

УДК: 699.844.1

OECD: 2.01 FA

Физические модели прохождения звука в методе сосредоточенных параметров при расчете звукоизоляции ограждающих конструкций зданий

Захаров А.В.¹, Салтыков И.П.^{2*}¹К.т.н., профессор, ²Старший преподаватель,^{1,2}Кафедра Архитектуры, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), г. Москва, РФ

Аннотация

Изучаются физические модели прохождения звука через однородные пластины в стандартном частотном спектре, который поделён на три условных частотных диапазона по аналогии с методикой действующего свода правил. Показано, что в первом частотном диапазоне, до граничной частоты волнового совпадения, при нормальном падении звука на пластину неразрывность её поверхностей с фронтами падающей, прошедшей и отраженной волн нарушаются по обеим поверхностям, кроме точек контакта амплитудных значений изгибных волн пластины с поверхностями плоских фронтов звуковых волн. Такая картина нарушения неразрывности при передаче движения может быть представлена моделью удара дискретного фрагмента пластины по воздушной волне, то есть, как взаимодействие твердого тела с фрагментом волновой среды. После частоты волнового совпадения движение передаётся между фрагментами сред распространения звука, являющихся волновыми объектами. То есть, на втором условном частотном диапазоне передача звуковой энергии протекает интенсивнее, что влечёт снижение звукоизоляции. В рассматриваемых моделях прохождения звука учитывается снижение звукоизоляции за счёт интерференционной картины в пластине.

Ключевые слова: граница сред, законы сохранения, приведённая масса, сосредоточенная масса, изоляция воздушного шума, строительные ограждения

Physical models of sound transmission in the concentrated parameters method for calculating sound insulation of enclosing structures

Zakharov A.V.¹, Saltykov I.P.^{2*}¹Ph.D., professor, ²Senior Lecturer,^{1,2}Department of Architecture, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Moscow, Russia

Abstract

Physical models of sound transmission through homogeneous plates in the standard frequency spectrum are studied, which is divided into three conditional frequency ranges in analogy with the methodology of the current set of rules. It is shown that in the first frequency range, up to the boundary frequency of wave coincidence, when sound falls normally on a plate, the continuity of its surfaces with the fronts of the incident,

*E-mail: vincsalt@mail.ru (Салтыков И.П.)

transmitted, and reflected waves is violated on both surfaces, except for the points where the amplitude values of the plate's bending waves contact the surfaces of the flat sound wave fronts. Such a picture of the discontinuity violation in the transmission of motion can be represented by the model of the impact of a discrete fragment of the plate on the air wave, that is, as the interaction of a solid body with a fragment of the wave medium. After the frequency of the wave coincidence, the movement is transmitted between the fragments of the sound propagation media, which are wave objects. That is, in the second conditional frequency range, the transmission of sound energy is more intense, which leads to a decrease in sound insulation. The sound transmission models under consideration consider the reduction of sound insulation due to the interference pattern in the plate.

Keywords: boundary of media, conservation laws, reduced mass, concentrated mass, isolation of air noise, building fences

Введение

Изоляция воздушного звука в зданиях однослойными ограждениями виде стен и перекрытий постоянно находится под пристальным вниманием специалистов [1]–[2], поскольку эти ограждения одновременно являются и несущими, составляя, при этом, самую большую долю всех конструкций здания. К таким конструкциям, которые являются пластинами, выполненными из соответствующих строительных материалов, одновременно предъявляются требования прочности и звукоизоляции.

В настоящее время теория и практика обеспечивают достаточную надежность строительных пластин по прочности. Надежность звукоизоляции этих пластин обеспечивается стандартными нормами расчета, основанными на большом объеме натурных и экспериментальных измерений, в том числе и с применением передовых измерительных методов [3]. При этом, теоретическая обоснованность действующих норм расчета содержит ряд противоречий, обсуждаемых специалистами. В данной статье обсуждаются два таких противоречия. Первое противоречие относится к изоляции пластины при падении на неё звука под различными углами. В принятой на сегодняшний день теории формула звукоизоляции (1) [4]–[5], стандартная запись «закона массы», имеет косинус угла падения звуковых лучей в числителе дроби под логарифмом. Это обуславливает невероятно малую звукоизоляцию пластины при падении на неё звука под так называемыми «скользящими» углами, малыми к её поверхности, в диапазоне до частоты волнового совпадения. По этой причине, звуковые волны, «скользящие» по пластине, объявляются несуществующими, что противоречит фундаментальному положению теории диффузности звукового поля. Имеется противоречие и в логике процесса измерения звукоизоляции: в прямоугольном помещении на стену, звукоизоляция которой измеряется, скользящие волны не падают, но тут же возникают при нормальном падении на другую стену, нормально примыкающую к первой стене.

Одной из особенностей метода сосредоточенных параметров [6]–[7], рассматриваемых в данной статье, является то, что в основной формуле звукоизоляции пластины, косинус угла падения волны находится в знаменателе, что обеспечивает рост звукоизоляции с увеличением значения косинуса. В этом случае результаты расчета и измерения звукоизоляции полностью согласуются без необходимости исключения скользящих волн.

Другое противоречие относится к трактовке явления волнового совпадения, описанному Л. Кремером в 1942 при рассмотрении процесса распространения звуковой волны через пластину, разделяющую воздушную среду [8]. При этом звук в пластине передается изгибной волной, скорость распространения которой возрастает с частотой, а скорость звука в воздухе постоянна. Явление волнового совпадения наблюдается на частотах, при которых скорость распространения изгибных волн в пластинах превышает

скорость распространения звука в воздухе. При волновом совпадении скорость колебаний частиц воздуха и пластины увеличивается, что приводит к снижению звукоизоляции пластины. На первый (и привычный) взгляд это увеличение колебаний вызвано механическими резонансами, которые возникают при совпадении частот собственных колебаний инерционно-упругого объекта с частотами вынуждающих колебаний. Но, в инерционно-упругих объектах, к которым в данном случае относятся сплошная, трехмерная среда воздуха и двухмерная среда пластины, в постановке задачи определения коэффициентов отражения и прохождения звука, принимаются безграничными, и, следовательно, собственных частот и резонансов не имеют. Это обстоятельство вынудило разработчиков темы в разные годы давать явлению волнового совпадения не очень корректные названия: «акустическое замыкание», «пространственно-частотный резонанс (полный и не полный)», «самосогласование волн». В действительности, волновое совпадение, как физический термин, вполне самодостаточен, однозначен и в других наименованиях не нуждается. Его действительный смысл заключается в существовании неразрывности, то есть совпадении фаз колебаний в любой точке контакта пластины на границе сред [9]. Это обстоятельство является второй особенностью теоретической основы метода сосредоточенных параметров. Также, рассматривая второе противоречие, нельзя не упомянуть о резонансных явлениях в пластине и поправках на снижение изоляции пластины, ими обусловленных. С точки зрения разработчиков описываемого метода, интерференционная картина в пластине образуется только за счёт сложения отражённых от торцов закрепления волн с вновь образующимися волнами, а колебания воздуха в рассматриваемом помещении учитываются опосредованно, с помощью поправок на демпфирующее действие воздуха. Нахождения поправок на резонансные явления является третьей особенностью метода сосредоточенных параметров.

Рассмотрим подробнее упомянутые выше особенности.

1 Прохождение звука через однородную однослойную пластину

Формула основного закона в классической акустике, «закона массы» с учётом диффузности звукового поля, была получена А. Шохом [7]:

$$R = 10 \lg \left[1 + \left(\frac{\pi \cdot m \cdot f \cdot \cos \theta}{\rho_0 \cdot c_0} \right)^2 \right], \quad (1)$$

где θ – угол между нормалью к поверхности звукоизолирующей пластины и направлением падения плоской звуковой волны, град.; m – поверхностная плотность пластины, кг/м², ρ_0 – плотность воздуха, 1,3 кг/м³; c_0 – скорость распространения звука в воздухе, 340 м/с; f – частота колебаний, Гц.

Для того, чтобы её вид имел математический и физический смысл, необходимо, чтобы косинус в числителе не равнялся 0°, так как тогда изоляция примет значения, равные или близкие 0 дБ. Поэтому, в классическом подходе к звукоизоляции [4]–[5], значения угла берутся в пределах от 0 до 75°, что не соответствует реальным наблюдениям в помещениях с перпендикулярными стенами: с одной стороны, «скользящих», движущихся параллельно поверхностям волн не существует, с другой стороны, эти же волны в диффузном поле фиксируются, когда падают под прямым углом к поверхности стены, перпендикулярной первой.

Метод сосредоточенных параметров предлагает альтернативный взгляд на эту проблему. Используя законы сохранения классической механики и соблюдение неразрывности при передаче звуковой энергии на границе сред, можно получить уравнения коэффициента прохождения звука по скорости и для вычисления звукоизоляции,

не противоречащие состоянию (принципу) диффузности звукового поля.

Как в работах [6]-[11], фрагменты сплошных сред могут аппроксимироваться материальными точками, придавая сплошным средам свойства дискретности. В методе сосредоточенных параметров такие объекты называются «приведёнными массами», по своей сути являющиеся объёмами сред, ограниченными площадями поперечного сечения и длиной волны на рассматриваемой частоте [12], рассчитываются по формуле (2):

$$\mu = \rho S/k = \frac{\rho S \lambda}{2\pi} = \frac{\rho c S}{2\pi f} = \frac{\rho c S}{\omega} = \frac{\rho c T S}{2\pi}, \text{ кг}, \quad (2)$$

где k – волновое число, м^{-1} , выполняет роль коэффициента приведения сосредоточенной массы волнового луча к сосредоточенной массе дискретного тела; λ – длина гармонической волны, м ; ρ – плотность материала пластины, $\text{кг}/\text{м}^3$; S – единичная площадь поперечного сечения волнового луча, м^2 ; c – скорость распространения волны, $\text{м}/\text{с}$; T – период колебаний, с ; ω – круговая частота колебаний, $2\pi/\text{с}$; ρc – волновое сопротивление.

Здесь волновое число выполняет роль коэффициента приведения сосредоточенной массы волнового луча к сосредоточенной массе дискретного тела. Таким образом, дискретные фрагменты сред распространения звука могут быть представлены как приведёнными массами, при наличии в средах или телах распространения звука волнового движения, так и сосредоточенными массами, представляющими собой твёрдый, несжимаемый объект до некоторой предельной частоты $f_{ult.}$, вычисляемой по формуле (3):

$$f_{ult.} \geq \frac{c}{2\pi L}, \text{ с}^{-1}, \quad (3)$$

где L – размер тела или среды, вдоль которого распространяются звуковые колебания, м .

Как показано в работах [12]-[13], формула (3) является критерием для перехода от объекта среды или тела, принимаемого в качестве сосредоточенной массы, к объекту среды или тела, принимаемого в качестве приведённой массы μ .

В работах [11]-[13] показано решение задачи падения звуковой волны на границу двух сред с использованием аналогии между упругим столкновением шаров Бернулли [14] и столкновением выделенных фрагментов двух сред, выражаемых, как было сказано выше, приведёнными массами. Математически взаимодействие приведённых масс описывается через закон сохранения количества движения и закон сохранения кинетической энергии.

Для решения задачи падения звуковых лучей на плоскую однородную пластину в упомянутых работах также даётся решение. Приведённой массе воздуха соответствует единичное сечение падающего нормально (рисунок 1а) или под углом к пластине (рисунок 1с) звукового луча, ограниченного длиной волны на рассматриваемой частоте. рисунок 1b иллюстрирует несоблюдение условия неразрывности при отсутствии косинусов, корректирующих ширины падающего и прошедшего лучей.

Единичный фрагмент воздушной среды, обладая эффективной единичной скоростью, воздействует на фрагмент пластины и фрагмент воздушной среды за ней. Закон сохранения кинетической энергии и закон сохранения количества движения в этом случае будут записаны в виде системы из уравнений (4) и (5). Уравнение (6) является сокращённой наглядной формой записи для уравнения (5).

$$\frac{(\mu \cdot \cos\theta) \cdot v^2}{2} = \frac{(\mu \cdot \cos\theta) \cdot (v\beta)^2}{2} + \frac{(\mu \cdot \cos\theta + m) \cdot (v\alpha)^2}{2}, \quad (4)$$

$$\frac{(\mu \cdot \cos\theta) \cdot v}{\cos\theta} = \frac{(\mu \cdot \cos\theta) \cdot (v\beta)}{\cos\theta} + \frac{(\mu \cdot \cos\theta + m) \cdot (v\alpha)}{\cos\theta}, \quad (5)$$

$$\mu \cdot v = \mu \cdot (v\beta) + (\mu + m/\cos\theta) \cdot (v\alpha), \quad (6)$$

где v – единичная скорость движения фрагмента среды; β – коэффициент отражения колебательной скорости (виброскорости); α – коэффициент прохождения колебательной скорости (виброскорости); m – сосредоточенная масса звукоизолирующей пластины; θ – угол, под которым падают звуковые лучи на пластину.

Косинусы корректируют ширины лучей для соблюдения условий неразрывности, что представлено на рисунке 1с. После сокращения косинусов получается уравнение (6).

Решением уравнений (4) и (5) является коэффициент прохождения по колебательной скорости (виброскорости), формула (7):

$$\alpha = \frac{1}{1 + \frac{m}{2\mu \cdot \cos\theta}}, \quad (7)$$

где m – сосредоточенная масса звукоизолирующей пластины; μ – приведённая масса воздуха; θ – угол падения звукового луча.

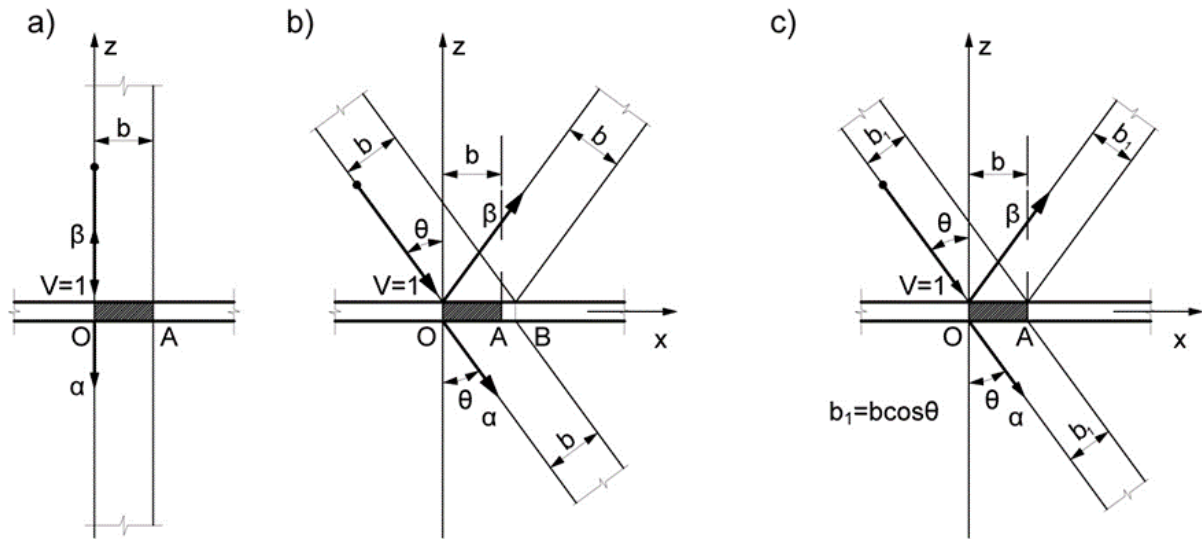
Математически положение косинуса угла падения звука в формуле (7) таково, что максимальное значение коэффициента α будет достигаться при равенстве угла падения звука $\theta = 0^\circ$, то есть, при нормальном падении звуковых лучей на пластину. Тогда, по определению звукоизоляции, как показано в работах [12]-[13], до частоты волнового совпадения изоляция находится по формуле (8):

$$\begin{aligned} R_1 &= 10 \lg \frac{1}{\alpha^2} = 10 \lg \left(1 + \frac{m}{2\mu_a \cdot \cos\theta} \right)^2 = 10 \lg \left(1 + \frac{\pi m}{\rho_0 \lambda_0 \cos\theta} \right)^2 = \\ &= 10 \lg \left(1 + \frac{\pi m f}{\rho_0 c_0 \cdot \cos\theta} \right)^2, \end{aligned} \quad (8)$$

где λ_0 – длина продольной волны в воздухе, м; m – сосредоточенная масса пластины (поверхностная плотность, при S звукового луча 1 м^2), кг/м², μ_a – приведённая масса воздуха, кг/м² (при S звукового луча 1 м^2).

Данная формула математически соответствует физической модели распространения звука через преграду в диапазоне до волнового совпадения: приведённая масса воздуха ударяет по сосредоточенной массе пластины и приведённой массе воздуха за ней, передавая им свой импульс и кинетическую энергию, уравнения (4) и (5) [6]-[12].

Если в этой формуле косинус примет значение 1 (случай нормального падения), звукоизоляция примет минимальное значение, которое рационально использовать в реальных инженерных расчётах. При этом падение волн под другими углами также не противоречит математическому и физическому смыслам формулы (8), в отличие от формулы (1) с косинусом, стоящим в числителе, что соответствует условиям диффузности звукового поля.



Обозначения: b – единичная ширина луча; b_1 – скорректированная для соблюдения условий неразрывности ширина звукового луча; θ – угол падения звукового луча; α – направление прошедшего через пластину луча; β – направление отражённого от пластины луча; OA – след падающего луча при соблюдении условия неразрывности; OB – след падающего луча при несоблюдении условия неразрывности на рисунке 1b; V – единичная скорость; x, z – наименования осей абсцисс и ординат в пространстве, соответственно

Рисунок 1 – Иллюстрация к соблюдению, схема (a), и несоблюдению, схема (b), условия неразрывности при падении звукового луча на преграду: а) – нормальное падение звукового луча – неразрывность соблюдена, единый размер следа падающего и отражённого лучей OA ; б) – вариант косоугольного падения луча с разрывом массивного слоя на величину AB ; с) – вариант наклонного падения с соблюдением условия неразрывности: следы падающего, отражённого и преломлённого лучей совпадают со следом OA нормально падающего луча в соответствии с [11]

В работе [12] показано, что на частотах выше частоты волнового совпадения, по критерию (3) пластина рассматривается как «волновод», то есть является в соответствии с предлагаемым методом приведённой массой $\mu_{pl.}$:

$$\begin{aligned}
 R_2 &= 10 \lg \frac{1}{\alpha^2} = 10 \lg \left(1 + \frac{\mu_{pl.}}{2\mu_a \cdot \cos \theta} \right)^2 = 10 \lg \left(1 + \frac{m}{2\rho_0 \lambda_0 \cdot \cos \theta} \right)^2 = \\
 &= 10 \lg \left(1 + \frac{mf}{2\rho_0 c_0 \cdot \cos \theta} \right)^2, \quad (9)
 \end{aligned}$$

где $\mu_{pl.}$ – приведённая масса звукоизолирующей преграды (пластины), кг/м^2 , рассчитываемая по формуле (2).

Модель прохождения звука через изолирующую преграду по формуле (9) проявляется в виде одновременного столкновения приведённой массы воздушной среды с приведённой массой преграды и приведённой массой воздушной среды, прилегающей к преграде с другой её стороны.

В методе сосредоточенных параметров учитываются звуковые волны, падающие только под прямым углом, дающие частотные характеристики с минимальными значениями изоляции, что важно при решении инженерных задач.

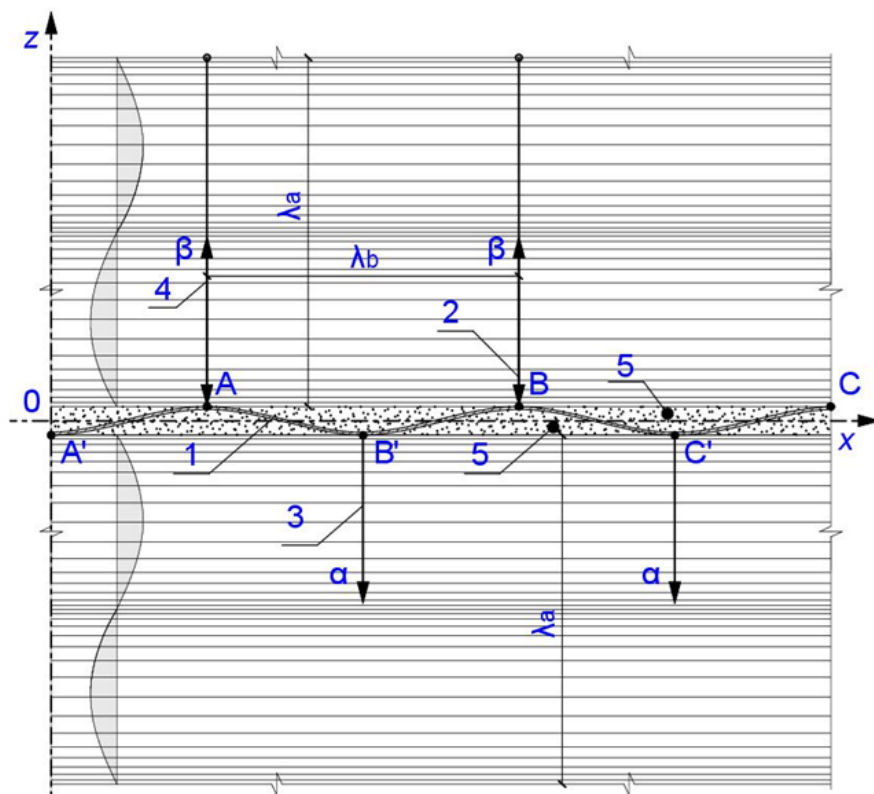
2 Представление о явлении волнового совпадения в свете рассматриваемого метода

В методике действующих нормативных документов [15] даются стандартные частотные кривые для массивных и лёгких ограждающих конструкций. С точки зрения графоаналитического метода расчёта важное значение имеет граничная частота, f_L , начиная с которой фиксируется значительное снижение звукоизоляции, статистически подтверждаемое и графиками натурных измерений. Явление «волнового совпадения» и частоты, начиная с которой оно происходит («граничной») было введено и впервые объяснено Кремером [8]: начиная с некоторой текущей частоты след длины падающей под углом на пластину воздушной звуковой волны совпадает с длиной волны изгиба в пластине, что приводит к возрастанию амплитуды изгибных колебаний и увеличению прохождения звуковой энергии через неё. В дальнейшем, в работах Седова М.С. и его учеников [16]-[17], описывающих прохождение звука через однородную пластину как «резонансное» и «инерционное», данная частота соответствовала началу диапазона «полных пространственных резонансов» [16]. С точки зрения рассматриваемого метода, объяснение явления провала кривой изоляции в окрестности граничной частоты f_L , выглядит иначе.

Известно, что для передачи звуковой энергии на границе соприкосновения воздуха и материала пластины должно соблюдаться условие «неразрывности». При падении звука под углами, близкими к прямому, на колеблющуюся пластину фронт падающей волны касается максимумов амплитуд изгибных колебаний пластины, что представлено на рисунке 2. В пространстве между максимальными точками изгибов образуется ближнее звуковое поле и происходит перекачка звуковой энергии, величина которой, однако, незначительна по сравнению с величиной энергии приведенной массы воздуха. Таким образом, состояние неразрывности наблюдается лишь частично. Частичное соблюдение условия неразрывности позволяет звуковой энергии в меньшей степени проходить через пластину по сравнению с диапазоном после волнового совпадения. Следует заметить, что метод сосредоточенных параметров позволяет не учитывать особенности энергетического переформирования ближнего поля пластины, но при этом иметь дело с результатом взаимодействия фрагмента воздушной среды и изолирующей преграды. С этой точки зрения, он аналогичен методу вычисления скоростей соударяющихся тел И. Бернулли после их взаимодействия, когда влияние упругих колебаний в объёмах тел в расчётах игнорируется.

Начиная с граничной частоты в диффузном звуковом поле неминуемо будут находиться волны с углами падения на пластину, при которых их геометрические следы будут совпадать с длинами волн изгиба. Энергия колебаний воздушных волн будет с гораздо большей интенсивностью проходить через содержащую волны изгиба пластину, тем самым снижая её изоляцию, что для одной такой волны интерпретирует рисунок 3.

Таким образом, вторую особенность метода сосредоточенных параметров можно охарактеризовать следующим образом: вместо пространственно-частотного резонанса, принятого за основу при объяснении провала в звукоизоляции, начиная с граничной частоты, в методе сосредоточенных параметров рассматриваются два режима работы пластины: в состоянии частичной неразрывности при передаче звуковой энергии и с состоянием полной неразрывности. Для существования же резонанса требуется совпадение вынуждающей частоты колебания с собственной, но, у бесконечной пластины, рассматриваемой в теории классической звукоизоляции, собственных частот колебаний не существует.



Обозначения: α – направление прошедшего через пластину луча; β – направление отражённого от пластины луча; λ_a – длина продольной волны в воздухе; λ_b – длина изгибной волны в пластине; x, z – наименования осей абсцисс и ординат в пространстве, соответственно

Рисунок 2 – Прохождение звуковой волны через бесконечную пластину при нормальном падении в диапазоне до частоты волнового совпадения: 1 – эпюра изгибной волны пластины; 2, 3, 4 – эпюры соответственно падающей, прошедшей и отраженной звуковых волн; 5 – зоны «перекачки» энергии колебаний воздуха («ближнее» поле); A, B, C, A', B', C' – точки контакта

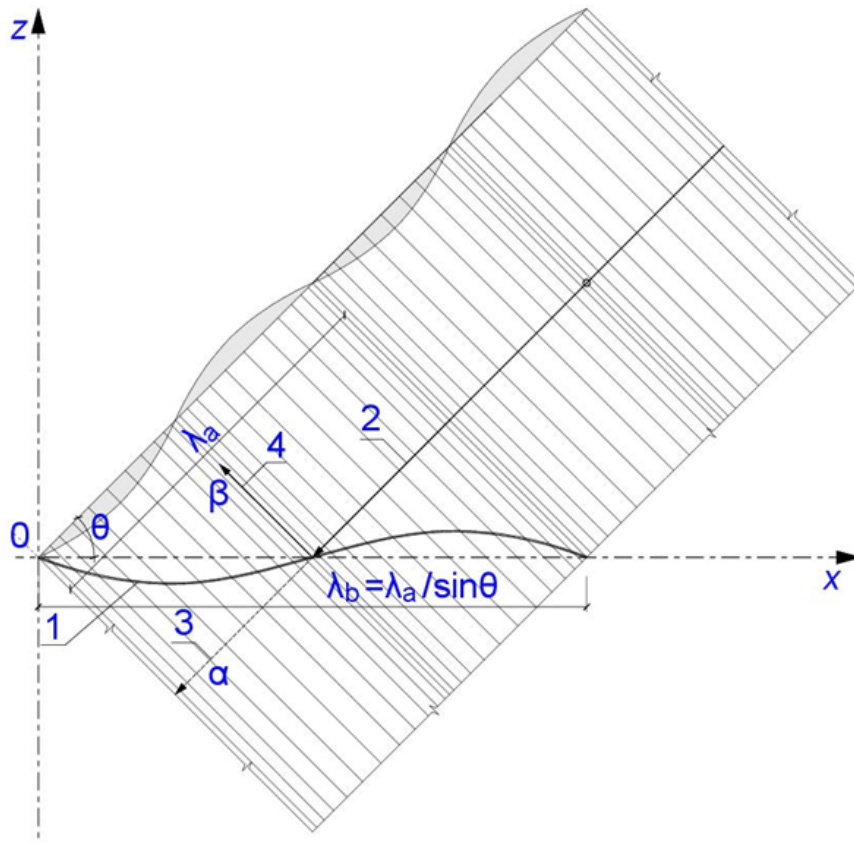
3 Резонансные явления в пластине

Влияние прилегающего воздуха в методе сосредоточенных параметров также учитывается вводимыми поправками на его демпфирующее действие до и после волнового совпадения ΔR_{a1} и ΔR_{a2} соответственно; подробнее данный вопрос раскрыт в работах [18]-[19]. Возрастание амплитуд волн при сложении бегущей и отражённой волн возникают в том случае, если по длинному или короткому размерам пластины укладывается целое число полуволн, частоты возникновения можно определить по формуле [19]-[20]:

$$f_n = \frac{0,45 \cdot c_{pl.l.} \cdot h_{pl.} \cdot n^2}{b^2}, \text{ Гц}, \quad (10)$$

где n – порядковый номер резонанса, b – наикратчайший горизонтальный или вертикальный размер пластины (перегородки), м; $c_{pl.l.}$ – скорость продольных волн в пластине.

Степень интенсивности резонансных явлений будет характеризоваться оттоком энергии в примыкающие конструкции в узлах закрепления пластины и рассеиванием энергии за счёт внутреннего трения в материале пластины. В основном, энергия изгибных



Обозначения: λ_a – длина продольной волны в воздухе; λ_b – длина изгибной волны в пластине; α – направление прошедшего через пластину луча; β – направление отражённого от пластины луча; θ – угол падения звуковой волны; x, z – наименования осей абсцисс и ординат в пространстве, соответственно

Рисунок 3 – Прохождение звуковой волны через бесконечную пластину при наклонном падении в диапазоне частот волнового совпадения: 1 – эюра изгибной волны пластины; 2, 3, 4 – эюры соответственно падающей, прошедшей и отраженной звуковых волн

колебаний перетекает в примыкающие конструкции и описывается коэффициентами прохождения и отражения по колебательной скорости изгибных волн. В данном контексте, для нахождения поправки на потерю энергии на резонансах, вычисляемой по формуле (11), интересен коэффициент отражения β .

$$\Delta R_{res.} = 20 \lg \frac{1}{1 - \beta}, \text{ дБ}, \quad (11)$$

где $\beta = \beta_1 = \beta_2$ – коэффициенты отражения по колебательной скорости от двух противоположных торцов закрепления испытываемой пластины.

Отметим, что наряду с резонансами, при интерференции в пластине наблюдаются и антирезонансы, но их влияние при решении инженерных задач не учитывается.

Найти коэффициенты отражения в рассматриваемом методе возможно также с использованием уравнений закона сохранения количества движения (12) и закона сохранения кинетической энергии (13). В данном случае выражено упругое взаимодействие сосредоточенных или приведённых масс пластины с примыкающими конструкциями. В большинстве случаев используются приведённые массы, рассчитываемые по формуле (2), так как в пластинах фиксируется волновое движение.

$$\mu_{pl.} \cdot v = \mu_{pl.} \cdot v \cdot \beta + \mu_w. \cdot v \cdot \alpha, \quad (12)$$

$$\frac{\mu_{pl.} \cdot v^2}{2} = \frac{\mu_{pl.} \cdot (\beta v)^2}{2} + \frac{\mu_w. \cdot (\alpha v)^2}{2}, \quad (13)$$

где $\mu_w.$ – приведённая масса примыкающей стены акустической камеры, кг, при изгибных волнах.

Из совместного решения данных уравнений находятся коэффициенты отражения по колебательной скорости β_1 и β_2 . При закреплении относительно тонкой пластины между массивными строительными конструкциями вполне возможно ограничиться линейной задачей с жёсткой заделкой по двум контурам, особенности других вариантов закрепления рассматриваются в работах [20]–[21].

Влияние снижающих изоляцию поправок за счёт резонансных явлений наглядно показано на графике рисунка 4. Для массивных ограждений значение поправок с частотой снижается, в ориентировочных практических расчётах их значениями можно пренебречь.

Заштрихованной областью показана область возникновения резонансов (ниже линии R) и антирезонансов (выше линии R): R – кривая звукоизоляции, дБ; ΔR – поправка на резонансы или антирезонансы, дБ; f_L – частота волнового совпадения, Гц; f – текущая частота, Гц; β – коэффициент отражения

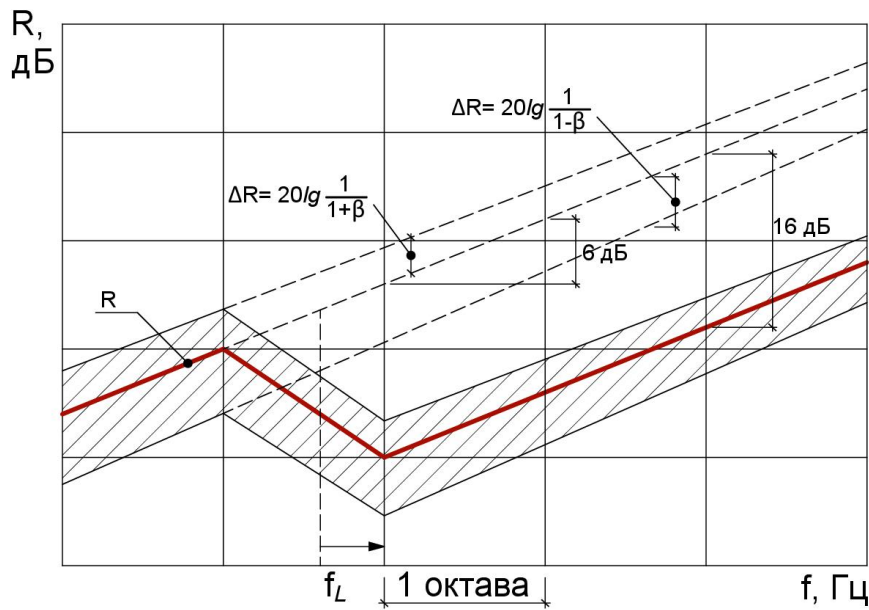


Рисунок 4 – Схема построения расчётной кривой для однослойных перегородок

В итоге, на первом и втором условных частотных диапазонах суммарная изоляция на текущей частоте будет складываться из изоляции по закону масс по формулам (8) или (9) и поправки на демпфирующее действие воздуха ΔR_a . [18] за вычетом поправки на резонансы по формуле (11), выражения (14) и (15):

$$R_{tot.1} = R_1 - \Delta R_{res.} + \Delta R_{a1}; f < f_L, \quad (14)$$

$$R_{tot.2} = R_2 - \Delta R_{res.} + \Delta R_{a2}; f \geq f_L, \quad (15)$$

где R_1 и R_2 – значения звукоизоляции в первом и во втором частотных диапазонах, соответственно, дБ; $\Delta R_{rez.}$ – поправка на снижение звукоизоляции за счёт резонансов, дБ;

ΔR_a – поправка на демпфирующее действие воздуха, дБ; f – текущая частота, Гц; f_L – частота волнового совпадения, Гц.

Формулы (14), (15) полностью применимы для построения частотных характеристик при исследовании лёгких тонких ограждений, где в соответствии с требованиями норм рассматриваются диапазоны до частоты волнового совпадения и после неё. На графиках звукоизоляции массивных ограждений появляется горизонтальный прямой участок, где преобладают изгибные и волны сдвига; подробная методика расчёта приводится в работах [22] и [23]. Пример построения графика в соответствии с представленным методом представлен на рисунке 5.

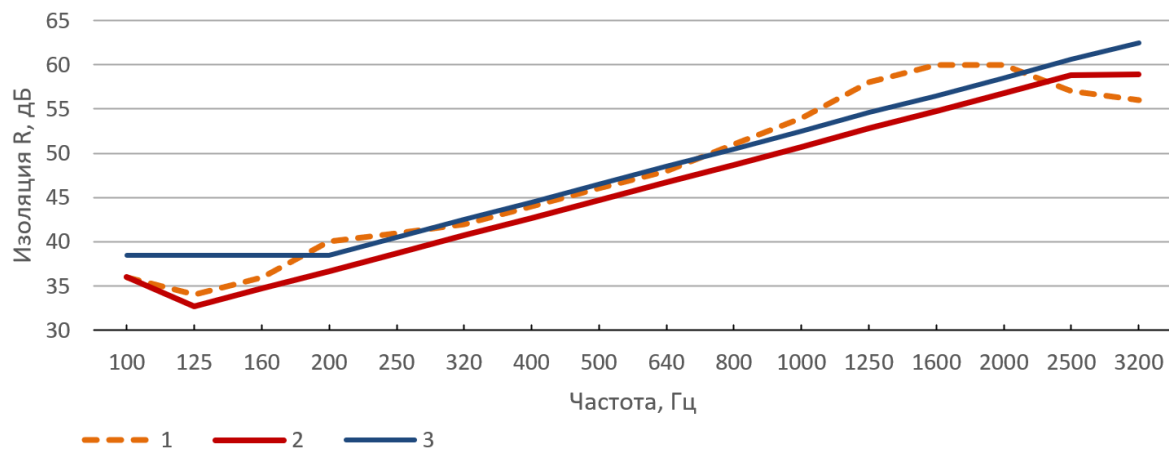


Рисунок 5 – Частотные характеристики для железобетонной панели, толщиной 140 мм: 1 – экспериментальные данные; 2 – частотная кривая по приведённому в статье методу; 3 – частотная характеристика на основе методики СП

Заключение

Подводя итоги представленной публикации, сформулируем основные выводы:

1. Рассмотрены особенности вычисления звукоизоляции для однослойных однородных ограждающих конструкций согласно методу сосредоточенных параметров;
2. Показана целесообразность расчёта изоляции воздушного шума только с учётом нормального падения звуковых лучей на преграду;
3. Дано объяснение явлению «волнового совпадения» согласно условиям неразрывности передачи звуковой энергии на границе сред;
4. Объяснено влияние интерференционной картины в закреплённой пластине на её звукоизоляцию и представлено математическое выражение для вычисления поправок на резонансы;
5. Записаны математические выражения для изоляции однослойных пластин для двух условных частотных диапазонов, основанные на двух физических моделях распространения звука через пластину.

В заключение отметим, что метод сосредоточенных параметров позволяет решать более широкий спектр задач, нежели представлено в статье, а его методика и формирующие её физические модели распространения звука через ограждения продолжают активно развиваться и совершенствоваться.

1. Гуреев К. А., Трясцин Д. В. Исследования акустических свойств материалов для дополнительной звукоизоляции в многоквартирных жилых домах в условиях применения различных строительных конструкций // *Noise Theory and Practice*. – 2022. – Т. 8, № 4. – С. 49-58.
2. Герасимов А.И., Васильев М.Д., Рудь Н.С. Оценка эффективности дополнительной звукоизоляции (приставных оболочек) основных конструкций стен и перегородок // *Noise Theory and Practice*. – 2020. – Т. 6, № 4. – С. 33-41.
3. Цукерников И.Е., Невенчанная Т.О., Щурова Н.Е. Оценка условий измерения при определении звукоизоляции строительных изделий методом интенсивности в лабораторных условиях // *Noise Theory and Practice*. – 2024. – Т. 10, № 2. – С. 7-16.
4. Заборов, В.И. Теория звукоизоляции ограждающих конструкций. / В.И. Заборов, - М.: Изд. лит. по строит, 1969. - 186 с.
5. Клюкин, И.Н. Борьба с шумом и звуковой вибрацией на судах. / И.Н. Клюкин - Л.: Судостроение, 1971. - 416 с.
6. Захаров, А.В. Дискретные модели прохождения волн при расчетах звукоизоляции в зданиях. / А.В. Захаров // Промышленное и гражданское строительство. - 2012. - N 11. - С. 50-54.
7. Захаров, А.В. Свойство дискретности сплошных инерционно-упругих сред. / А.В. Захаров // Инновации и инвестиции. – 2021. – №4. – С. 274–277.
8. Cremer, L. Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik. Band III. Wellentheorie Raumakustik. / Cremer, L. – Leipzig: Published by S. Hirzel. - 1950. – 355 p.
9. Захаров, А.В. К вопросу явления «волнового совпадения» в контексте метода «сосредоточенных параметров» / А.В. Захаров, И.П. Салтыков // Инновации и инвестиции. - 2025. - N 5. - С. 787-790.
10. Schoch, A. The mechanism of sound transmission through single leaf partitions, investigated using small scale models / A. Schoch, K. Fener // *Acustica*. – 1952. – Vol. 2. – N 5. – P. 189.
11. Захаров, А.В. Законы сохранения механики в задачах распространения волн через границы инерционно-упругих сред / А.В. Захаров, И.П. Салтыков // *Noise Theory and Practice*. – 2024. – N (10). – С. 27-41.
12. Салтыков, И.П. Теоретическое и практическое исследование звукоизоляции лёгких ограждающих конструкций с использованием метода «сосредоточенных параметров» / И.П. Салтыков // Региональная архитектура и строительство. – 2023. – N 2(55). – С. 167-171.
13. Захаров, А.В. О правильных коэффициентах отражения и преломления волн при косом распространении звука через границу сред. / А.В. Захаров // Инновации и инвестиции. - 2021. - N 6. - С. 103-105.
14. Бернулли, И. Избранные сочинения по механике: перевод с нем./ И. Бернулли – М.; Л.: Объединенное научно-техническое издательство, 1937. – 297 с.
15. СП 275.1325800.2016. Конструкции ограждающие жилых и общественных зданий. Правила проектирования звукоизоляции/ – М.: Минстрой России, 2016. – 65 с.
16. Седов, М.С. Звукоизоляция. / М.С. Седов // Справочник «Техническая акустика транспортных машин»: Под ред. д-ра техн. наук профессора Н. И. Иванова. – СПб.: Политехника, 1992. – Глава 4. – С.68–106.
17. Ерофеев, В.И. Резервы повышения звукоизоляции однослойных и многослойных ограждающих конструкций зданий/В.И. Ерофеев, Д.В. Монич // Вестник ТГАСУ. – 2020. – N 5 [Электронный ресурс]. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rezervy-povysheniya-zvukoizolyatsii-odnosloynnyh-i-mnogosloynnyh-ograzhdayuschih-konstruktsiy-zdaniy> (дата обращения 18.08.2025).

18. Салтыков, И.П. Расчет звукоизоляции тонких перегородок на основе модели с сосредоточенными параметрами. // И.П. Салтыков // Вестник МГСУ. - 2020. - Т.15. - N 3. - С. 353-367.
19. Салтыков, И.П. Сравнение результатов расчёта звукоизоляции однослойных перегородок на основе модели с сосредоточенными параметрами с результатами традиционных методов расчёта / И.П. Салтыков // Инновации и инвестиции. - 2020. - N 2. - С. 173-180.
20. Zakharov, A.V. The Influence of Wave Resonance Phenomena on the Sound Insulation of a Single-layer Building Partition in the Application of Calculation Models with the Concentrated Parameters. / A.V. Zakharov, , I.P. Saltykov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. - 2021. - Vol. 1079. - P. 032068. - DOI:10.1088/1757-899X/1079/3/032068 [Electronic resource]. - URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1079/3/032068> (date of reference 18.08.2025).
21. Разживин, В.М. Изоляция воздушного шума легкими ограждающими конструкциями зданий с учетом их закрепления: монография/ В.М. Разживин. - Пенза, 2014. - 120 с.
22. Zakharov, A.V. The third frequency range of the sound insulation plot of the single layer partitions. / A.V. Zakharov, I.P. Saltykov, // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2020. - N 753. - P. 032064. - DOI:10.1088/1757-899X/753/3/032064 [Electronic resource]. - URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/753/3/032064/pdf> (date of reference 18.08.2025).
23. Захаров, А.В. Влияние сдвиговых и продольных волн на звукоизоляцию в третьем диапазоне стандартного частотного спектра/ А.В. Захаров, И.П. Салтыков //Инженерный вестник Дона. - 2022. - N 4 [Электронный ресурс]. - URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2022/7517> (дата обращения 18.08.2025)

References

1. Gureev K. A., Triastnin D. V. Studies of acoustic properties of materials for additional sound insulation in multi-apartment residential buildings under conditions of application of various building structures // Noise Theory and Practice. - 2022. - Vol. 8, N 4. - P. 49-58.
2. Gerasimov A.I., Vasilyev M.D., Rud N.S. Estimation of the efficiency of additional sound insulation of the basic constructions of walls and partitions// Noise Theory and Practice. - 2020. - Vol. 6- N 4. - P. 33-41.
3. Tsukernikov I.E., Nevenchannaya T.O., Shchurova N.E. Assessment of measurement conditions when determining the sound insulation of building products using the intensity method in laboratory conditions // Noise Theory and Practice. - 2024. - Vol. 10. - N 2. - P. 7-16.
4. Zaborov, V.I. The Theory of Sound Insulation of Enclosing Structures. / Zaborov, V.I. - Moskva: Construction Literature Publishing. - 1969. - 186 p.
5. Kl'ukin, I.N. The Noise and Sound Vibration Abatement on the Ships. / Kl'ukin, I.N. - Leningrad: Sudostroyeniye Publishing. - 1971. - 416 p.
6. Zakharov, A.V. Discrete models of passage of waves for calculation of sound insulation in buildings. / A.V. Zakharov // Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo. - 2012. - N 11. - p. 50-54.
7. Zakharov, A.V. The discreteness property of continuous inertial elastic media. / A.V. Zakharov // Innovations and investments. - 2021. - N 4. - pp. 274-277.
8. Cremer, L. Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik. Band III. Wellentheorie Raumakustik. / L. Cremer - Leipzig: Published by S. Hirzel. - 1950. - 355 p

-
9. Zakharov, A.V. On the issue of the phenomenon of "wave coincidence" in the context of the "lumped parameters" method / A.V. Zakharov // *Innovations and investments*. - 2025. - N 5. - P. 787-790.
 10. Schoch, A. The mechanism of sound transmission through single leaf partitions, investigated using small scale models / A. Schoch, K. Fener // *Acustica*. - 1952. - Vol. 2. - N 5. - P. 189.
 11. Zakharov, A.V. Mechanic's conservation laws in problems of wave propagation through the boundaries of inertial elastic media / I.P. Saltykov // *Noise Theory and Practice*. - 2024. - N 3(10). - P. 27-41.
 12. Saltykov, I.P. Theoretical and practical study of sound insulation of light enclosing structures using the method of "concentrated parameters" / I.P. Saltykov // *Regional architecture and construction*. - 2023. - № 2(55). - Pp. 167-171.13. Saltykov, I.P. Sound insulation design of the thin partitions on the base of concentrated parameters model. / I.P. Saltykov // *Vestnik MGSU*. - 2020. - Vol.15. - N 3. - P. 353-367.
 13. Zakharov, A.V. On the correct coefficients of reflection and refraction of waves during oblique propagation of sound through the boundary of media. / A.V. Zakharov // *Innovacii i investicii*. - 2021. - N 6. - P. 103-105.
 14. Bernoulli, I. Selected works on mechanics: translated from German/ I. Bernoulli - M.; L.: United Scientific and Technical Publishing House, 1937. - 297 p.
 15. SP 275.1325800.2016. Construction fencing of residential and public buildings. Rules of sound insulation design/ - Moscow: Ministry of Construction of Russia, 2016. - 65 p.
 16. Sedov, M.S. Sound insulation.. / M.S. Sedov // *Handbook "Technical acoustics of transport vehicles"*: Edited by Dr. of Technical Sciences, Professor N. I. Ivanov. - St. Petersburg: Polytechnic. - 1992. - Chapter 4. - P. 68-106.
 17. Erofeev V.I. Reserves for increasing the sound insulation of single-layer and multi-layer enclosing structures of buildings/Yerofeev V.I., Monich D.V.// *Bulletin of TSASU*. - 2020. - N 5 [Electronic resource]. - URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rezervy-povysheniya-zvukoizolyatsii-odnosloynnyh-i-mnogosloynnyh-ograzhdayuschih-konstruktsiy-zdaniy> (date of reference 18.08.2025).
 18. Saltykov, I.P. Sound insulation design of the thin partitions on the base of concentrated parameters model. / I.P. Saltykov // *Vestnik MGSU*. - 2020. - Vol.15. - N 3. - P. 353-367.
 19. Saltykov, I.P. Comparison of the sound insulation calculation results for single-layer partitions based on the concentrated parameters model with the results of traditional calculation methods / I.P. Saltykov // *Innovations and investments*. - 2020. - N 2. - P. 173-180.
 20. Zakharov, A.V. The Influence of Wave Resonance Phenomena on the Sound Insulation of a Single-layer Building Partition in the Application of Calculation Models with the Concentrated Parameters. / Zakharov, A.V., Saltykov, I.P. // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. - 2021. - Vol. 1079. - P. 032068. - DOI:10.1088/1757-899X/1079/3/032068 [Electronic resource]. - URL: iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1079/3/032068 (date of reference 18.08.2025).
 21. Razzhivin V.M. The air noise insulation by the use of lightweight enclosing structures of the buildings, subject to their fastening: The monograph / V.M. Razzhivin. - Penza, 2014. - P. 120.
 22. Zakharov, A.V. The third frequency range of the sound insulation plot of the single layer partitions. / Zakharov A.V., Saltykov I.P.// *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. - 2020. - N 753. - P. 032064. - DOI:10.1088/1757-899X/753/3/032064 [Electronic resource]. - URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/753/3/032064/pdf> (date of reference 18.08.2025).

23. Zakharov, A.V. An influence of shear and longitudinal waves on sound insulation in the third range of the standard frequency spectrum/ Zakharov, A.V., Saltykov, I.P. // Inzhenernyy vestnik Dona. – 2022. – N 4 [Electronic resource]. – URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2022/7517> (date of reference 18.08.2025).