

Л. В. Мисун, А. В. Гаркуша, Ал-р Л. Мисун

*УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: LLM_90@mail.ru*

ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБОВ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ УРОВНЯ ШУМА В КАБИНЕ ТРАКТОРА

Аннотация. Разработана математическая модель для прогнозирования снижения уровня шума в кабине трактора в зависимости от механизма поглощения звуковой энергии в подкапотном пространстве, влияния воздушной составляющей шума на рабочем месте тракториста-машиниста, материала звукоизоляции стенок ограждения кабины трактора.

Ключевые слова: трактор, кабина, шум, снижение, моделирование, факторы, технические средства шумопоглощения.

L. V. Misun, A. V. Garkusha, Al-r L. Misun

*El "Belarusian State Agrarian Technical University"
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: LLM_90@mail.ru*

JUSTIFICATION OF METHODS AND TECHNICAL MEANS FOR REDUCING NOISE LEVEL IN THE TRACTOR CABIN

Abstract. A mathematical model has been developed to predict the reduction of noise levels in a tractor cabin depending on the mechanism of absorption of sound energy in the engine compartment, the influence of the airborne component of noise at the workplace of the tractor driver, and the soundproofing material of the walls of the tractor cabin enclosure.

Keywords: tractor, cabin, noise, reduction, modeling, factors, technical means of noise absorption.

Введение

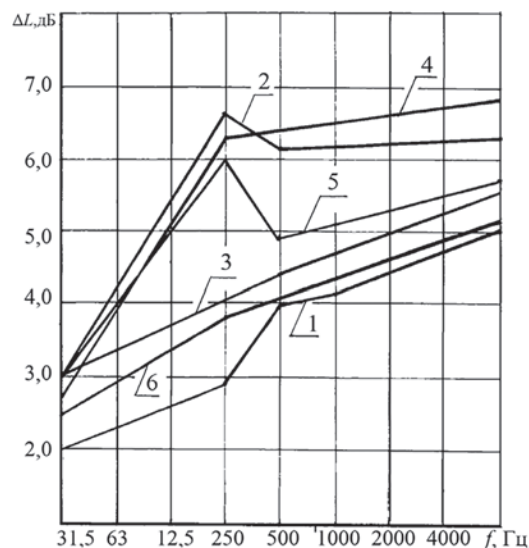
В настоящее время практически нет ни одной отрасли народного хозяйства или среды обитания человека, где шум не был бы в числе ведущих вредных факторов. Действие шума приводит к развитию преждевременного утомления, снижению работоспособности, повышению заболеваемости и инвалидности [1]. Так, если его параметры на рабочем месте тракториста-машиниста превышают 80 дБА, что во многих случаях фиксируется в кабинах тракторов с послегарантийным сроком эксплуатации, то значительное количество трактористов-машинистов имеют сенсоневральную (нейросенсорную) тугоухость [1].

Основная часть

Установленные закономерности формирования акустических характеристик на рабочем месте тракториста-машиниста позволили обосновать способы и технические решения по доведению уровня шума в кабине трактора с послегарантийным сроком эксплуатации до нормативных значений. Обоснование выбора способов и технических средств для снижения шума осуществлялось с учетом увеличения диссипативных и особенно звукоизолирующих материалов для технических устройств.

Исследования проводились на тракторе Беларус-1221.2 (срок эксплуатации – семь лет; гос. номер – ВВ-28150) при загрузке двигателя трактора на 80 % эксплуатационной мощности [2]. По результатам аттестации рабочего места тракториста-машиниста по условиям труда значение эквивалентного по энергии уровня звука непостоянного шума составило 83дБА.

Рисунок 1 – Результаты исследований способов и технических средств для снижения звукового давления в нормируемом диапазоне частот в кабине трактора: 1 – установка акустического экрана ($b_{э.м.} = 14$ мм); 2 – использование двойного остекления в ближайшей к двигателю стенке кабины трактора [3] ($b_c = 8$ мм); 3 – использование горизонтального поглотителя звуковой энергии с внешним пожарозащитным слоем из звукопрозрачной пленки в подкапотном пространстве [4] ($b_{бр.м.} = 12$ мм); 4 – установка вертикального поглотителя звуковой энергии облицованного термостойкой микроперфорированной алюминиевой фольгой в подкапотном пространстве [5] ($b_{п.м.} = 12$ мм); 5 – заполнение воздушных полостей между стенками металлической части кабины минераловатной плитой ($b_{м.п.} = 20$ мм); 6 – использование (наклеивание) на металлические части ограждения кабины полимерного материала MULTI-MAT ($b_{п.м.} = 5$ мм)



Предварительными исследованиями определены показатели снижения звукового давления в нормируемых частотах в кабине трактора при использовании различных технических решений (рисунок 1).

Большое количество факторов различной природы, способствующих снижению уровня шума в кабине трактора, делает целесообразным на первом этапе исследований выявить из них наиболее существенные. В таблице 1 приведены качественные факторы, различная комбинация которых оказывает влияние на снижение уровня шума в кабине трактора.

Таблица 1 – Факторы снижения уровня шума в кабине трактора

Факторы	Обозначения	
	–	+
X_1 – способ защиты от влияния воздушной составляющей шума на рабочем месте тракториста-машиниста	акустический экран между двигателем и кабиной трактора	двойное остекление в ближайшей к двигателю стенке кабины трактора
X_2 – механизм поглощения звуковой энергии в подкапотном пространстве	горизонтальный поглотитель звуковой энергии	вертикальный поглотитель звуковой энергии
X_3 – материал звукоизоляции стенок ограждения кабины трактора	полимерный материал MULTI-MAT	минераловатная плита

Планируем и реализуем полный факторный эксперимент типа 2^n , где n – число факторов (таблица 2).

Таблица 2 – Матрица планирования и результаты эксперимента

№ опыта	Планирование эксперимента			Результаты эксперимента, дБА			
	X_1	X_2	X_3	Y_1	Y_2	Y_3	$\bar{Y}$
1	+	+	+	7,1	7,1	6,9	7,03
2	+	+	–	6,7	6,5	6,7	6,63
3	+	–	+	6,4	6,4	6,3	6,37
4	–	+	+	5,8	6,0	6,0	5,93
5	+	–	–	5,5	5,7	5,7	5,63
6	–	+	–	4,9	4,7	4,7	4,77
7	–	–	+	4,3	4,4	4,4	4,37
8	–	–	–	3,9	4,1	4,0	4,00

Анализ предварительных исследований показал, что для описания рассматриваемого процесса целесообразно использовать уравнение регрессии следующего вида:

$$Y_1 = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_{12}X_{12} + a_{13}X_{13} + a_{23}X_{23}, \quad (1)$$

где $a_0, a_1, a_2, a_3, a_{12}, a_{13}, a_{23}$ – коэффициенты уравнения регрессии.

Однородность построчных выборочных дисперсий (S_i^2) результатов эксперимента проведена по критерию Кохрена [6]

$$\Phi_{\text{э}} < \Phi_{n-1; N; p}, \quad (2)$$

где $\Phi_{\text{э}}$ – экспериментальное значение критерия Кохрена следующее:

$$\Phi_{\text{э}} = \frac{S_{i_{\max}}^2}{\sum_{i=1}^N S_i^2} = \frac{0,0038}{0,0238} = 0,1597;$$

$\Phi_{n-1; N; p}$ – критическое значение критерия Кохрена при числе степеней свободы $f_{\text{числ}} = n - 1$, $f_{\text{знам}} = N - 1$ и доверительной вероятности $p = 0,95$ [6]:

$$\begin{aligned} \Phi_{n-1; N; p} &= \Phi_{2; 8; 0,95} = 0,5157; \\ \Phi_{\text{э}} &= 0,1597 < \Phi_{2; 8; 0,95} = 0,5157, \end{aligned}$$

т. е. выдвинутая гипотеза не противоречит экспериментальным данным.

Коэффициенты уравнения регрессии (1) рассчитаны по формулам

$$a_0 = \frac{\sum_{i=1}^N \bar{Y}_i}{N}; \quad (3)$$

$$a_i = \frac{\sum_{i=1}^N x_i \bar{Y}_i}{N}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, N; \quad (4)$$

$$a_{ir} = \frac{\sum_{i=1}^N x_{ir} x_i \bar{Y}_i}{N}, \quad i, r = 1, 2, 3, \dots, N \quad (5)$$

и равны: $a_0 = 5,591$; $a_1 = 0,824$; $a_2 = 0,499$; $a_3 = 0,334$; $a_{12} = -0,084$; $a_{13} = -0,049$; $a_{23} = 0,056$.

Доверительный интервал для коэффициентов уравнения регрессии рассчитывался по формуле

$$\Delta a = t_{N(n-1); p} \sqrt{\frac{S_{\text{воспр}}^2}{nN}}, \quad (6)$$

где $t_{N(n-1); p}$ – табличное значение критерия Стьюдента при числе степеней свободы $f = N(n-1) = 16$ и доверительной вероятности $p = 0,95$

$$t_{\text{табл}} = t_{N(n-1); p} = t_{16; 0,95} = 1,7460 \quad [7].$$

$$S_{\text{воспр}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N S_i^2}{N} = \frac{0,0238}{8} = 0,0030,$$

где $S_{\text{воспр}}^2$ – дисперсия воспроизводимости.

Тогда

$$\Delta a = 1,7460 \sqrt{\frac{0,0030}{3 \cdot 8}} = 0,0195.$$

Коэффициенты уравнения регрессии значимы, если выполняются следующие условия:

$$\Delta a < |a_i|, (i = 0; 1; 2; 3); \quad (7)$$

$$\Delta a < |a_{is}|, (i, s = 0; 1; 2; 3, i < s). \quad (8)$$

В нашем случае условия (6) и (7) выполняются, поэтому уравнение регрессии (1) следующее:

$$Y_1 = 5,591 + 0,824X_1 + 0,499X_2 + 0,334X_3 - 0,084X_1 X_2 - 0,049X_1 X_3 + 0,056X_2 X_3. \quad (9)$$

Полученное уравнение регрессии адекватно, если $F_p < F_q$, где $F_p = \frac{S_{\text{воспр.}}^2}{S_{\text{ад}}^2}$ – расчетное значение F -критерия Фишера; $S_{\text{ад}}^2$ – дисперсия адекватности, характеризующая отклонение экспериментальных данных от полученных по уравнению регрессии:

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{n \cdot \varphi}{N - B}, \quad (10)$$

где φ – остаточная сумма квадратов.

$$\varphi = \sum_{i=1}^N (\bar{Y}_i - Y_{ip})^2 = 0,013,$$

где B – число значимых коэффициентов уравнения регрессии.

Тогда, $S_{\text{ад}}^2 = \frac{3 \cdot 0,008}{8 - 7} = 0,024$, $F_p = \frac{0,003}{0,024} = 0,125$; F_q – табличное значение критерия Фишера ($F_q = F_{N(n-1); N-B; p} = F_{16; 1; 0,95} = 4,49$ [7], т. е. $F_p = 0,125 < F_q = 4,49$).

Анализ выражения (9) позволил сделать следующие выводы:

- максимальный показатель снижения уровня шума в кабине трактора достигается при $X_1 = +1$ (двойное остекление), $X_2 = +1$ (вертикальный поглотитель звуковой энергии), $X_3 = +1$ (минераловатная плита) и составляет 7,2 дБА;

- наихудший результат (3,9 дБА) ожидается, когда для защиты от влияния воздушной составляющей шума на рабочем месте тракториста-машиниста используется акустический экран между двигателем и кабиной трактора ($X_1 = -1$), механизм поглощения звуковой энергии в подкапотном пространстве – горизонтальный поглотитель звуковой энергии ($X_2 = -1$), материал звукоизоляции стенок ограждения кабины трактора – полимерный материал MULTI-MAT ($X_3 = -1$);

- фактор «способ защиты от влияния воздушной составляющей шума на рабочем месте тракториста-машиниста» (X_1) оказывает более существенное влияние на снижение шума в кабине, нежели другие рассматриваемые факторы, при этом:

$$X_1 = 0,824 > X_2 = 0,499 > X_3 = 0,334;$$

- результат численного эксперимента, когда переменные X_2 и X_3 зафиксированы на определенных значениях ($X_2 = +1$; $X_3 = +1$), показывает, что в сравнении с акустическим экраном, устанавливаемым между двигателем и кабиной трактора, использование двойного остекления в ближней к двигателю стенке кабины сопровождается повышением шумопоглощения на 23,9 %.

На втором этапе регрессионного анализа шумопоглощения на рабочем месте тракториста-машиниста ставилась задача исследовать процесс с учетом изменяющихся параметров сменных шумопоглощающих технических средств, устанавливаемых на тракторе для обеспечения ПДУ. Поисковыми исследованиями выявлены наиболее существенные факторы (толщина стекол в ближней к двигателю стенке кабины трактора ($b_{\text{с}}$), вертикального поглотителя звуковой энергии в подкапотном пространстве ($b_{\text{п.м}}$), минераловатной плиты для звукоизоляции стенок ограждения кабины трактора ($b_{\text{м.п}}$)).

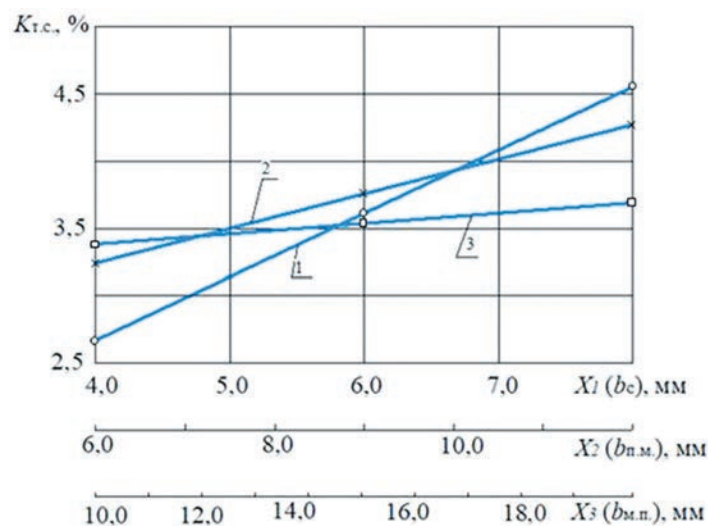


Рисунок 2 – Показатель снижения уровня шума на рабочем месте тракториста-машиниста в зависимости от толщины: 1 – стекло в ближайшей к двигателю стенке кабины трактора (b_c); 2 – вертикального поглотителя звуковой энергии в подкапотном пространстве ($b_{п.м.}$); 3 – минераловатной плиты для звукоизоляции стенок ограждения кабины ($b_{м.п.}$)

дения кабины трактора ($b_{м.п.}$) (рисунок 2), влияющие на показатель уровня шума (Y_2) на рабочем месте тракториста-машиниста относительно допустимого его значения (ПДУ) с учетом устанавливаемых сменных технических средств шумопоглощения:

$$Y_2 = \frac{\frac{Y_{ш}}{Y_{пду}} - \frac{Y_{ш} - K_{т.с.}}{Y_{пду}}}{\frac{Y_{ш}}{Y_{пду}}} 100 = \frac{K_{т.с.}}{Y_{ш}} 100, \% \quad (11)$$

где $Y_{ш}$ – среднее значение эквивалентного по энергии уровня звука постоянного шума по результатам аттестации рабочих мест трактористов-машинистов, дБА. Согласно результатам аттестации по уровню шума на рабочих местах трактористов-машинистов (20 тракторов «Беларус-1221» 2004–2019 гг. выпуска) максимальное значение уровня шума составило 85 дБА; $Y_{т.с.}$ – показатель снижения уровня шума на рабочем месте тракториста-машиниста в зависимости от изменяющихся параметров сменных шумопоглощающих технических средств, дБА (рисунок 2); $Y_{пду}$ – предельно-допустимый уровень шума на рабочем месте тракториста-машиниста ($Y_{пду} = 80$ дБА).

Наименование факторов, уровни и интервалы их варьирования представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Уровни и интервалы варьирования факторов

Обозначение факторов	X_1	X_2	X_3
Варьируемый фактор	b_c	$b_{п.м.}$	$b_{м.п.}$
Единицы измерения	мм	мм	мм
Основной уровень ($X_i = 0$)	6,0	9,0	15,0
Интервал варьирования	2,0	3,0	5,0
Верхний уровень ($X_i = +1$)	8,0	12,0	20,0
Нижний уровень ($X_i = -1$)	4,0	6,0	10,0
Формулы перевода натуральных значений факторов в нормированные и обратно	$X_1 = \frac{x_1 - 6,0}{2,0},$ $x_1 = 2X_1 + 6,0$	$X_2 = \frac{x_2 - 9,0}{3,0},$ $x_2 = 3X_2 + 9,0$	$X_3 = \frac{x_3 - 15,0}{5,0},$ $x_3 = 5X_3 + 15,0$

Планируем и реализуем полный факторный эксперимент 2^3 (таблица 4).

Таблица 4 – Матрица планирования и результаты эксперимента

№ опыта	Планирование эксперимента			Опытные данные, %			Результаты эксперимента			
	X_1	X_2	X_3	Y_1	Y_2	Y_3	$\bar{Y}_j, \%$	S_j^2	Y_j^p	$(\bar{Y}_j - Y_j^p)^2$
1	+	+	+	9,08	9,12	9,11	9,10	0,0001	9,25	0,0255
2	+	+	–	8,26	8,31	8,30	8,29	0,0005	8,32	0,0009
3	+	–	+	7,98	7,93	7,97	7,96	0,0005	7,81	0,0225
4	–	+	+	7,40	7,42	7,37	7,40	0,0002	7,25	0,0225
5	+	–	–	6,88	6,94	6,90	6,91	0,0003	7,06	0,0225
6	–	+	–	5,97	5,92	5,92	5,94	0,0006	6,09	0,0225
7	–	–	+	5,33	5,29	5,27	5,30	0,0006	5,45	0,0225
8	–	–	–	4,80	4,74	4,79	4,78	0,0007	4,63	0,0255
							$\sum_{j=1}^N \bar{Y}_j = 55,68$	$\sum_{j=1}^N S_j^2 = 0,0035$	$\varphi = \sum_{j=1}^N (\bar{Y}_j - Y_j^p)^2 = 0,1794$	

Обработка данных эксперимента проведена согласно формулам (2–8), (10). Проведя соответствующие вычисления и проверки, получили следующее выражение:

$$Y_2 = 6,960 + 1,105X_1 + 0,722X_2 + 0,480X_3 - 0,093X_1 X_2 - 0,015X_1 X_3 + 0,088X_2 X_3. \quad (12)$$

Анализ выражения (12) показывает: наилучший результат – максимальное значение снижения шума на рабочем месте тракториста-машиниста относительно ПДУ ($Y_{2\max}$) – достигается при $X_1 = +1$, $X_2 = +1$, $X_3 = +1$ и равно 9,25 % ПДУ.

Для получения функции отклика в зависимости от натуральных значений факторов декодируем выражение (12), используя данные таблицы 3:

$$Y_2 = -0,141 + 0,714b_c + 0,246b_{п.м} + 0,052b_{м.п} - 0,015b_c b_{п.м} - 0,002b_c b_{м.п} + 0,006b_{п.м} b_{м.п} \quad (13)$$

Разработанная математическая модель (выражение (13)), позволяет определить рациональные параметры сменных технических средств шумопоглощения, устанавливаемых на тракторе ($x_1 = b_c = 8$ мм; $x_2 = b_{п.м} = 12$ мм; $x_3 = b_{м.п} = 20$ мм), обеспечивающих максимальное снижение уровня шума (7,4 дБА), а также выбрать требуемые параметры технических средств шумопоглощения для устранения превышения ПДУ с учетом фактического значения эквивалентного по энергии уровня звука непостоянного шума.

Заключение

В результате проведенных исследований разработана математическая модель шумопоглощения на рабочем месте тракториста-машиниста с учетом материала звукоизоляции стенок ограждения кабины, механизма поглощения звуковой энергии в подкапотном пространстве, воздушной составляющей шума в кабине трактора. Рассмотрены варианты использования различных сменных шумопоглощающих технических средств, исследована их целесообразность и эффективность.

Список использованных источников

1. Физиологические и медико-биологические основы безопасности жизнедеятельности : пособие / Ал-й Л. Мисун, Л. В. Мисун, Ал-р Л. Мисун [и др.]. – Мн. : Бел. гос. агр. техн. ун-т, 2024. – 321 с.
2. Методы измерения шума на рабочих местах : ГОСТ 12.1.050-86. – Взамен ГОСТ 20445-75 ; введ. 01.01.1987. – М. : Стандартинформ, 2007. – 19 с.
3. Мисун, Ал-р Л. Технические решения и основные показатели звукоизоляции двухслойной конструкции из стекла кабины мобильной сельскохозяйственной техники / Ал-р Л. Мисун, И. Н. Мисун, А. Г. Кузнецов // Иннова-

ционные решения в технологиях и механизации сельскохозяйственного производства : сб. науч. тр. – Горки, БГСХА, 2021. – Вып. 6. – С. 29–32.

4. Мисун, Л. В. Техносферная безопасность : пособие / Л. В. Мисун, Ал-й Л. Мисун, Ал-р Л. Мисун. – Мн. : БГАТУ, 2023. – 212 с.

5. Полезная модель ВУ13753, МПК В 60R 13/08, G 10K 11/168, F 0277/13 (2006.01). Поглотитель звуковой энергии для моторного отсека транспортного средства сельскохозяйственного назначения: № u20240284 : заявлено: 27.12.2024 : опубл. 16.06.2025 / Мисун А. Л., Агейчик О. Г., Гаркуша А. В. [и др.] ; заявители : Мисун Ал-р Л., Агейчик О. Г., Гаркуша А. В. [и др.]. – 5 с.

6. Леонов, А. Н. Основы научных исследований и моделирования : учеб.-метод. комплекс / А. Н. Леонов, М. М. Дечко, В. Б. Ловкис. – Мн. : БГАТУ, 2010. – 276 с.

7. Джонсон, Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы обработки данных : в 2 т. / Н. Джонсон, Ф. Лион. – М. : Мир, 1980. – 610 с.