

УДК: 629.423.004.69+06

OECD: 1.03

К расчету прохождения звука через систему помещений специального железнодорожного транспорта

Васильева В.К.^{1*}, Шашурин А.Е.², Крутова В.А.³, Фролова Д.С.⁴

¹Старший преподаватель кафедры «Экология и производственная безопасность»,

²Д.т.н., профессор, и.о. ректора,

³Д.т.н., доцент, профессор кафедры «Механика деформируемого твердого тела»,

⁴Соискатель кафедры «Экология и производственная безопасность»

^{1,2,3,4}Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»

им. Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург, РФ

Аннотация

В статье рассматриваются различные виды подвижного состава, предназначенные для выполнения погрузочно-разгрузочных работ, перевозки грузов при ремонте железнодорожного пути, восстановлении железнодорожного пути после аварий. Все рассмотренные поезда объединяет наличие двигателей внутреннего сгорания, которые оказывают негативное воздействие на рабочий персонал. При прохождении звука через систему однотипных помещений от источника шума (ИШ) к расчетной точке (РТ) звук претерпевает сложные изменения. Для расчетов звука использовался метод последовательного преобразования звуковых полей. Основное допущение рассмотренного прохождения звука – звуковые поля в каждом из рассматриваемых помещений имеют квазидиффузный характер. В предложенном методе расчета воздушного шума учитываются: акустическая мощность ИШ, звукоизолирующие свойства внутренних ограждающих конструкций, звукопоглощающие свойства рассматриваемых помещений, степень приближения звукового поля в каждом из них к диффузному, а также геометрические параметры помещений и ограждений. Приведены примеры расчетов и сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными.

Ключевые слова: источник шума, акустическая мощность, уровни звукового давления, рабочее место, помещение железнодорожного транспорта, звукоизоляция, звукопоглощение.

To calculate sound propagation through the system of special railway transport premises

Vasilyeva V.K.^{1*}, Shashurin A.E.², Krutova V.A.³, Frolova D.S.⁴

¹Senior lecturer of the Department of Ecology and Industrial Safety,

²DSc, Professor, Acting rector, ³DSc, Associate Professor, Professor of the
Department of Mechanics of Deformable Solids,

⁴Applicant for the Department of Ecology and Industrial Safety

^{1,2,3,4}Baltic State Technical University 'VOENMEH', St. Petersburg, Russia

Abstract

The article examines various types of rolling stock intended for loading and unloading operations, transportation of goods during repair of railway tracks, restoration of railway tracks after accidents. They are united by the presence of internal combustion engines, which have a negative impact on the working personnel.

When sound passes through a system of similar rooms from the noise source (IS) to the calculation point (CP), the sound undergoes complex changes. For sound calculations, the method of successive transformation of sound fields was used. The main assumption of the considered sound passage is that the sound fields in each of the considered rooms have a quasi-diffuse nature. The proposed method for calculating airborne noise takes into account: acoustic power IS, soundproofing properties of internal enclosing structures, sound-absorbing properties of the considered rooms, the degree of approximation of the sound field in each of them to the diffuse one, as well as the geometric parameters of the rooms and enclosures. Examples of calculations and comparing of theoretical estimation results with experimental ones are given.

Keywords: noise source, acoustic power, sound pressure levels, workplace, railway transport premises, sound insulation, sound absorption.

Введение

Актуальность проблемы снижения такого физического фактора, как шум, широко известна и не требует дополнительных доказательств. При этом следует отметить, что шум на конкретном рабочем месте зависит от специфики источников шума и особенностей производственной среды, влияющих на процесс шумообразования.

В данном исследовании рассматривается определенный вид подвижного состава железнодорожного транспорта, обеспечивающий выполнение различных вспомогательных функций (ремонт пути, ликвидация аварий и пр.), который называется специальным железнодорожным транспортом (СЖТ) и включает в себя вагоны-электростанции, автодрезины, автомотрисы и другие виды подвижного состава.

Для анализа уровней шума на рабочих местах СЖТ рассмотрены основные источники шума, пути распространения шума, а также особенности затухания шума, которые учтены в математической модели, разработанной для оценки ожидаемого шума на рабочих местах СЖТ.

Важной особенностью шумообразования СЖТ является наличие силовой установки, основным источником шума которой является двигатель внутреннего сгорания (ДВС), расположенной так, что звук от ИШ до РТ проходит через систему служебных и вспомогательных помещений.

1. Анализ измерений шума на рабочих местах подвижного состава СЖТ

В составе вагонов-электростанций (ремонтные поезда), автомотрис и автодрезин (специальный железнодорожный транспорт) имеются источники интенсивного воздушного шума - силовые установки, шум которых проходит к рабочим местам через систему вспомогательных помещений. Прогнозирование шума позволяет обеспечить разработку шумозащиты в процессе проектирования, а также провести разделение вклада источников различного происхождения (шум ДВС, шум качения и др.) в расчетных точках [1-6].

Отметим пять основных составляющих звукового поля на рабочем месте (РМ):

- доля шума от силовой установки, проникающая на рабочее место через внутренние ограждающей конструкции воздушном путём;
- доля внешнего шума, возникающего при движении (шум качения), проникающего на рабочее место воздушным путём через внешние ограждающие конструкции (пол, потолок, остекление и пр.);
- доля шума, возникающая в результате воздействия вибрации, при движении подвижного состава, на ограждающие конструкции называемого структурным звуком;

- доля звука, возникающая при отражении в рабочем помещении (помещении, где расположено рабочее место);
- доля структурного звука, который своим прохождением обязан работе силовой установки; вибрация, генерируемая последним, передается на элементы ограждения рабочего места и изучаются в пространстве в виде структурного звука (или звуковой вибрации) – аналогично процессу, связанному с взаимодействием системы «колесо – рельс».

На рисунке 1 приведен спектр шума на рабочем месте машиниста вагона-электростанции восстановительного поезда [7].

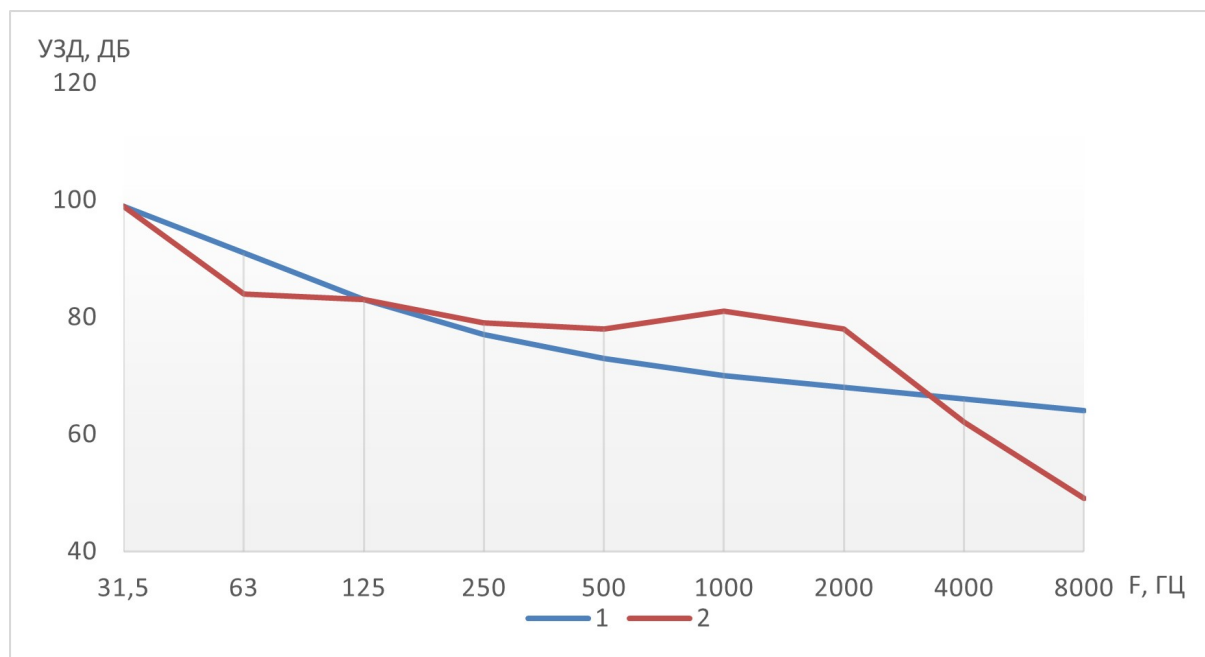


Рис. 1. Спектр шума на рабочем месте машиниста вагона-электростанции во время стоянки восстановительного поезда: 1 – санитарная норма; 2 – фактические уровни

Как видно из рисунка 1, фактически только в первых трех октавах в диапазоне частот 31,5–125 Гц превышения отсутствуют. Начиная с 4-й октавы происходит равномерное увеличение уровней звукового давления. В среднечастотном интервале 250–1000 Гц превышения находятся в пределах от 2 до 11 дБ, т. е. разница составляет 2 дБ на 250 Гц, 5 дБ на 500 Гц, на частоте 1000 Гц превышения достигают своего максимального значения, и разница с санитарной нормой составляет 11 дБ. На частоте 2000 Гц разница между уровнями звукового давления и санитарными нормами составляет 10 дБ. На 8-й октаве, на частоте 4000 Гц, превышения отсутствуют. Далее отмечен значительный спад спектра шума.

На рисунке 2 приведен спектр шума на рабочем месте ремонтной бригады, в пассажирском салоне автотрисы, в сравнении с нормами. Представлены данные в режиме «стоянка» на максимальных оборотах ДВС, а также при движении автотрисы со скоростью 70 км/ч. Как следует из представленных данных, шум на рабочем месте машиниста превышает установленные нормативные значения в диапазоне частот от 125 до 8000 Гц для обоих режимов.

Анализ данных, представленных на рисунке 2, позволяет сделать следующие выводы о необходимости снижения шума на рабочих местах автотрисы [8].

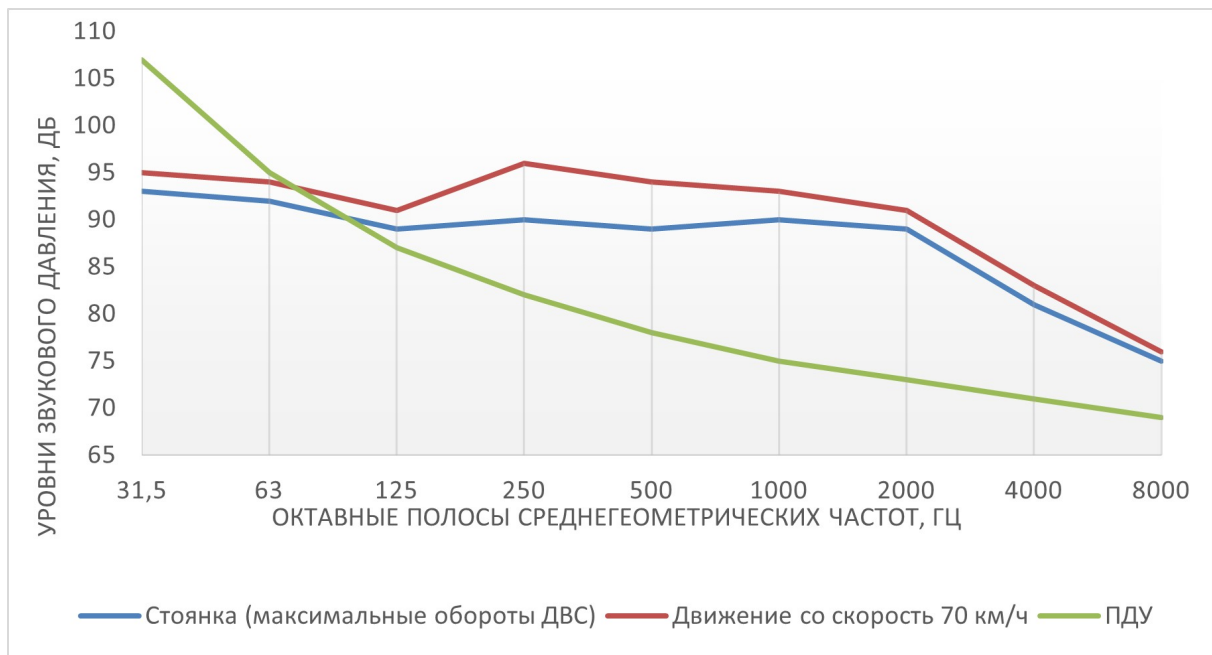


Рис. 2. Данные измерений шума на рабочем месте ремонтной бригады в пассажирском салоне автомотрисы в сравнении с нормами

Уровни звукового давления в норме на низких частотах в диапазоне 31,5–63 Гц, а превышение на частоте 125 Гц составляет от 2 до 5 дБ, что указывает на возможность не учитывать шум в этом диапазоне частот с точки зрения требований шумозащиты.

Наибольшие превышения (от 5 до 23 дБ) наблюдаются в диапазоне частот 250–8000 Гц, что требует особого внимания при разработке мер по снижению шума.

Превышение эквивалентных уровней звука на всех рабочих местах при двух основных режимах работы находится в пределах от 18 до 24 дБА, что соответствует превышению примерно в 3,5–5 раз по субъективному ощущению громкости.

Превышение максимальных УЗ меньше (от 5 до 14 дБА).

Наибольший уровень шума зарегистрирован в кабине машиниста, расположенной рядом с машинным отделением.

Из данных, полученных при измерении шума, шум качения на всех рабочих местах в средне- и высокочастотном диапазоне 250–2000 Гц превышает долю шума двигателя внутреннего сгорания на 3–7 дБ, что указывает на необходимость снижения шума от обоих источников при разработке рекомендаций по шумозащите.

2. Расчет звука, проходящего через систему помещений

Возможны самые различные сочетания взаимного расположения ИШ и помещений. Звук может проходить через тамбур, а затем в промежуточные вспомогательные помещения, через салон, а затем в кабину машиниста и т.д.

При выводе формул для расчетов прохождения звука использовался метод последовательного преобразования звуковых полей [9, 10].

Преобразование звукового поля происходит при каждом изменении импеданса среды, с которой при распространении встречается звук. Принятые основные допущения:

– звуковое поле в каждом из помещений квазидиффузное, степень допущения определяется коэффициентом $\Psi_{\text{пом}}$ [11];

- звук проходит в соседнее помещение только через внутреннее ограждение;
- вклад звуковой вибрации в шумообразование не учитывается [12].

В данной работе авторами рассмотрены два наиболее распространенных случая прохождения звука через систему помещений:

1. звук из машинного отделения через тамбур проходит в кабину машиниста (пример 1);
2. звук из машинного отделения проходит через два промежуточных помещения в отделение для отдыха (пример 2).

Пример 1. Схема указана на рисунке 4.

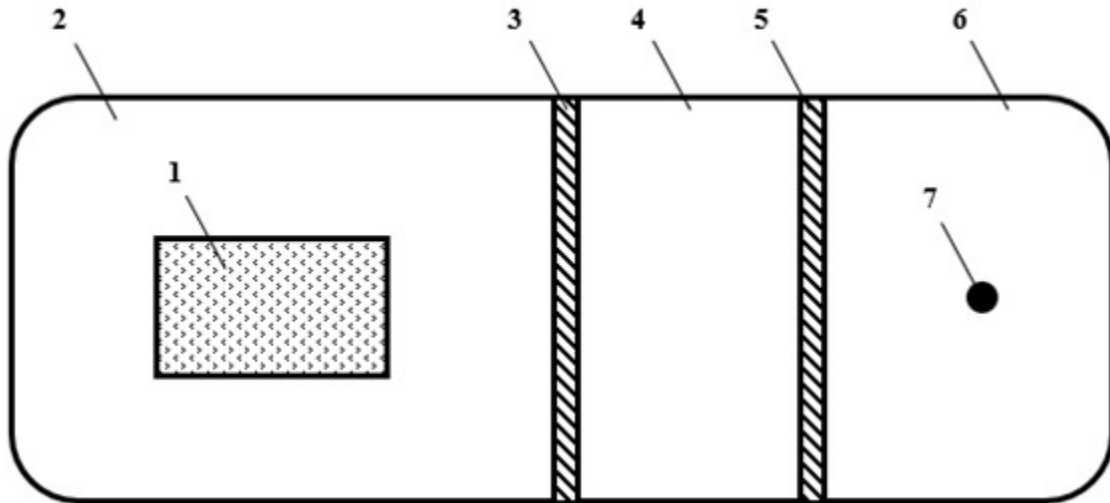


Рис. 3. Схема расчета прохождения звука через промежуточные помещения в кабину:

- 1 – источник шума - ДВС; 2 – машинное отделение; 3,5 – внутренние ограждения (перегородки соответственно); 4 – промежуточное помещение; 6 – кабина машиниста; 7 – расчетная точка (РТ)

Шум, падающий на перегородки в машинном отделении в результате многочисленных переотражений от ограждающих конструкций и корпуса ДВС, имеет отраженный характер, то есть прямой звук от источника шума, падающий на перегородки, не учитывается [13]. Уровни звукового давления в РТ представлены в формуле 1:

$$\begin{aligned}
 L_{РТ}^{каб} = & L_{W_{ист}} + 10lg(1 - \bar{\alpha}_{МО}) + 10lg(1 - \bar{\alpha}_{тамб}) + 10lg(1 - \bar{\alpha}_{каб}) - \\
 & - \overline{ЗИ}_{пер1} - \overline{ЗИ}_{пер2} + 10lg \frac{S_{пер1}}{A_{МО}} + 10lg \frac{S_{пер2}}{A_{тамб}} - 10lg \frac{A_{каб}}{A_0} + 10lg \psi_{МО} - \\
 & - 10lg \psi_{тамб} - 10lg \psi_{каб} + 10lg 4^3, \text{ дБ}
 \end{aligned} \quad (1)$$

где $L_{W_{ист}}$ - уровни акустической мощности источника шума (корпус ДВС), дБ;

$\bar{\alpha}_{МО}$ - средний коэффициент звукопоглощения в машинном отделении (МО);

$\bar{\alpha}_{тамб}$ - средний коэффициент звукопоглощения в тамбуре;

$\bar{\alpha}_{каб}$ - средний коэффициент звукопоглощения в кабине;

$\psi_{МО}$ - коэффициент, показывающий степень диффузности звукового поля в машинном отделении;

$\psi_{тамб}$ - коэффициент, относящийся к звуковому полю в тамбуре;

$\psi_{каб}$ - коэффициент, показывающий степень приближения звукового поля в кабине к диффузному;

- A_{MO} - эквивалентная площадь звукопоглощения в машинном отделении, m^2 ;
 $A_{тамб}$ - эквивалентная площадь звукопоглощения в тамбуре, m^2 ;
 $A_{каб}$ - эквивалентная площадь звукопоглощения в кабине, m^2 ;
 $A_0 = 1 m^2$;
 $S_{пер1}$ - площадь перегородки, m^2 ;
 $S_{пер2}$ - площадь перегородки, m^2 ;
 $ZI_{пер1}$ - частотно-зависимое значение звукоизоляции i -го элемента перегородки площадью $S_{пер1i}$, m^2 ;
 $ZI_{пер2}$ - частотно-зависимое значение звукоизоляции i -го элемента перегородки площадью $S_{пер2i}$, m^2 .
 Пример 2. Схема указана на рисунке 5.

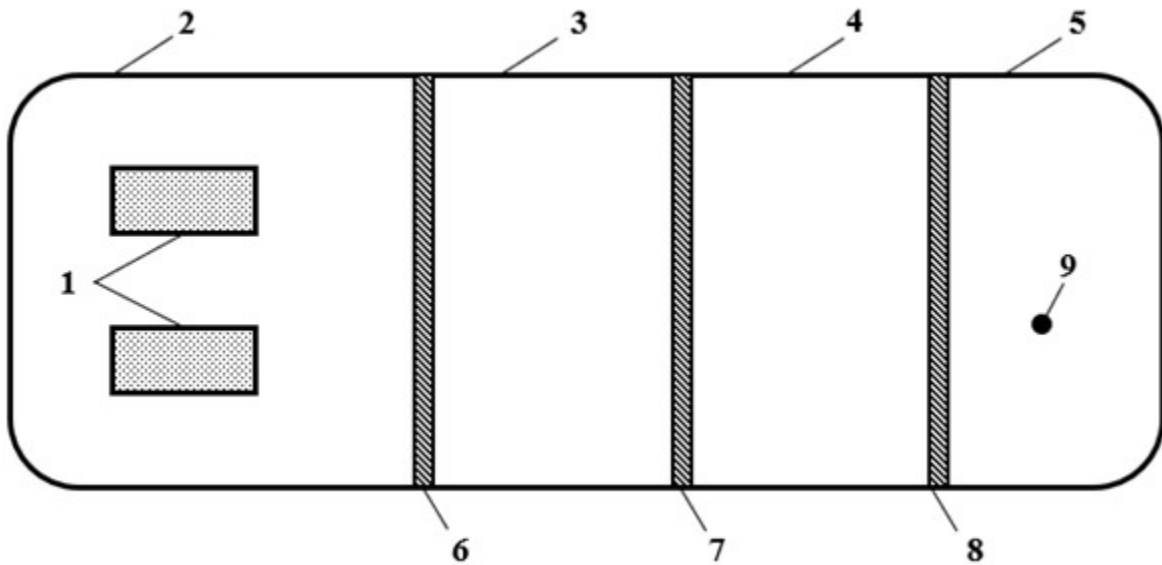


Рис. 4. Схема для определения шума на рабочем месте и месте отдыха персонала, обслуживающего вагон-электростанцию: 1 – источник шума (дизель-генераторные установки); 2 – машинное отделение (помещение 1); 3 – служебное помещение (помещение 2); 4 – кухня-салон (помещение 3); 5 – купе для отдыха (помещение 4); 6 – перегородка 1; 7 – перегородка 2; 8 – перегородка 3; 9 – расчетная точка

При выводе формулы в МО учитывались как прямой, так и отраженный звук [14]. Уровни звукового давления в РТ представлены формулой 2:

$$\begin{aligned}
 L_{РТ} = & L_{W_{ист}} + 10lg \left[\frac{\chi_{ист}}{2\pi r^2} + \frac{4(1 - \bar{\alpha}_{пом1})}{\Psi_{пом1} A_{пом1}} \right] + 10lg \frac{S_{пер1}}{A_{пом2}} - \overline{ZI}_{пер1} - \\
 & - 10lg \Psi_{пом2} + 10lg (1 - \bar{\alpha}_{пом2}) + 10lg \frac{S_{пер2}}{A_{пом3}} - \overline{ZI}_{пер2} - \\
 & - 10lg \Psi_{пом3} + 10lg (1 - \bar{\alpha}_{пом3}) + 10lg \frac{S_{пер3}}{A_{пом4}} - \overline{ZI}_{пер3} - \\
 & - 10lg \Psi_{пом4} + 10lg (1 - \bar{\alpha}_{пом4}) + 10lg(2 \cdot 4^3), \text{ дБ},
 \end{aligned} \tag{2}$$

где $L_{W_{ист}}$ - уровни акустической мощности источника шума, дБ;

$\chi_{ист}$ - коэффициент, учитывающий влияние ближнего поля в тех случаях, когда расстояние меньше удвоенного максимального габарита источника;

r – расстояние от источника шума до перегородки между помещениями 1 и 2, м;
 $\bar{\alpha}_{\text{пом1}}$ – средний коэффициент звукопоглощения в первом помещении;
 $\Psi_{\text{пом1}}$ – коэффициент, показывающий степень приближения звукового поля в помещении 1 к диффузному;
 $A_{\text{пом1}}$ – эквивалентная площадь звукопоглощения, м²;
 $S_{\text{пер}i}$ – площадь i -го элемента перегородки (дверь, сплошная стена прочее), м², звукоизоляция которой составляет $ZI_{\text{пер}i}$, дБ;
 $\bar{\alpha}_{\text{пом2}}$ – средний коэффициент звукопоглощения во втором помещении;
 $\Psi_{\text{пом2}}$ – коэффициент, показывающий степень приближения звукового поля к диффузному во втором помещении;
 $A_{\text{пом2}}$ – эквивалентная площадь звукопоглощения во втором помещении, м²;
 $\bar{\alpha}_{\text{пом3}}$ – средний коэффициент звукопоглощения в помещении 3;
 $\Psi_{\text{пом3}}$ – коэффициент, показывающий степень приближения звукового поля к диффузному в третьем помещении;
 $A_{\text{пом3}}$ – эквивалентная площадь звукопоглощения в третьем помещении, м²;
 $\bar{\alpha}_{\text{пом4}}$ – средний коэффициент звукопоглощения в помещении 4;
 $\Psi_{\text{пом4}}$ – коэффициент, показывающий степень приближения звукового поля к диффузному в четвертом помещении;
 $A_{\text{пом4}}$ – эквивалентная площадь звукопоглощения в четвертом помещении, м².

Заключение

СЖТ, предназначенный для выполнения погрузочно-разгрузочных работ, перевозки грузов при ремонте железнодорожного пути, восстановлении железнодорожного пути после аварий, имеет наибольшее число разнохарактерных источников шума в сравнении с другими видами транспортных средств. Разработанная математическая модель учитывает многообразие факторов, связанных с распространением шума от силовой установки на рабочие места машинистов СЖТ.

При выводе формул расчета прохождения звука через разное число помещений установлено, что шум в помещении зависит от звукоизолирующих свойств и площади внутреннего ограждения (перегородки), акустических свойств помещения (эквивалентной площади звукопоглощения и среднего коэффициента звукопоглощения), поправки, определяющей в зависимости от акустических свойств помещения степень отклонения звукового поля от диффузного, и акустической мощности источника шума (при этом также учитываются акустические свойства помещения, в котором располагается ИШ (машинное отделение)).

Выполненные расчеты по приведенным формулам сравнены с данными экспериментов: отклонение уровней звукового давления не превышает ± 3 дБ.

Список литературы

1. Подуст, С. В. Исследования шумообразования на рабочих местах локомотивных бригад от воздействия акустического излучения внутренних источников / С. В. Подуст // Вестник Донского государственного технического университета. – 2016. – Т. 16, № 4(87). – С. 104–109. – DOI 10.12737/22150.
2. Ivanov, N. I. The Problem of High-Speed Railway Noise Prediction and Reduction / Ivanov, N. I., Boiko, I. S., & Shashurin, A. E. // Procedia Engineering. – 2017. – № 189. – С. 539–546. doi:10.1016/j.proeng.2017.05.086

3. Забота о сотрудниках // ОАО "РЖД" URL: <https://social.rzd.ru/ru/9863/page/103290?id=10527> (дата обращения: 29.03.2024).
4. Shashurin A. Analysis of the experimental study of the axle lathe machine vibroacoustic characteristics for workplace noise reduction / A. Shashurin, K. Buzhinskiy, M. Gogvadze, E. Yuriy // *Akustika*. - 2019. - № 34. - С. 106-108.
5. Тюрина Н.В. Оценка эффективности кабины для снижения шума на рабочих местах / Н.В. Тюрина, К.П. Фиев, А.А. Воронова // *Noise Theory and Practice*. - № 9(4). - 2023. - С. 92-101.
6. Гусева А.А. Разработка организационно-технических мероприятий, направленных на борьбу с шумовым воздействием на рабочем месте водителя погрузчика / А.А. Гусева // *Noise Theory and Practice*. - № 8(1). - 2022. - С. 61-71.
7. Фролова, Д. С. Анализ результатов экспериментальных измерений вибрации и внутреннего шума вагона-электростанции восстановительного поезда, возникающих при работе дизель-генераторных установок / Д. С. Фролова // *Безопасность труда в промышленности*. - 2024. - № 2. - С. 34-41. - DOI 10.24000/0409-2961-2024-2-34-41. - EDN EFYUIF.
8. Васильева, В. К. Исследования акустических характеристик, возникающих при работе автомотрис и автодрезин / В. К. Васильева // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. - 2023. - № 8. - С. 205-211. - DOI 10.24412/2071-6168-2023-8-205-206. - EDN JKEXHO.
9. Иванов Н.И. Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом: учебник. - М.: Логос, 2013. - 432 с.
10. Иванов, Н. И. Основы виброакустики: учебник для вузов / Н. И. Иванов, А. С. Никифоров. - Санкт-Петербург : Политехника, 2000. - 482 с. - ISBN 5-7325-0599-7.
11. СП 51.13330.2011 Свод правил. Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003. - Москва : Минрегион России, 2011. - 41 с.
12. Шашурин, А. Е. Снижение внутреннего шума звукоизолирующими кабинами (на примере строительно-дорожных машин) : специальность 01.04.06 "Акустика" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Шашурин Александр Евгеньевич. - Санкт-Петербург, 2010. - 24 с. - EDN ZOCXSR.
13. Васильева, В. К. Теоретическая оценка спектров воздушной составляющей шума на примере дрезины АС-1А и автомотрисы АСГ-30П / В. К. Васильева // *Noise Theory and Practice*. - 2022. - Т. 8, № 3(30). - С. 52-60. - EDN HIMIYB.
14. Крутова, В. А. Методика расчета ожидаемых уровней шума в помещениях вагона-электростанции восстановительного поезда / В. А. Крутова, Д. С. Фролова // *Noise Theory and Practice*. - 2024. - Т. 10, № 2(37). - С. 44-52. - EDN VKPIEG.

References

1. Podust, S. V. Research of noise generation at workplaces of locomotive crews from exposure to acoustic radiation of internal sources / S. V. Podust // *Bulletin of the Don State Technical University*. - 2016. - Vol. 16, No. 4 (87). - Pp. 104-109. - DOI 10.12737/22150.
2. Ivanov, N. I. The Problem of High-Speed Railway Noise Prediction and Reduction / Ivanov, N. I., Boiko, I. S., & Shashurin, A. E. // *Procedia Engineering*. - 2017. - № 189. - С. 539-546. doi:10.1016/j.proeng.2017.05.086
3. Taking care of employees // JSC "Russian Railways" URL: <https://social.rzd.ru/ru/9863/page/103290?id=10527> (accessed: 03/29/2024).
4. Shashurin A. Analysis of the experimental study of the axle lathe machine

vibro acoustic characteristics for workplace noise reduction / A. Shashurin, K. Buzhinsky, M. Gogvadze, E. Yuriy // *Akustika*. - 2019. - No. 34. - pp. 106-108.

5. Tyurina N.V. Evaluation of the effectiveness of a cabin for noise reduction in workplaces / N.V. Tyurina, K.P. Fiev, A.A. Voronova // *Noise Theory and Practice*. - № 9(4). - 2023. - Pp. 92-101.

6. Guseva A.A. Development of organizational and technical measures aimed at combating noise exposure at the workplace of a loader driver / A.A. Guseva // *Noise Theory and Practice*. - № 8(1). - 2022. - Pp. 61-71.

7. Frolova, D. S. Analysis of the results of experimental measurements of vibration and internal noise of a power plant car of a recovery train that occur during operation of diesel generator sets / D. S. Frolova // *Occupational safety in industry*. - 2024. - No. 2. - pp. 34-41. - DOI 10.24000/0409-2961-2024-2-34-41. - EDN EFYUIF.

8. Vasilyeva, V. K. Studies of acoustic characteristics arising from the operation of avtotris and avtodresin / V. K. Vasilyeva // *Proceedings of Tula State University. Technical sciences*. - 2023. - No. 8. - pp. 205-211. - DOI 10.24412/2071-6168-2023-8-205-206. - EDN JKEHXO.

9. Ivanov N.I. Engineering acoustics. Theory and practice of noise control: textbook. - M.: Logos, 2013. - 432 p.

10. Ivanov, N. I. Fundamentals of vibroacoustics: textbook for universities / N. I. Ivanov, A. S. Nikiforov. - St. Petersburg : Polytechnic, 2000. - 482 p. - ISBN 5-7325-0599-7.

11. SP 51.13330.2011 Code of rules. Noise protection. Updated version of SNiP 23-03-2003. - Moscow : Ministry of Regional Development of Russia, 2011. - 41 p.

12. Shashurin, A. E. Reduction of internal noise by soundproof cabins (on the example of road construction machines) : specialty 01.04.06 "Acoustics" : abstract of the dissertation for the degree of candidate of technical Sciences / Shashurin Alexander Evgenievich. - St. Petersburg, 2010. - 24 p. - EDN ZOCXSR.

13. Vasilyeva, V. K. Theoretical assessment of the spectra of the air component of noise on the example of the AS-1A trolley and the ASG-30P car / V. K. Vasilyeva // *Noise Theory and Practice*. - 2022. - Vol. 8, No. 3(30). - pp. 52-60. - EDN HIMIYB.

14. Krutova, V. A. Methodology for calculating the expected noise levels in the premises of the power plant car of the recovery train / V. A. Krutova, D. S. Frolova // *Noise Theory and Practice*. - 2024. - Vol. 10, No. 2(37). - pp. 44-52. - EDN VKPIEG.