

УДК: 664.084.2:534.647

ПРИМЕНЕНИЕ РЕГРЕССИОННЫХ МЕТОДОВ В ВИБРОАКУСТИКЕ ПИЩЕВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Игорь Николаевич Заплетников¹, д-р техн. наук,**Александр Владимирович Гордиенко¹**, канд. техн. наук,¹Донецкий национальный университет экономики и торговли

Имени Михаила Туган-Барановского, ДНР, Россия

Тел: +7 (856) 3045046; E-mail: oborud@kaf.donnuet.edu

Аннотация. В статье приведены математические выражения регрессионных методов. Представлены регрессионные модели для описания виброакустических процессов возникновения шума. Модели получены в виде скорректированных по А уровней звуковой мощности на примере ряда пищевого оборудования. Даны рекомендации о рациональной области применения регрессионных моделей. Получены адекватные многофакторные модели шумовой характеристики оборудования. В качестве примера построена многофакторная регрессионная модель формирования уровня звука взбивальной машины МВ-35М в виде 2^3 . Согласно модели установлено, что наиболее значимым переменным фактором является уровень звука редуктора. Другими переменными факторами были приняты натяжение ремня клиноременного вариатора и вязкость продукта. Таким образом, в статье представлена методология применения регрессионных моделей к виброакустическим характеристикам технологического оборудования пищевых производств.

Ключевые слова: шум, технологическое оборудование, регрессионная модель.

APPLICATION OF REGRESSION METHODS IN VIBROACOUSTICS OF FOOD EQUIPMENT

Igor N. Zapletnikov¹, D. Eng.,**Alexander V. Gordienko¹**, Ph. D.,

Abstract. The article presents mathematical expressions of regression methods. Regression models are introduced to describe vibroacoustic noise generation processes. The models are derived as A-weighted sound power levels, using a range of food-processing equipment as case studies. Recommendations are provided on the rational scope of application for the regression models. Adequate multivariate models of equipment noise characteristics have been obtained. As an example, a multivariate regression model of sound level formation is built for the MB-35M mixing machine (in the form of 2^3). According to the model, the most significant variable factor is the gearbox sound level. Other variable factors include the tension of the V-belt variator belt and the viscosity of the product. Thus, the article presents a methodology for applying regression models to the vibroacoustic characteristics of processing equipment in food production facilities.

Keywords: noise, process equipment, regression model.

Введение

Виброакустика машин получила широкое применение как в науке, так и для практического применения. Разработан ряд стандартов, устанавливающих допустимые

уровни шума в различных областях промышленности, транспорта, сельского хозяйства, здравоохранения, общественных зданий и в быту и другое. В РФ разработан и внедрен ряд стандартов. Наиболее общим является ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ «Шум». Принят и ряд стандартов и СНиП 2.243059-16 «Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах», которые устанавливают требования по допустимым уровням шума и вибрации, заявления шумовых характеристик (ШХ) оборудования на стадии проектирования, методов их определения, расчет предельно допустимых значений (ПДШХ) и другие аспекты. Стандарт по шуму соответствует стандартам ISO «Акустика».

В РФ действуют и развиваются научные школы в области виброакустики. В частности, такие школы существуют в Балтийском государственном техническом университете «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова (БГТУ) под руководством профессора Иванова Н. И., Шашурина А. Е. и других ученых: проф. Цукерникова И. Е., проф. Бобровницкого Ю. И., проф. Тольского В. Е., проф. Побоя О. Н. В научном направлении регулярно проводятся всероссийские конференции с международным участием «Защита от шума и вибрации» (БГТУ), конференция по звуку и вибрации, Абури, США и др.

Среди стандартов по шуму следует выделить действующий ГОСТ 12.1.036-81 «Шум. Допустимые уровни звука в жилых и общественных зданиях», в котором для залов общественного питания – ресторанов, кафе, столовых установлен допустимый уровень звука днем – 55 дБА. Технологическое оборудование не должно превышать – 70 дБА по ТУ. Разница в 15 дБА свидетельствует о превышении механического оборудования общепита санитарных норм по шуму.

Многолетними исследованиями шумовых характеристик пищевого оборудования [1] было установлено, что имеет место превышение его уровня звуковой мощности (УЗМ) при работе с продуктом над УЗМ на холостом ходу. Это явление наблюдается как с пищевым оборудованием производства заводами торгового машиностроения РФ, Республики Беларусь, так и других зарубежных стран.

Целью данной статьи является разработка аналитических методов улучшения шумовых характеристик пищевого оборудования.

1. Основное содержание и результаты работы

Уровни звуковой мощности L_p или уровни звукового давления L_m в октавных полосах частот представляются в виде уравнения регрессии. С использованием программы «REGRE», проведен анализ вида регрессионной модели для одной и той же шумовой характеристики машины. В качестве моделей использовались линейная $L_p = bf$

Полиномиальная $L_p = b_0 + b_1 f + b_2 f^2 + \dots + b_i f^i$,

$$L_p = e^{-f} \sin f + ef$$

функции, вида:

$$L_p = \frac{\ln f}{f} + ef$$

$$L_p = e^{-f^2} + ef \quad (1.1)$$

Рассматривался и вариант, когда $b = 0$. В качестве критерия для выбора модели использовался коэффициент множественной корреляции τ и среднее квадратическое отклонение S . Анализировались лишь адекватные модели.

Наиболее приемлемой моделью для представления шумовой характеристики машины оказался полином шестой степени, вида

$$L_p = \epsilon_0 + \epsilon_1 f + \dots + \epsilon_6 f^6, \text{ дБ} \quad (1.2)$$

Расчеты показали, что коэффициенты регрессии имеют высокую степень, достигая 10^{-20} . Например, модель шумовой характеристики уровней звукового давления взбивальной машины, типа МВ-35М для положения взбивателя 6 (частота вращения взбивателя 29,5 рад/с) имеет вид:

$$L_m = 57,577 + 0,069 f - 5 \cdot 10^{-5} f^2 + 10^{-8} f^3 - 0,4375 \cdot 10^{-12} f^4 + 10^{-18} f^5 - 0,274 \cdot 10^{-20} f^6, \text{ (дБ)} \quad (1.3)$$

Модель получена при коэффициенте множественной корреляции характеризующих тесноту связи $\tau = 0,93$ и максимальной величине среднего квадратического отклонения $S = 3,17$ дБ. В связи с высокой степенью коэффициентов регрессии полинома использование такого вида моделей в инженерной практике затруднено.

Степень коэффициентов регрессии и в целом полинома - можно понизить, если независимую переменную представить в виде $\mu = \ln S$, Степень полинома понижается до третьей и модель шумовой характеристики примет вид

$$L_p = \epsilon_0 + \epsilon_1 \mu + \epsilon_2 \mu^2 + \epsilon_3 \mu^3 \quad (1.4)$$

Модель ШХ машины МВ-35М, представленная полиномом третьей степени,

$$L_p = -155,93 + 90,49 \mu - 10,06 \mu^2 + 0,31 \mu^3 \quad (1.5)$$

имеет лучшие статистические параметры ($\tau = 0,99$; $S = 1,71$ дБ), чем полиномиальная модель шестой степени.

Регрессионные модели для ВАХ машин являются компактной формой их представления, которые можно использовать не только для машин, но и источников ВАП в них с целью анализа результатов экспериментальных исследований ВАХ и обработки их на ПК.

С помощью регрессионных моделей ВАХ могут быть получены и более сложные модели, которые устанавливают статистическую связь не только между двумя переменными, но и между несколькими независимыми и одной зависимой переменной. В качестве последней используется ВАХ технологической машины, а в качестве независимых переменных - параметры технологического оборудования. Частные зависимости от каждого из параметров ищется в виде экспоненты. Общая модель строится в виде произведения частных моделей на критерий статистического подобия K_c . Статистическая модель ШХ по уровню звука:

$$L_A = K_c N_c^n M_T^{-m} \omega_k^{\omega} I_c^{-i} H_c^h \quad (1.6)$$

где N_c - установленная мощность электрооборудования, кВт; M_T - масса, кг; ω_k - частота вращения рабочего органа, рад/с; I_c - передаточное число механических передач к рабочему органу; H_c - половина высоты оборудования (величина, приближающаяся к высоте центра массы); n, m, ω, i, h - показатели степени соответствующих параметров.

Статистические зависимости определяются по программе "REGRE". Степень связи характеризуется коэффициентом корреляции τ , а ошибка - средним квадратическим отклонением S и абсолютной величиной остатка δ . Если статистические характеристики модели τ , S и δ окажутся недостаточными для практического использования модели, то модель 2.16 может быть улучшена путем отбрасывания членов ряда с наибольшей величиной остатка. Апробация статистической модели ШХ выполнена на ряде кинематически подобного торгово-технологического оборудования (ТТО). Показатели степени определяются по программе для степенной функции статистической зависимости ШХ и соответствующего параметра для ряда кинематически подобного ТТО (картофелечистки типа МОК, овощерезки типа МРО МИВП и МИСС, протирочная типа МП). Использовалась для этой цели и линейная зависимость, однако последняя показала меньшую тесноту статистической связи между параметрами и большую величину среднего квадратического отклонения. Величина K_c определяется для конкретной машины по известному уровню звука, её параметрам и рассчитанному показателю степени. Значения показателей степени и величин K_c приведены в таблице 1.

Таблица 1. Критерии статистического подобия ТТО

№	Тип оборудования	K_c
1.	МОК-125	$1,490 \cdot 10^9$
2.	МОК-250	$2,03630 \cdot 10^8$
3.	МОК-400	$2,7791 \cdot 10^8$
4.	МР050-200	$1,9255 \cdot 10^7$
5.	МР0400-1000	$4,1331 \cdot 10^4$
6.	МИСО	$2,2748 \cdot 10^4$
7.	МИВП	$1,2220 \cdot 10^{-5}$
8.	МП-800	$1,6718 \cdot 10^4$

Показатели степени параметров ТТО: $n=7,075$; $m=4,653$; $\omega=4,936$; $i=4,357$; $h=2,061$.

Попытка ввести в число параметров критериального уровня частоту вращения электродвигателя исследуемого ряда ТТО не увеличилась успехом в связи с тем, что теснота статистической связи этого параметра с шумовой характеристикой оказалась слабой (коэффициент множественной корреляции 0,122). Для остальных параметров

коэффициенты корреляции получились равными 0,79-0,67, среднее квадратическое отклонение – 0,24-0,31, что свидетельствует об удовлетворительной связи этих параметров с шумовой характеристикой. При малых значениях коэффициентов корреляции соответствующие параметры в 2.16 можно не вводить.

Применение критериального уравнения 2.16 ко всему механическому технологическому оборудованию снижает тесноту статистической связи (коэффициенты корреляции уменьшаются до 0,1-0,26), поэтому пользоваться этим методом нецелесообразно.

Таким образом, метод статистического моделирования можно использовать для прогнозирования ВАХ новой машины при наличии ряда кинематически подобного ей действующего или выпущенного ранее ТТО, однако недостатком данного метода моделирования является отсутствие в прогнозирующей модели параметра времени, хотя в исходных данных он присутствует в неявном виде.

2. Методика исследований

В практике улучшения ВАХ оборудования на стадии его проектирования, изготовления опытного образца и его испытания необходима оценка влияния шума отдельных конструктивных факторов на уровень шума или вибрации всей машины, причем целесообразно иметь конкретную количественную оценку этого влияния. Для решения этой задачи несомненный практический интерес представляют модели ВАХ, получаемые методом планирования эксперимента [2].

Ценность применения этого метода заключается еще и в том, что кроме сокращения количества опытов, он позволяет оценить и взаимное влияние ВАХ узлов на ВАХ всей машины, а также оптимизировать ВАХ при варьировании параметрами.

В качестве параметра оптимизации применяется уровень звука машины, уровень звуковой мощности, скорректированный уровень звуковой мощности, уровень звукового давления или уровень вибрации на среднегеометрических значениях частот, факторами, влияющими на параметр оптимизации, являются ВАХ источников шума в машине L_{pi} в дБ или L_{Ai} дБА. Количество факторов K определяется количеством узлов, шумовые характеристики которых можно определить обособленно, но не нарушать условия независимости факторов. При полном факторном эксперименте количество опытов равно P_y^k , где P_y - число уровней. Выбор числа уровней зависит прежде всего от условий эксперимента: производственные или в камере. В производственных условиях величина $P_y = 2$, за верхний уровень принимается наибольший уровень ВАХ узла, нижний - наименьший уровень ВАХ узла или узел отключен. Основной уровень L_{p0} определяется как среднее арифметическое между значениями наибольшего и наименьшего уровня параметров ВАХ.

Кодированное значение факторов находится по зависимости:

$$L_{pk} = \frac{L_p - L_{p0}}{L_{p\max} - L_{p0}} \quad (2.1)$$

В качестве модели ВАП в машине вначале принимается линейный полином для узловой схемы:

$$L_p = \epsilon_0 + \epsilon_1 L_{p1} + \epsilon_2 L_{p2} + \epsilon_{12} L_{p1} L_{p2} \quad (2.2)$$

для трехузловой схемы:

$$L_p = \epsilon_0 + \epsilon_1 L_{p1} + \epsilon_2 L_{p2} + \epsilon_3 L_{p3} + \epsilon_{12} L_{p1} L_{p2} + \epsilon_{13} L_{p1} L_{p3} + \epsilon_{23} L_{p2} L_{p3} + \epsilon_{123} L_{p1} L_{p2} L_{p3} \quad (2.3)$$

где $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ - значения коэффициентов регрессии, характеризующие степень влияния уровня шума или вибрации каждого узла на уровень ВАХ всей машины; $\epsilon_{12}, \epsilon_{13}, \epsilon_{23}$ - значение коэффициентов регрессии, характеризующие совместное влияние на уровень ВАХ машины пары узлов.

Матрицы планирования для полного факторного эксперимента 2^2 и 2^3 приведены в большом количестве литературы по вопросам планирования эксперимента [3-10].

В соответствии с матрицей планирования экспериментально определяются точным, техническим или ориентировочным методом ВАХ машины и из тех же измерительных точек, отдельных её узлов. Из экспериментальных результатов измерений отбрасываются ошибочные, у которых выполняется условие:

$$\frac{L_{pn} - \overline{L_p}}{S} \geq t_c \quad (2.4)$$

где L_{pn} - проверяемое значение уровня ВАХ, L_p - среднее арифметическое значение в этой серии, t_c - критерий Стьюдента.

Расчет коэффициентов регрессии модели проводится по способу наименьших квадратов.

$$\epsilon_j = \frac{\sum_{i=1}^n L_{pij} \cdot L_{pi}}{n} \quad (2.5)$$

Полученная модель проверяется на адекватность. Вначале проверяется однородность дисперсий. В случае однородности дисперсий определяется F-критерий, который сравнивается с табличным F

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{2k} (L_{pi} - L_{p.расч.})^2 (n-1) 2^k}{\sum_{j=1}^{2k} \sum_{i=1}^n (L_{pji} - \overline{L_p})^2 \epsilon_c} \quad (2.6)$$

где n - число опытов; ϵ_c - число степеней свободы

$$\epsilon_c = 2^k - 1 \quad (2.7)$$

В случае неадекватности модели меняется интервал варьирования, если это технически осуществимо в машине, либо вид модели. Могут использоваться и нелинейные модели в виде полиномов второй и третьей степени. Поиск оптимальных значений ВАХ технологической машины (минимум уровня излучаемого шума или вибрации при варьировании факторов) производится движением по градиенту. Составляющие градиента есть частные производные функции отклика. Изменяя независимые переменные пропорционально величинам коэффициентов регрессии, происходит движение в направлении градиента функции по крутому восхождению.

На использование метода накладываются акустические ограничения: расхождение между уровнями ВАХ источников не должно быть более 10 дБ и менее величины погрешности определения ВАХ, источники ВАХ при измерениях должны быть акустически независимыми.

Метод построения многофакторных моделей ВАХ использовался при исследовании ВАХ взбивальной машины МВ-35М [1]. В частности, трехфакторная модель её ШХ по уровню звука имеет вид:

$$L_A = 81,73 + 1,72L_{A1} + 0,41L_{A2} - 0,016L_{A3} - 0,41L_{A1}L_{A2} + 0,16L_{A1}L_{A3} + 0,1L_{A2}L_{A3} \quad (2.8)$$

где L_{A1} – уровень шума редуктора машины, дБА, L_{A2} – уровень шума электродвигателя, дБ, L_{A3} – уровень шума вариатора, дБ.

Анализ модели показал, что в общем шуме машины наиболее существенно влияние шума, создаваемого редуктором, конструктивным усовершенствованием которого и следует заняться в первую очередь. Исследование модели на оптимум показало, что он находится на уровне 80,2 дБА при варьировании факторами.

Метод планирования эксперимента позволяет получить также многофакторные модели зависимости ВАХ машины от ряда технологических и конструктивных факторов. В качестве факторов могут использоваться, например, режимы работы машины, свойства продукта, натяжение ремня клиноременной передачи и др.

Многофакторные модели типа 2^4 использована для оптимизации вибрационных параметров и режимов работы виброемочной машины с прямолинейными бигармоническими колебаниями рабочего органа [2-10]:

$$g_k = 0,4899 - 0,1571f - 0,1626Q_g + 0,185V_m + 0,2995f^2 - 0,1413f V_m - 0,141fQ + 0,172v_g \quad (2.9)$$

$$q_n = 13,712 + 1,7545f + 0,528Q_g + 0,7044f V_m - 1,1532f v_g + 1,4943Q_g^2 + 2,3923V_m^2 + 2,1430v_g^2 \quad (2.10)$$

где q_k – показатель качества мойки корнеклубнеплодов; q_n – производительность машины; f – частота колебаний рабочего органа; V_m – амплитуда основной гармоники; Q_g – удельный расход воды л/ч; v_g – отношение амплитуд основной и второй гармоник.

Исследование моделей на оптимум позволили установить следующие режимы работы вибромоечной машины: частота колебаний рабочего органа основной гармоники – 3,05 Гц, второй гармоники – 6,1 Гц, $u_b=0,4$.

Несмотря на несомненные достоинства многофакторных моделей, они применяются для ограниченного круга задач, построение их требует выполнения ряда технологических и акустических условий. Особые затруднения возникают при варьирования уровнями ШХ и акустическом разделении ШХ источников шума. Более универсальными статистическими моделями ШХ технологических машин являются однофакторные модели, которые могут быть получены методами регрессивного анализа.

4. Заключение

1. Представленные и апробированные регрессионные модели позволяют применять их в области виброкустики пищевого оборудования.
2. Получены эмпирические зависимости для определения уровня излучаемого звука на базе основных параметров пищевого оборудования.
3. Многофакторные модели позволяют получить регрессионные уравнения при планировании виброакустического эксперимента и определить наиболее значимые факторы или их сочетание.
4. Перспективами дальнейших исследований будут динамические регрессионные модели виброакустических характеристик.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Виброакустические свойства взбивально-тестомесительного пищевого оборудования. [монография]/ И. Н. Заплетников, А. В. Гордиенко. – Барнаул: Издатель: ИП Колмогоров И. А., 2020.-250с.
2. В. Ю. Кирпичников. Резонансная вибрация и звукоизлучение инженерных конструкций / В. Ю. Кирпичников. – Санкт-Петербург: Изд-во БГТУ «Военмех» им. Д. Ф. Устинова, 2023. – 241 с.
3. Миронова, Т. Б. Виброакустическое моделирование трубопроводной обвязки компрессора / Т. Б. Миронова, П. Д. Рекадзе, А. Б. Прокофьев // Динамика и виброакустика. – 2024. – Т. 10, №1. – С.68–77. DOI:10.18287/2409-4579-2024-10-1-68-77
4. I. E. Tsukernikov Vibration Characteristics of Railway Transports / I. E. Tsukernikov, I. L. Shubin and T O Nevenchannaya // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2021. Vol. 1079.
5. Иванов Н. И., Шашурин А. Е. Защита от шума и вибрации/ Н. И. Иванов, А. Е. Шашурин – Печатный Цех, 2019.-284с.
6. Дроздова Л. Ф., Кудаев А. В., Куклин Д. А., Чеботарева Е. Ю. Анализ методов определения и нормирования шумовых характеристик компрессорного оборудования // Noise Theory and Practice. – 2018. – Т. 4 № 4. – С. 35-41.
7. Заплетников И. Н., Квалиметрическая оценка влияния шумовых характеристик взбивальных машин на показатели их качества / Заплетников И. Н., Севаторова И. С., Гордиенко А. В.// Прогрессивные технологии и системы машиностроения: международный сборник научных трудов. – 2023. - Выпуск 3 (82) ' 2023. - С. 26-33.
8. Шашурин А. Е., Потери энергии колебаний в технологическом оборудовании / А. Е. Шашурин, Ю. И. Элькин, И. Н. Заплетников, А. В. Гордиенко // Noise Theory and

Practice: Научный журнал Балт. гос. техн. ун-т "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова – СПб: БГТУ "ВОЕНМЕХ", 2024. – Том 10. – №3. – 124 с. – С. 89-95.

9. Заплетников И. Н., Колебательная энергия в виброакустике пищевого оборудования / И.Н. Заплетников, А. В. Гордиенко, Н. В. Белоус // Машиностроение и техносфера XXI века : сб. трудов XXXI Междунар. науч.-техн. конф. в г. Севастополь 16 – 22 сент. 2024 г. / Ред. кол. : Михайлов А. Н. (пред.), Горобец И. А., Лахин А. М. [и др.]; отв. ред. Д. В. Огренич. – Донецк: ДонНТУ, 2024. – 440 с. – С. 91-95.

10. Tsukernikov I. Features of normalization and evaluation of vibration from rail transport in premises of residential and public buildings / Tsukernikov I., Shubin I., Nevenchannaya T. // Akustika. – 2019. Vol. 32, March. – P. 288-292/

REFERENCES

1. Vibroacoustic Properties of Dough-Kneading Food Equipment. [monograph] / I. N. Zapletnikov, A. V. Gordienko. - Barnaul: Publisher: IP Kolmogorov I. A., 2020.-250 p.

2. V. Yu. Kirpichnikov. Resonant Vibration and Sound Radiation of Engineering Structures / V. Yu. Kirpichnikov. - St. Petersburg: Publishing House of BSTU "Voenmekh" named after D. F. Ustinov, 2023. - 241 p.

3. Mironova, T. B. Vibroacoustic Modeling of Compressor Piping / T. B. Mironova, P. D. Rekadze, A. B. Prokofiev // Dynamics and Vibroacoustics. -2024. - Vol. 10, No. 1. –P. 68–77. DOI: 10.18287/2409-4579-2024-10-1-68-77

4. I. E. Tsukernikov Vibration Characteristics of Railway Transports / I. E. Tsukernikov, I. L. Shubin and T. O. Nevenchannaya // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2021. Vol. 1079.

5. Ivanov N. I., Shashurin A. E. Noise and Vibration Protection / N. I. Ivanov, A. E. Shashurin – Printing Workshop, 2019.-284 p.

6. Drozdova L. F., Kudayev A. V., Kuklin D. A., Chebotareva E. Yu. Analysis of methods for determining and standardizing noise characteristics of compressor equipment // Noise Theory and Practice. - 2018. - Vol. 4 No. 4. - P. 35-41.

7. Zapletnikov I. N., Qualimetric assessment of the influence of noise characteristics of whipping machines on their quality indicators / Zapletnikov I. N., Sevatorova I. S., Gordienko A. V. // Progressive technologies and systems of mechanical engineering: international collection of scientific papers. – 2023. - Issue 3 (82) ' 2023. - Pp. 26-33.

8. Shashurin A. E., Oscillation energy losses in process equipment / A. E. Shashurin, Yu. I. Elkin, I. N. Zapletnikov, A. V. Gordienko // Noise Theory and Practice: Scientific journal of the Baltic state tech. univ. D. F. Ustinova – SPb: BSTU "VOENMEKH", 2024. – Vol. 10. – No. 3. – 124 p. – P. 89-95.

9. Zapletnikov I. N., Vibrational energy in vibroacoustics of food equipment / I. N. Zapletnikov, A. V. Gordienko, N. V. Belous // Mechanical engineering and technosphere of the 21st century: collected works of the XXXI Int. scientific and technical conf. in Sevastopol, September 16–22, 2024 / Ed. board: Mikhailov A. N. (chairman), Gorobets I. A., Lakhin A. M. [et al.]; ed. D. V. Ogrenich. – Donetsk: DonNTU, 2024. – 440 p. – P. 91-95.

10. Tsukernikov I. Features of normalization and evaluation of vibration from rail transport in premises of residential and public buildings / Tsukernikov I., Shubin I., Nevenchannaya T. // Akustika. – 2019. Vol. 32, March. – P. 288-292.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 02.02.2026; одобрена после рецензирования 12.02.2026; принята к публикации 25.02.2026

The article was submitted February 2, 2026; approved after reviewing February 12, 2026; accepted for publication February 25, 2026.