данного исследования заключалась в идентификации источников шума и разработка предложений по снижению шума доминирующих источников.

Таблица 1

Уровни звукового давления (дБ) в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц на рабочих местах в наиболее шумных местах предприятий пищевой промышленности

Рабочее место	Показатель	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц							
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Оператор оборудования по измельчению мяса	ПДУ (дБА)	95	87	82	78	75	73	71	69
	Фактич. значение (дБА)	95	87	89	83	82	77	77	72
Оператор сепаратора сливоотделения	ПДУ (дБА)	95	87	82	78	75	73	71	69
	Фактич. значение (дБА)	89	93	87	83	86	75	74	69
Оператор центральной мойки	ПДУ (дБА)	95	87	82	78	75	73	71	69
	Фактич. значение (дБА)	81	88	83	79	77	63	64	67
Оператор по разливу молочных продуктов	ПДУ (дБА)	95	87	82	78	75	73	71	69
	Фактич. значение (дБА)	77	78	76	70	67	57	55	48
Оператор прессовки и упаковки творожной массы	ПДУ (дБА)	95	87	82	78	75	73	71	69
	Фактич. значение (дБА)	89	88	83	77	73	67	68	65
Оператор обслуживающий машину для обсушки сыра	ПДУ (дБА)	95	87	82	78	75	73	71	69
	Фактич. значение (дБА)	96	90	84	72	69	72	65	64

Итак, измерения показали, что рассматриваемое оборудование имеет превышения (ПДУ), поэтому необходимы меры, которые позволят снизить уровень шума на рабочих местах операторов пищевой промышленности.

В данной статье предложена модель нового акустического экрана, состоящего из каркаса, выполненного из алюминия, в который помещается звукозащитный материал. Акустический экран размещается на колесах для облегчения его транспортировки (рис. 1). Основное отличие акустического экрана, предназначенного для защиты объектов пищевой промышленности от других акустических экранов, заключается в том, что верхний слой экрана изготавливается из влагоустойчивого материала, так как объекты пищевой промышленности в технологическом процессе имеют повышенную влажность.

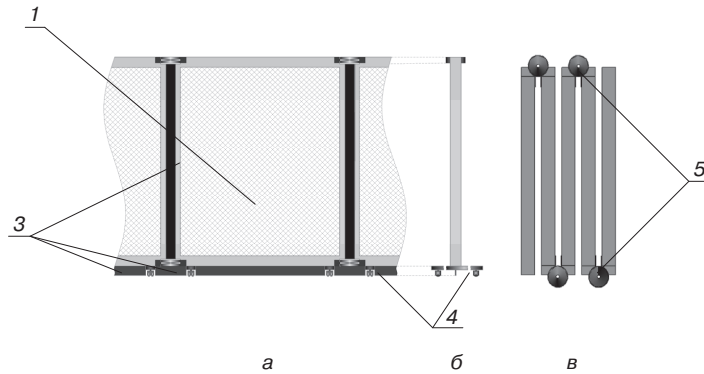


Рис. 1. Акустический экран:

а) вид спереди; б) вид сбоку; в) вид сверху; 1 — звукозащитный материал; 2 — каркас акустического экрана; 3 — резиновый уплотнитель; 4 — колеса; 5 — петли

Далее предложена упрощенная схема звукозащитного материала, состоящего из объемов заполненных воздухом. На схеме показаны потоки звуковой энергии, идущие через звукозащитный материал (рис. 2).

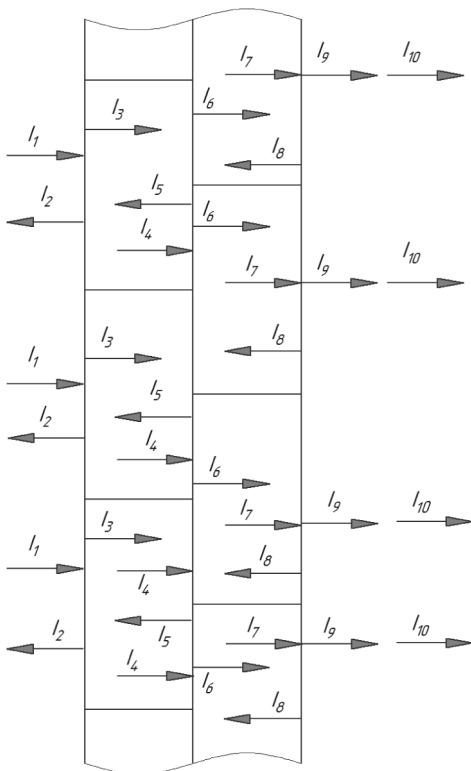


Рис. 2. Звукозащитный материал: I_1 — поток падения звуковой энергии на лист 1; I_2 — отраженный поток звуковой энергии от листа 1; I_3 — поток звуковой энергии прошедший через лист 1; I_4 — поток звуковой энергии падающий на лист 2; I_5 — поток звуковой энергии отраженной от листа 2; I_6 — поток звуковой энергии прошедшей через лист 2; I_7 — поток звуковой энергии падающей на лист 3; I_8 — поток звуковой энергии отраженной от листа 3; I_9 — поток звуковой энергии прошедшей через лист 3; I_{10} — поток звуковой энергии ушедшей с листа 3

На схеме звукозащитного материала выделяется три слоя листового материала. Каждый лист представляет собой пластину.

Для вычисления звукоизоляционных свойств рассматриваемого материала необходимо установить разницу между интенсивностью падающего звукового потока I_1 к интенсивности звукового потока прошедшего через АЭ I_{10} .

Для этого нам необходимо рассчитать звуковую энергию, которая проходит через пластины листового материала.

Поток звуковой энергии, падающий на лист звукозащитного материала, частично отражается от него, частично поглощается и частично проходит через него, данное соотношение можно записать при помощи уравнение баланса звуковой энергии [6]:

$$I_{\text{пад}} = I_{\text{погл}} + I_{\text{отр}} + I_{\text{пр}}, \quad (1)$$

где $I_{\text{пад}}$ — интенсивность падающего звука; $I_{\text{погл}}$ — интенсивность поглощенного звука; $I_{\text{отр}}$ — интенсивность отраженного звука; $I_{\text{пр}}$ — интенсивность прошедшего звука.

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

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

где $Q = \frac{\rho_1(2 \cdot \delta) \cdot f}{\rho \cdot c}$ — безразмерный комплекс; $f = \omega/2\pi$ — частота, Гц; δ — толщина листового материала, кг/м²; ρ — плотность воздуха, кг/м³; c — скорость звука в воздухе, м/с.

Отношение интенсивности прошедшего звука к интенсивности падающего звука называется коэффициентом звукопроводности, который вычисляется по формуле [6]:

$$\tau = I_{\text{пр}}/I_{\text{пад}} \text{ или } I_{\text{пр}} = I_{\text{пад}} \cdot \tau. \quad (3)$$

Звуковая волна, падающая на тонкий лист, приводит его в колебательное движение, которое демпфируется окружающим воздухом. Энергия диссипации безвозвратно переходит в тепловую энергию окружающей среды. Величину этой энергии можно определить на основе коэффициента звукопоглощения [7]:

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

где I_v — энергия диссипации; α — коэффициент звукопоглощения материала; м/с; Q, f, m_p, ρ, c — то же, что в формуле (2).

Волновые процессы звукозащитного материала рассмотрим с использованием интенсивности потока звуковой энергии.

Отраженный поток I_2 от листа 1 определяем [5]:

$$I_2 = I_1 - I_3 = I_1 - I_1 \cdot \tau = I_1(1 - \tau), \quad (5)$$

где $I_3 = I_1 \cdot \tau$ — звуковая энергия прошедшая через лист 1, берем из формулы (3).

Потеря I_{n1} на демпфирование окружающим воздухом будет рассчитываться по формуле (4) [5]:

$$I_{n1} = I_3 \cdot \varepsilon \text{ отсюда } I_{n1} = I_1 \cdot \tau \cdot \varepsilon, \quad (6)$$

где ε — коэффициент звукопоглощения из формулы (4).

Определим интенсивность звукового потока, падающего на лист 2, пользуясь формулами (6), (5) [5]:

$$I_4 = I_3 - I_{n1} = I_1 \cdot \tau - I_1 \cdot \tau \cdot \varepsilon = I_1 \cdot \tau(1 - \varepsilon). \quad (8)$$

Интенсивность звукового потока отраженного от листа 2 определяем, пользуясь формулами (5), (9) [5]:

$$I_5 = I_4 - I_6 = I_1 \cdot \tau(1 - \varepsilon) - I_1 \cdot \tau^2(1 - \varepsilon) = I_1 \cdot \tau^2(1 - \varepsilon). \quad (9)$$

Звуковой поток, прошедший через лист 2, будет определяться с использованием формулы (3) [5]:

$$I_6 = I_4 \cdot \tau = I_1 \cdot \tau^2(1 - \varepsilon). \quad (10)$$

Потерю на демпфирование окружающим воздухом рассчитаем по формуле (6) [5]:

$$I_{n2} = I_6 \cdot \varepsilon = I_1 \cdot \tau^2(1 - \varepsilon) \cdot \varepsilon = I_1 \cdot \tau^2(1 - \varepsilon) \cdot \varepsilon. \quad (11)$$

Определим интенсивность звукового потока падающего на лист 3, пользуясь выражениями (9), (10) [5]:

$$I_7 = I_6 - I_{n2} = I_1 \cdot \tau^2(1 - \varepsilon) - I_1 \cdot \tau^2(1 - \varepsilon) \cdot \varepsilon = I_1 \cdot \tau^2(1 - \varepsilon)^2. \quad (12)$$

Интенсивность звукового потока, отраженного от листа 3, определяем, пользуясь формулами (11), (14) [5]:

$$I_8 = I_7 - I_9 = I_1 \cdot \tau^2(1 - \varepsilon)^2 - I_1 \cdot \tau^3(1 - \varepsilon)^2 = I_1 \cdot \tau^3(1 - \varepsilon)^2. \quad (13)$$

Потерю на демпфирование окружающим воздухом рассчитаем по формуле (6) [5]:

$$I_{n3} = I_9 \cdot \varepsilon = I_1 \cdot \tau^3(1 - \varepsilon)^2 \cdot \varepsilon = I_1 \cdot \tau^3(1 - \varepsilon)^2 \cdot \varepsilon. \quad (14)$$

Звуковой поток, прошедший через лист 3, определяем, пользуясь выражением (3) [5]:

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

Определим интенсивность звукового потока, падающего на лист 4, пользуясь формулами (14), (15):

$$I_{10} = I_9 - I_{n3} = I_1 \cdot \tau^3(1 - \varepsilon)^2 - I_1 \cdot \tau^3(1 - \varepsilon)^2 \cdot \varepsilon = I_1 \cdot \tau^3(1 - \varepsilon)^3. \quad (16)$$

Подстановка полученных значений в формулу (3) позволяет определить коэффициент звукопроницаемости звукозащитного материала:

$$\tau = \frac{I_{10}}{I_1} = \frac{I_1 \cdot \tau^3 \cdot (1-\varepsilon)^3}{I_1} = \tau^3 \cdot (1-\varepsilon)^3. \quad (17)$$

Звукоизоляция звукозащитного материала рассчитывается по формуле (17) [6]:

$$\text{ЗИ} = 10 \lg \left(\frac{1}{\tau} \right). \quad (18)$$

Подставляя полученные значения в формулу (18), найдем звукоизоляционные свойства акустического материала:

$$\text{ЗИ} = 10 \lg \left(\frac{1}{\tau^3 \cdot (1-\varepsilon)^3} \right) = -30 \lg \left(\frac{\ln(1+Q^2)}{Q^2} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{\left(\frac{4}{3}\alpha + \frac{2}{3}Q \right)^2}}} \right) \right), \quad (19)$$

где Q , α , ε , τ — то же, что в формулах (2), (4).

Для расчета акустической эффективности акустического экрана воспользуемся расчетной схемой, полученной Н.В. Тюриной для офисно-производственных акустических экранов. Данная схема дает наиболее точную картину звука, прошедшего за экран [8].

Расчетная схема акустического экрана представлена на рис. 3. Данная схема учитывает близкое расположение АЭ к источнику шума. В математической модели учтены акустические свойства акустического экрана расположенного в производственном помещении [8].

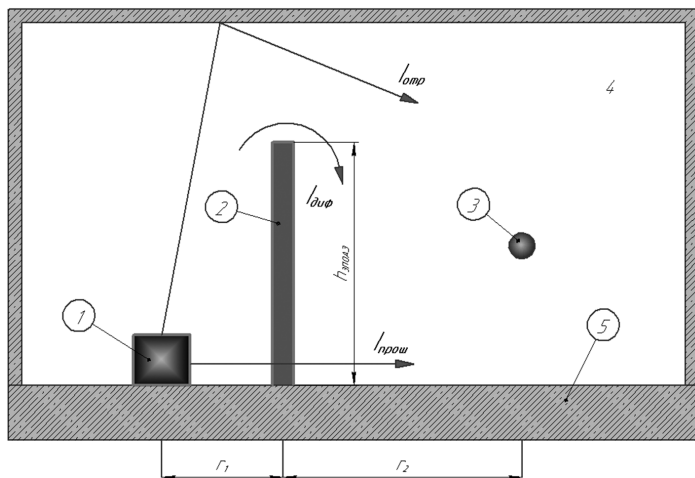


Рис. 3. Расчетная схема акустического экрана в производственном помещении: 1 — источник шума; 2 — акустический экран; 3 — рабочая точка; 4 — помещение; 5 — опорная поверхность

Эффективность АЭ рассчитаем по формуле, полученной Тюриной Н.В. [8]:

$$\Delta L_{\text{АЭ}}^{\text{пом}} = 10 \lg \left(\frac{x_{\text{ист}}}{2\pi(r_1+r_2)^2} + \frac{4}{B_{\text{пом}} + \Psi_{\text{пом}}} \right) - 10 \lg \left[\begin{aligned} & \frac{4}{B_{\text{пом}} \cdot \Psi_{\text{пом}}} + \frac{x_{\text{ист}}(1-\alpha_{\text{экp}})\tau_{\text{экp}}}{2\pi^2 r_1^2} \times \\ & \times \arctg \cdot \frac{h_{\text{экp}} \cdot b_{\text{экp}}}{2\pi^2 r_2 \sqrt{4r_2^2 + h_{\text{экp}}^2 + b_{\text{экp}}^2}} + \\ & + \frac{x_{\text{ист}}\beta_{\text{дифр}}(1-\alpha_{\text{экp}})\lambda}{2\pi^3 r_1^2 h_{\text{экp}} r_2} \cdot \arctg \times \\ & \times \frac{b_{\text{экp}}}{2h_{\text{экp}}} \cdot \arctg \frac{b_{\text{экp}}}{2h_2} \end{aligned} \right], \quad (20)$$

где $x_{\text{ист}}$ — коэффициент, учитывающий размеры ИШ; $\tau_{\text{экp}}$ — коэффициент звукопроводности АЭ; $B_{\text{пом}}$ — акустическая постоянная помещения, м²; $\Psi_{\text{пом}}$ — коэффициент, учитывающий неравномерность звукового поля в помещении; $b_{\text{экp}}$ — ширина АЭ, м; $\beta_{\text{дифр}}$ — коэффициент дифракции АЭ рассчитывается по формуле (2).

$$\beta_{\text{дифр}} = \frac{I_{\text{дифр}}}{I_{\text{пад}}}, \quad (21)$$

где $I_{\text{дифр}}$ — интенсивность звука дифрагирующего на свободном ребре; $I_{\text{пад}}^{\text{экp}}$ — интенсивность звука, падающая на поверхность АЭ.

Для расчета акустической эффективности данного экрана необходимо найти коэффициент звукопоглощения акустического материала.

Коэффициент поглощения акустического материала определяется отношением интенсивности поглощенного в конструкции звука к интенсивности падающего потока звуковой энергии, для этого воспользуемся соотношением [6]

$$\alpha = \frac{I_{\text{погл}}}{I_{\text{пад}}}, \quad (22)$$

где $I_{\text{пад}}$ — интенсивность падающего звука; $I_{\text{погл}}$ — интенсивность поглощенного звука.

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

$$\alpha = \frac{I_{n_1} + I_{n_2} + I_{n_3} + I_5 + I_8}{I_1}. \quad (23)$$

Подставляем ранее найденные значения в формулу (23):

$$\alpha = \tau^3 \cdot (3\varepsilon - 3\varepsilon^2 + \varepsilon^3 - 1) + \tau. \quad (24)$$

Исходные показатели по материалам акустического экрана приведены в табл. 2. Подставляя известные значения в полученные выражения (17), (24), (20), произ-

ведем расчеты звукоизоляции, коэффициента звукопоглощения свойств акустического материала, а также акустической эффективности экрана. Полученные результаты сведены в табл. 3.

Таблица 2

Исходные данные для расчета звукоизоляции, коэффициента звукопоглощения, звукопроводности акустического материала и акустической эффективности экрана

Материал	Показатель				
	α	δ (м)	ρ_1 (кг/м ³)	ρ (кг/м ³) при 20 °С	c (м/с) при 20 °С
Полистирол	ЗПАЭ				
	0,2	0,0005	1 250	2,821	343,1

Таблица 3

Звукоизоляция, коэффициент звукопоглощения, звукопроводность акустического материала, а так же акустическая эффективность экрана

Материал	Частота f , Гц				
	500	1000	2000	4000	Среднее значение
Полистирол	ЗИ (дБ)				
	15,394	28,757	50,305	77,822	43,0695
	$\alpha_{АЭ}$				
	0,759	0,515	0,249	0,097	0,405
	$\Delta L_{АЭ}^{ном}$ (расстояние от источника шума 100 мм; размер секции экрана 1500 × 1500)				
	0,92	9	7,88	12,1	7,475
	$\tau_{АЭ}$				
0,02889	0,001335	0,00000931	0,0000000228	0,0075586	

По полученным результатам исследования экрана можно сделать выводы:

— в диапазоне частот от 500 до 4000 Гц средняя звукоизоляция акустического материала составляет 43,0695 дБ;

— в диапазоне частот от 500 до 4000 Гц средняя акустическая эффективность экрана равна 7,475 дБ.

Данные показатели являются весьма эффективными, это объясняется тем, что в данном спектре частот наблюдается основные звуковые колебания, создаваемые производственным оборудованием.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Мансурова А.Ф. Последствия санкций США и ЕС для Российской экономики // Электронный периодический научный журнал «SCI-ARTICLE.RU». 2014. № 14. С. 228—230.
- [2] Дмитриев Н.С., Таварткиладзе Г.А. Современные проблемы физиологии и патологии слуха // I Национальный конгресс аудиологов России и 5-й Международный симпозиум. Суздаль, 2004. С. 1—16.
- [3] Синева Е.Л., Устюшин Б.В., Айдинов Г.В. Условия труда и профессиональные заболевания ЛОР органов. М., 2001.
- [4] Скворцов А.Н. Анализ исследования источников шума объектов животноводства // Электронный периодический научный журнал «SCI-ARTICLE.RU». 2014. № 5. С. 159—164.
- [5] Савельев А.П., Скворцов А.Н. Звукоподавляющий облегченный акустический экран // Охрана и экономика труда. 2015. № 2(19). С. 56—61.

- [6] *Иванов Н.И.* Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом. М., 2008.
- [7] *Мурзинов П.В.* Выбор листового материала для звукоизолирующих облегченных структурированных панелей // *Экология. Риск. Безопасность: материалы международной научной практической конференции*. Казань: Изд-во Курганского гос. ун-та., 2010. С. 149—150.
- [8] *Тюрина Н.В.* Исследование акустических экранов // XXVII сессия РАО, Санкт-Петербург, 16-18 апреля 2014 г.

MODERN DESIGN SOLUTIONS TO PROTECT PEOPLE FROM NOISE ENERGY

A.N. Skvortsov

Institute of Mechanics and Energy
Department of Life Safety
Mordovia State University N.P. Ogarev
Russian str., d. 7, RP Yalga, Republic of Mordovia, Russia, 430904

Research of influence of adverse factors of the environment of life on physical development and population health is one of actual problems of modern ecology. The article is devoted to the solution of actual problems of protection of the population from noise energies production facilities. Production facilities everywhere are equipped with noisy equipment. That long-term exposure to noise leads to an increase in slow-wave activity, as well as changes in visual and auditory cortical response, with an increase in latency and a decrease in the amplitude values of the main peaks, indicating that the stress response of animals to the stimulus. If the noise energies level from the object in a residential area exceeds the permissible levels (RC), there are sound events. The question of this article is just one of the most wide spread means of protection from noise energies acoustic screen. The authors have proposed a variant of an acoustic screen. The evaluation of soundproofing of acoustic baffle from direct affection of noise energies was made by calculations.

Key words: noise, noise energies, acoustic baffle, labor protection, acoustic pollution

REFERENCES

- [1] Mansurova A.F. Posledstvija sankcij SShA i ES dlja Rossijskoj jekonomiki. [The effects of US sanctions and the EU to the Russian economy]. // *Jelektronnyj periodicheskiy nauchnyj zhurnal «SCI-ARTICLE.RU»*. [Electronic periodical scientific journal «SCI-ARTICLE.RU»]. 2014. № 14. pp. 228—230.
- [2] Dmitriev N.S., Tavartkiladze G.A. Sovremennye problemy fiziologii i patologii sluha. [Current problems of physiology and pathology of hearing]. // *1-j Nacional'nyj kongress audiologov Rossii i 5-j Mezhdunarodnyj simpozium*. [1st National Congress of audiologists and Russia 5th International Symposium]. Suzdal, 2004. pp. 1—16.
- [3] Sineva E.L., Ustjushin B.V., Ajdinov G.V. Uslovija truda i professional'nye zabojevanija LOR organov. [Working conditions and occupational diseases ENT]. М., 2001.
- [4] Skvorcov A.N. Analiz issledovanija istochnikov shuma ob#ektov zhivotnovodstva. [Analysis study of noise sources livestock facilities]. // *Jelektronnyj periodicheskiy nauchnyj zhurnal «SCI-ARTICLE.RU»*. [Electronic periodical scientific journal «SCI-ARTICLE.RU»]. 2014. № 5. p. 159—164.

- [5] Savel'ev A.P., Skvorcov A.N. Zvukopodavljajushhij oblegchjonnyj akusticheskij jekran. [Zvukopodavlyayuschy a lightweight baffle]. // Ohrana i jekonomika truda. [Security and Labour Economics]. 2015. № 2 (19). pp. 56—61.
- [6] Ivanov N.I. Inzhenernaja akustika. Teorija i praktika bor'by s shumom. [Engineering acoustics. Theory and practice of noise control]. M., 2008.
- [7] Murzinov P.V. Vybor listovogo materiala dlja zvukoizolirujushhih oblegchennyh strukturirovannyh panelej. [Selection of sheet material for sound insulation of lightweight structured panels]. // Jekologija. Risk. Bezopasnost': materialy mezhdunarodnoj nauchnoj prakticheskoj konferencii. [Ecology. Risk. Safety: Materials of the international scientific and practical conference]. izd-vo Kurganskogo gos. un-ta., [Kurgan State. Univ.]. 2010. pp. 149—150.
- [8] Tjurina N.V. Issledovanie akusticheskikh jekranov. [Investigation of acoustic screens // XXVII sessija RAO, Sankt-Peterburg, 16-18 aprelja 2014 g [XXVII session RAO, St. Petersburg, 16-18 April]. 2014.