

УДК: 534.6.08
ОЕСД: 1.03. АА

Расчет акустической эффективности кабин, устанавливаемых в помещениях

Воронова А.А.^{1*}, Иванов Н.И.², Тюрина Н.В.³

¹ Магистрант ^{2,3} Д.т.н., профессор

^{1,2,3} Кафедра «Экология и производственная безопасность», Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург, РФ

Аннотация

Звукоизолирующая кабина может располагаться как в помещении, так и являться неотъемлемой частью транспортных машин. Звукоизолирующие кабины операторов, машинистов и водителей предназначены для управления и наблюдения за производственным процессом и при этом обеспечивают защиту работников от повышенного шума. В статье приведен новый метод расчета акустической эффективности кабин, устанавливаемых в производственных помещениях. Акустическая эффективность кабины определяется как разность уровней звукового давления (УЗД) и уровней звука (УЗ) при работающих источниках шума на рабочем месте в отсутствие кабины и при её установке. В предложенном методе расчета учтены приведенная звукоизоляция панелей кабины, среднее звукопоглощение в кабине, эквивалентная площадь звукопоглощения, площадь элементов кабины, а также степень отклонения звукового поля в помещении от диффузного. Представлены данные о фактической звукоизоляции панелей кабины, позволяющие выполнить расчет эффективности кабины по предложенной формуле.

Ключевые слова: шум, уровень звукового давления, стационарная шумозащитная кабина, акустическая эффективность, звукопоглощение, расчет снижения шума.

Calculation of the acoustic efficiency of cabins installed indoors

Voronova A.A.^{1*}, Ivanov N.I.², Tyurina N.V.³

¹ Graduate Student ^{2,3} DSc, Professor

^{1,2,3} Department of Ecology and Industrial Safety, Baltic State Technical University 'VOENMEH', St. Petersburg, Russia

Abstract

Sound-proofed cabin can be a part of a vehicles both may be located indoors proving noise control in industrial premises. Sound-proofed cabins at workplace of operators and drivers are designed to control and monitor the production processes and at the same time protect workers from increased noise levels. A new method for calculating the acoustical efficiency (insertion loss) of cabins installed indoors is presented in the article. The acoustical efficiency of cabins is defined as the difference between sound pressure levels (SPL) and sound levels (SL) with operating noise sources at the workplace in the absence of a cabin and when the cabin is installed. The proposed calculation method takes into account the sound insulation of the cabin panels, the average sound absorption of the cabin, the equivalent sound absorption, the area of the cabin elements, as well as the degree of deviation of the sound field in the room from the diffuse one. The cabin panels sound reduction

*E-mail: vaat27@mail.ru (Воронова А.А.)

obtained experimentally is presented, which make it possible to calculate the efficiency of the cabin according to the proposed formula.

Keywords: noise, sound pressure level, sound-proofed cabins, insertion loss, sound insulation, efficiency, sound absorption, calculation method.

Введение

Стационарные кабины, устанавливаемые для защиты от повышенного шума внешних источников, являются сложной шумозащитной конструкцией, в которой звуковая энергия преобразуется в результате отражения и поглощения звука, возникновения резонансных явлений, звукоизлучения и др [1, 2]. Кабина выполняет функции акустического фильтра.

Звуковое поле в производственных помещениях диффузное, поэтому в новом методе расчета принимается допущение о том, что звуковая энергия на ограждениях кабины распределена равномерно и вклад составляющих звука, проникающего в кабину, зависит от звукоизолирующих и звукопоглощающих свойств ограждающих конструкций (стен, потолка, окон и др.). Для достижения требуемого эффекта снижения шума необходимо стремиться к тому, чтобы звукоизоляция всех элементов ограждения кабины была примерно одинаковой. Кроме составляющей шума, проникающего через различные ограждения воздушным путём, внутри кабины также происходит отражение звука от внутренних элементов кабины. Таким образом, суммарное звуковое поле образуется двумя составляющими: проникающим звуком (который зависит от звукоизолирующих свойств кабины) и отраженным (который зависит от звукопоглощения в кабине) [3, 4].

1. Вывод формулы для расчета акустической эффективности кабины

Упрощенная расчетная схема звукоизолирующей кабины в производственном помещении показана на рис. 1.

Расчетная формула выведена с использованием следующих допущений:

- звуковое поле в производственном помещении, где устанавливается звукоизолирующая кабина (ЗИК), диффузное;
- звук равномерно распределяется на всех внешних ограждениях кабины;
- звуковое поле в кабине квазидиффузное.

Для вывода формулы расчета эффективности снижения шума звукоизолирующей кабиной воспользуемся методом последовательного преобразования звуковых полей [5, 6].

Акустическая эффективность звукоизолирующей кабины в помещении рассчитывается по следующей формуле:

$$\Delta L_{\text{каб}}^{\text{пом}} = 10 \lg \frac{I_{\text{РТ}}^{\delta/\kappa}}{I_{\text{РТ}}^{c/\kappa}}, \text{ дБ}, \quad (1)$$

где: $I_{\text{РТ}}^{\delta/\kappa}$ – интенсивность звука в расчетной точке (РТ) без кабины, Вт/м²;

$I_{\text{РТ}}^{c/\kappa}$ – интенсивность звука в РТ при установленной кабине, Вт/м².

Найдем числитель в (1), предполагая, что звук попадает в РТ двумя путями: прямым от ИШ и отраженным от ограждающих поверхностей помещения.

Интенсивность звука в расчетной точке при отсутствии кабины рассчитывается следующим образом:

$$I_{\text{РТ}}^{\delta/\kappa} = W_{\text{ист}} \left[\frac{\chi_{\text{ист}}}{2\pi r^2} + \frac{4}{\Psi_{\text{пом}} B_{\text{пом}}} \right], \quad (2)$$

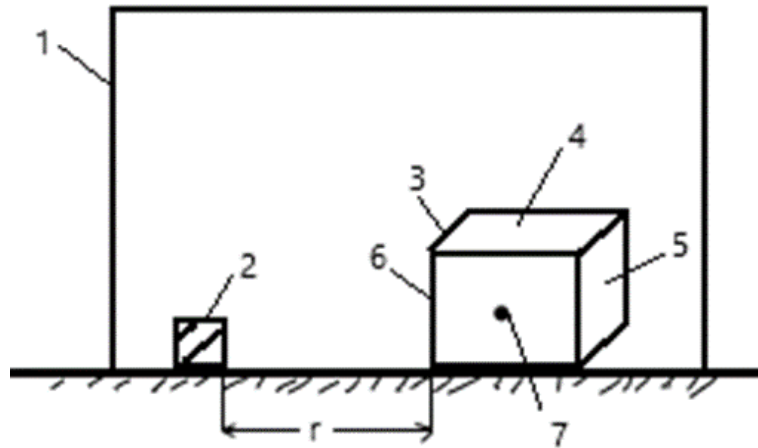


Рис. 1. Расчетная схема ЗИК: 1 – производственное помещение; 2 – источник шума (ИШ); 3 – звукоизолирующая кабина; 4-6 – ограждения кабины с различной звукоизоляцией; 7 – расчетная точка (рабочее место)

где: $W_{\text{ист}}$ – акустическая мощность источника шума (ИШ), Вт;

$\chi_{\text{ист}}$ – коэффициент, определяемый в зависимости от отношения максимального размера ИШ к расстоянию до РТ;

$\Psi_{\text{пом}}$ – коэффициент, показывающий степень отклонения звукового поля в помещении от диффузного;

$V_{\text{пом}}$ – акустическая постоянная помещения, м^2 .

Найдем значение знаменателя в формуле (1) путем нескольких преобразований. Интенсивность падающего на установленную кабину звука $I_{\text{пад}}$ можно принять равной интенсивности звука в расчетной точке при отсутствии кабины, рассчитываемой по формуле (2).

Звуковая мощность, излучаемая элементами установленной кабины, определяется следующим образом:

$$W_{\text{каб}} = I_{\text{пад}} \bar{\tau}_{\text{каб}} S_{\text{каб}}, \quad (3)$$

где: $\bar{\tau}_{\text{каб}}$ – приведенная звукопроводность кабины;

$S_{\text{каб}}$ – суммарная площадь ограждений кабины, через которые звук проникает в кабину, м^2 .

Интенсивность звука в РТ при установленной кабине:

$$I_{\text{РТ}}^{\text{с/к}} = \frac{4W_{\text{каб}}(1 - \bar{\alpha}_{\text{каб}})}{\Psi_{\text{каб}} A_{\text{каб}}}, \quad \text{Вт/м}^2, \quad (4)$$

где: $\bar{\alpha}_{\text{каб}}$ – среднее значение коэффициента звукопоглощения в кабине;

$\Psi_{\text{каб}}$ – коэффициент, показывающий степень отклонения звукового поля в кабине от диффузного;

$A_{\text{каб}}$ – эквивалентная площадь звукопоглощения в кабине, м^2 .

Подставив (3) в (4), получим:

$$I_{\text{РТ}}^{\text{с/к}} = \frac{W_{\text{ист}} \left[\frac{\chi_{\text{ист}}}{2\pi r^2} + \frac{4}{\Psi_{\text{пом}} V_{\text{пом}}} \right] \bar{\tau}_{\text{каб}} S_{\text{каб}} 4(1 - \bar{\alpha}_{\text{каб}})}{\Psi_{\text{каб}} A_{\text{каб}}}, \quad (5)$$

Подставим (2) и (5) в (1):

$$\Delta L_{\text{каб}} = 10lg \frac{W_{\text{ист}} \left[\frac{\chi_{\text{ист}}}{2\pi r^2} + \frac{4}{\Psi_{\text{пом}} B_{\text{пом}}} \right] \Psi_{\text{каб}} A_{\text{каб}}}{W_{\text{ист}} \left[\frac{\chi_{\text{ист}}}{2\pi r^2} + \frac{4}{\Psi_{\text{пом}} B_{\text{пом}}} \right] \bar{\tau}_{\text{каб}} S_{\text{каб}} 4(1 - \bar{\alpha}_{\text{каб}})}, \quad (6)$$

После преобразований и логарифмирования определим эффективность звукоизолирующей кабины:

$$\Delta L_{\text{каб}} = 10lg \frac{A_{\text{каб}}}{S_{\text{каб}}} + 10lg \Psi_{\text{каб}} + 10lg \frac{1}{\bar{\tau}_{\text{каб}}} - 10lg(1 - \bar{\alpha}_{\text{каб}}) - 10lg 4, \text{ дБ}, \quad (7)$$

Учитывая известное соотношение $\text{ЗИ} = 10lg \frac{1}{\bar{\tau}_{\text{каб}}}$, третий член формулы может быть заменен приведенной звукоизоляцией кабины $\bar{\text{ЗИ}}_{\text{каб}}$, равной:

$$\bar{\text{ЗИ}}_{\text{каб}} = 10lg \frac{\sum_{i=0}^n S_{\text{каб}_i}}{\sum_{i=0}^n S_{\text{каб}_i} 10^{-0,1 \text{ЗИ}_{\text{каб}_i}}}, \text{ дБ}, \quad (8)$$

где: $S_{\text{каб}_i}$ – площадь i -го ограждения кабины, м^2 ;

n – число ограждений кабины;

$\text{ЗИ}_{\text{каб}_i}$ – звукоизоляция i -го элемента кабины, дБ.

С учетом $10lg 4 = 6$ дБ, а также (8) формула акустической эффективности кабины, установленной в помещении:

$$\Delta L_{\text{каб}} = 10lg \frac{A_{\text{каб}}}{S_{\text{каб}}} + 10lg \Psi_{\text{каб}} + 10lg \frac{\sum_{i=0}^n S_{\text{каб}_i}}{\sum_{i=0}^n S_{\text{каб}_i} 10^{-0,1 \text{ЗИ}_{\text{каб}_i}}} - 10lg(1 - \bar{\alpha}_{\text{каб}}) - 6, \text{ дБ} \quad (9)$$

2. Применение метода расчета эффективности кабин, устанавливаемых в производственных помещениях

Для анализа достоверности разработанного метода расчета эффективности звукоизолирующей кабины проведены экспериментальные исследования, в результате которых получены данные, сведенные в таблицу 1. В составе натуральных измерений определены звукоизоляция отдельных элементов кабины, а также время реверберации [7, 8]. На основании измеренного времени реверберации определен коэффициент звукопоглощения в помещении (в кабине) $\alpha_{\text{пом}}$ по следующей формуле:

$$\alpha_{\text{пом}}^f = \frac{0,16V}{S_{\text{пом}} T_{\text{пом}}^f}, \quad (10)$$

где: V – объем помещения, м^3 ; $S_{\text{пом}}$ – площадь ограждающих поверхностей, м^2 .

Результаты расчета эффективности кабины ($\Delta L_{\text{каб}}$) приведены в таблице 1. Сравнение расчетной эффективности кабины с результатами замеров показало высокую сходимость.

Таблица 1

Расчет акустической эффективности стационарной кабины

Исходные данные для расчета	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц					
	125	250	500	1000	2000	4000
$A_{\text{каб}} = \sum \alpha_i^f S_i$	4,7	2,4	7,1	9,1	8,7	5,7
$S_{\text{каб}}$	43,4	43,4	43,4	43,4	43,4	43,4
$B_{\text{каб}}$	5,9	2,9	9,2	12,3	12,2	7,7
$\Psi_{\text{каб}}$	0,2	0,06	0,2	0,3	0,3	0,2
Время реверберации, Т, с	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,3
$\bar{\alpha}_{\text{каб}}$	0,2	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3
$10 \lg \frac{A_{\text{каб}}}{S_{\text{каб}}}$	-9,6	-12,5	-7,8	-6,8	-6,9	-8,8
$10 \lg \Psi_{\text{каб}}$	-8,6	-11,6	-6,7	-5,4	-7,5	-7,4
$10 \lg(1 - \bar{\alpha}_{\text{каб}})$	-0,4	-0,2	-0,7	-1,1	-0,9	-0,6
$10 \lg \frac{\sum_{i=0}^n S_{\text{каб}i}}{\sum_{i=0}^n S_{\text{каб}i} 10^{-0,1 \text{ЗИ}_{\text{каб}i}}}$	16,1	26,8	35,1	39,3	50,1	49,6
$\Delta L_{\text{каб}}$ (ф-ла 10)	7	4	15	22	32	27

Заключение

1. Предложен новый метод расчета акустической эффективности звукоизолирующей кабины, в котором учтены приведенная звукоизоляция панелей кабины, среднее звукопоглощение в кабине, эквивалентная площадь звукопоглощения, площадь элементов кабины, а также степень отклонения звукового поля в помещении от диффузного.

2. Выполнены натурные замеры звукоизоляции и эффективности опытной кабины, в которой были получены необходимые данные для расчета и апробации формулы.

3. Результаты расчетов акустической эффективности кабины по разработанной формуле показали высокую сходимость с результатами экспериментов.

Список литературы

1. Иванов Н.И., Шашурин А.Е. Учебное пособие «Защита от шума и вибрации», издание второе - дополненное и переработанное / – СПб.: Печатный Цех, 2019. - 284с.
2. Борьба с шумом на производстве: Справочник / Под общ. ред. Е.Я. Юдина. М.: Машиностроение, 1985.
3. Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом: Учебник / Н.И. Иванов. – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Логос, 2013. – 432 с.
4. Акустика: Учебник для вузов / Ш.Я. Вахитов, Ю.А.Ковалгин, А.А. Фадеев. Ю.П. Щевьев / Под ред. Ю.А.Ковалгина. М.: Горячая линия–Телеком, 2009.
5. Шашурин А.Е., Иванов Н.И., Тюрина Н.В., Курченко П.С. Использование метода преобразования звуковых полей для расчета эффективности шумозащитных конструкций // Noise Theory and Practice, 2020, №6 (4) – С. 128-134.
6. Ivanov N., Kurtsev G., Shashurin A. The method of sequential transformation of the sound fields Akustika. 2021. Т. 39. С. 143-149.
7. Боголепов И.И. Промышленная звукоизоляция: Л.: Судостроение, 1986.

8. Звукоизоляция и звукопоглощение: Учебн. пособие / Под ред. Г.Л. Осипова, В.Н. Бобылева. М.: АСТ, 2004.

References

1. Ivanov N.I., Shashurin A.E. Textbook 'Protection from noise and vibration', second edition - expanded and revised / – St. Petersburg: Printing Shop. – 2019. – 284 p.
2. Noise control in industry: Handbook/ Ed. Yudin E.Ya.. М.: Mechanical Engineering, 1985.
3. Engineering acoustics. Theory and practice of noise control: Textbook / N.I. Ivanov. – 3rd ed.– М.: Logos, 2013. – 432 p.
4. Acoustics: Textbook for universities / Sh.Ya. Vakhitov, Yu.A. Kovalgin, A.A. Fadeev, Yu.P. Shchevyev / Ed. Yu.A. Kovalgina. М.: Hotline-Telecom, 2009.
5. Shashurin A.E., Ivanov N.I., Tyurina N.V., Kurchenko P.S. Using the method of transforming sound fields to calculate the effectiveness of noise protection structures // Noise Theory and Practice, 2020, No. 6 (4) – p p. 128-134.
6. Ivanov N., Kurtsev G., Shashurin A. The method of sequential transformation of the sound fields Akustika. 2021. T. 39. C. 143-149.
7. Bogolepov I.I. Industrial sound insulation: Leningrad: Sudostroenie, 1986.
8. Sound insulation and sound absorption: Textbook / Ed. G.L. Osipov, V.N. Bobylev. М.: AST, 2004.