

## Влияние сдвиговых и продольных волн на звукоизоляцию в третьем диапазоне стандартного частотного спектра

*А.В. Захаров, И.П. Салтыков*

*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет*

**Аннотация:** Стандартный частотный спектр, согласно нормативным документам, разделён на три частотных диапазона. Третий частотный диапазон в настоящий момент не достаточно хорошо изучен и представляется на стандартном графике звукоизоляции прямой линией. При воздействии звука на пластину, на некоторой частоте изгибные волны в пластине сменяются сдвиговыми и продольными колебаниями. Рассмотрев процессы распространения сдвиговых и продольных волн в звукоизолирующей преграде, возможно получить адекватную физическую модель распространения волн на третьем частотном диапазоне, а также скорректировать методику расчёта звукоизоляции воздушного шума. Физическая модель звукоизоляции на третьем частотном диапазоне основана на использовании объектов в средах распространения волн с сосредоточенными параметрами: с координатами, весом и скоростью. Вводятся понятия «сосредоточенной» и «приведённой» масс. Используя закон сохранения количества движения и закон сохранения кинетической энергии, проводится расчётный эксперимент, выводятся формулы для нахождения звукоизоляции на третьем участке стандартного частотного спектра.

**Ключевые слова:** звукоизоляция воздушного шума, приведённая масса, сосредоточенная масса, метод дискретных (сосредоточенных) параметров, продольные волны, сдвиговые волны.

### Введение

Вопросы проектирования звукоизоляции в помещениях гражданских зданий продолжают оставаться актуальными, несмотря на накопленный к настоящему времени достаточно обширный теоретический и экспериментальный материал в области строительной акустики и защиты от внутренних и наружных шумов. Одной из важнейших задач при проектировании комфортного внутреннего акустического режима по-прежнему остаётся задача звукоизоляции помещений от внутреннего воздушного шума. Её решение лежит в предварительных расчётах и выборе физико-технических параметров применяемых конструкций стен, строительных перегородок и перекрытий. Методика расчётов частотной характеристики многослойных и однослойных строительных перегородок разработана и представлена в СП 275.1325800.2016 «Конструкции

ограждающие жилых и общественных зданий. Правила проектирования звукоизоляции». Методика разработана на основе большого массива экспериментальных измерений и теоретических трудов основоположников теории звукоизоляции строительных конструкций, в числе которых - Кремер Л. [1], Заборов В.И. [2], Никольский В.Н.[3], Клюкин И.Н.[4] и некоторые другие учёные. Позднее, теория звукоизоляция строительных перегородок от воздушного шума была дополнена сравнительно современными теоретическими методами, в числе которых можно особо выделить «метод самосогласования звуковых полей» Седова М.С. [5] и последователей его научной школы [6, 7], а также «статистическо-энергетический» метод Овсяникова С.Н. [8, 9].

В упомянутом выше своде правил, стандартный частотный диапазон для однослойных однородных перегородок, в общем случае, звукоизолирующих пластин, условно делится на три участка: до частоты волнового совпадения, после частоты волнового совпадения до точки с ординатой в 65 дБ, и на прямой участок, уходящий вправо, за пределы стандартного спектра. Теоретические основы звукоизоляции на первых двух стандартных диапазонах подробно рассмотрены в исследованиях, приведённых выше. Третий участок стандартной частотной кривой до сих пор не имеет строгого научного объяснения: звукоизоляция принимается равной 65 дБ на основании статистической обработки многочисленных измерений. В данной статье предпринимается попытка рассмотреть теоретические основы вычисления звукоизоляции на условном третьем частотном диапазоне стандартного акустического спектра с использованием дискретных физических моделей звукоизоляции с «сосредоточенными» параметрами [10, 11].

## **1. Влияние сдвиговых волн**

В основу дискретных моделей распространения звука положено представление сред распространения звуковых колебаний в виде объектов, обладающих дискретными, определёнными в конкретный момент времени, параметрами: координатами, скоростью и массой. Выделяется два подобных объекта: «сосредоточенная масса» и «приведённая масса» [10]. Под сосредоточенной массой понимается масса объёма среды, в котором отсутствует волновое движение на данной частоте. Приведённая масса представляет собой объект, в котором происходит волновое движение – это объём среды, ограниченный размером длины волны на заданной частоте и двумя линейными размерами, определяющими пятно контакта (взаимодействия) этого объёма среды со звукоизолирующей преградой [10]. Приведённые массы воздуха и материала строительной перегородки находятся по формулам (1) и (2) соответственно:

$$\mu_a = \frac{\rho_0 \cdot \lambda_0 \cdot a_a \cdot b_a}{2\pi}, \text{ кг}; \quad (1)$$

где  $\rho_0$  - плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda_0$  - длина волны в воздухе на рассматриваемой частоте, м;  $a_a$  - длина фрагмента воздушной среды (луча), м,  $b_a$  - ширина фрагмента воздушной среды, м.

$$\mu_{pl.b.} = \frac{\rho_{pl.} \cdot \lambda_{pl.b.} \cdot h_{pl.} \cdot b_{pl.}}{2\pi}, \text{ кг}; \quad (2)$$

где  $\lambda_{pl.b.}$  - длина изгибной волны в пластине, м;  $\rho_{pl.}$  - плотность материала пластины, кг/м<sup>3</sup>;  $b_{pl.}$  - ширина фрагмента пластины, м;  $h_{pl.}$  - толщина пластины, м.

В работах [10, 12] с использованием законов сохранения количества движения и сохранения кинетической энергии, с учётом условия сохранения неразрывности передачи звуковой энергии через границы сред [13], были получены формулы для построения частотной кривой на первых двух

условных диапазонах акустического спектра. Согласно методу сосредоточенных параметров, они выглядят соответственно, как (3) и (4):

$$R_{M.A.L.1} = 10 \lg \left( 1 + \frac{m}{2\mu_a} \right)^2 - \Delta R_{res.b.} = 10 \lg \left( 1 + \frac{\pi m}{\rho_0 \lambda_0} \right)^2 - \Delta R_{res.b.}, \text{ дБ}; \quad (3)$$

где  $m$  - поверхностная плотность пластины или перегородки,  $\text{кг/м}^2$ ;  
 $\Delta R_{res.b.}$  - поправка на волновые резонансы, дБ.

$$R_{M.A.L.2} = 10 \lg \left( 1 + \frac{\mu_{pl.b.}}{2\mu_a} \right)^2 - \Delta R_{res.b.} = 10 \lg \left( 1 + \frac{m}{2\rho_0 \lambda_0} \right)^2 - \Delta R_{res.b.}, \text{ дБ}; \quad (4)$$

Звукоизоляция на первых двух участках растёт, приблизительно, на 6 дБ на октаву, рис. 1. Но на некоторой частоте рост изоляции прекращается, на графике стандартной частотной кривой появляется прямой участок. Эту закономерность возможно объяснить изменением преобладающего типа волн в звукоизолирующей пластине: на высоких частотах изгибные колебания будут сменяться сдвиговыми и продольными [10].

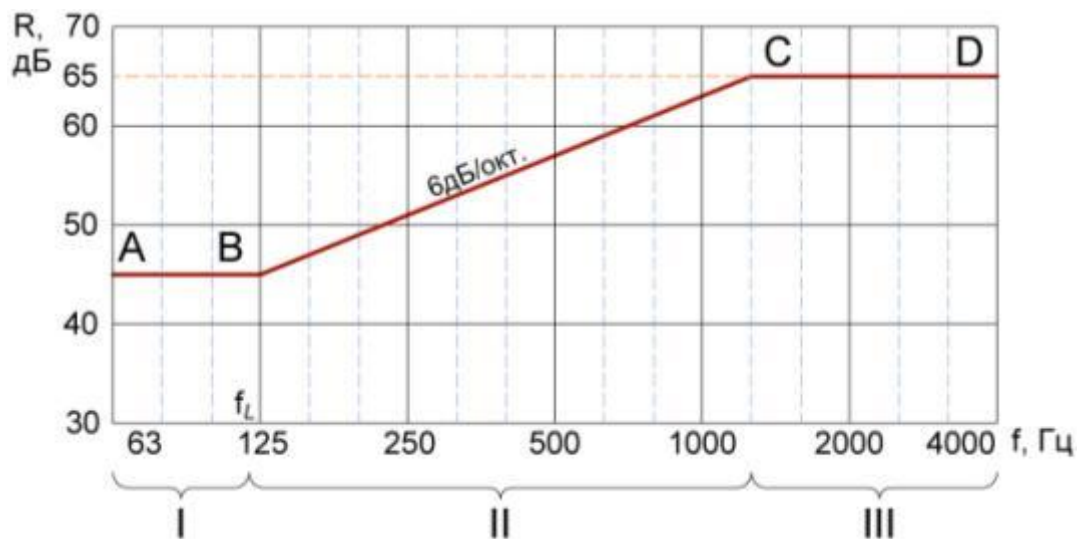


Рис. 1. - Стандартная частотная кривая для массивных однослойных перегородок: показаны три условных частотных диапазона.

Сдвиговые или продольные колебания, обладая скоростью распространения, не зависящей от частоты, будут играть главенствующую роль в передаче звуковой энергии через преграду. Сдвиговые волны совпадают по направлению с изгибными в строительной перегородке, рис. 2.

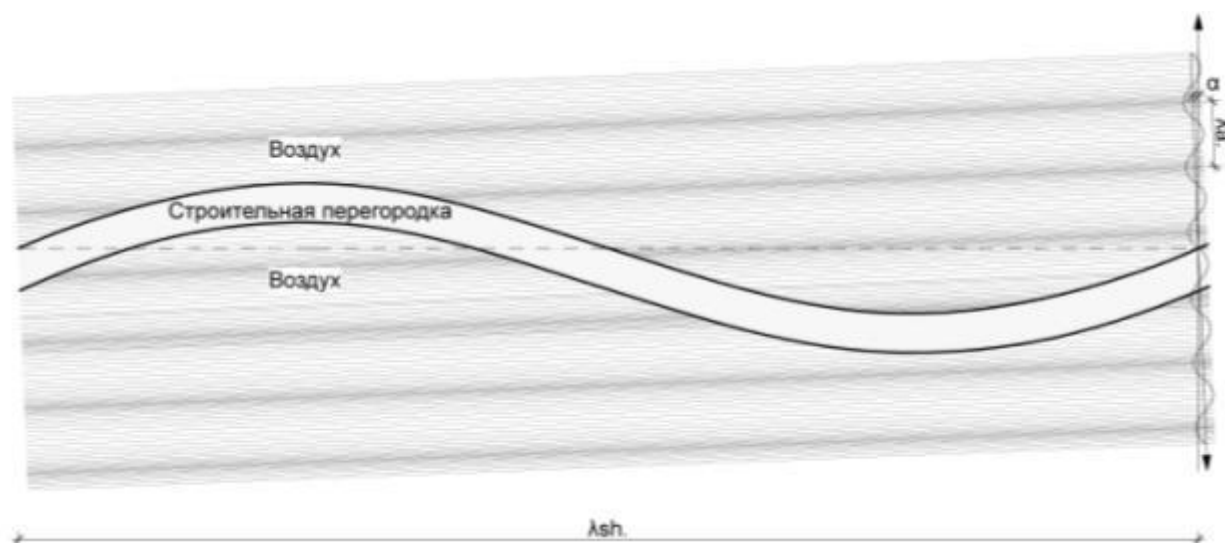


Рис. 2.- Схема падения воздушных волн на однослойную перегородку и образования сдвиговых волн на третьем частотном диапазоне.

В соответствии с основными положениями метода «сосредоточенных параметров» [10, 11], твёрдые объекты в акустических моделях представляют собой сосредоточенные массы, а с так называемой «предельной частоты» являются средой распространения механических волн, условие (5).

$$f_{ult.} = \frac{c}{2\pi L}, \text{ Гц}; \quad (5)$$

где  $L$  - размер тела, вдоль которого распространяется волна, м;  $c$  - скорость распространения в теле рассматриваемого вида волн, м/с.

То есть волновое движение возникает в звукоизолирующей пластине начиная с частоты, когда размер пластины, вдоль которого распространяется волна того или иного типа, больше, чем  $1/2\pi$  длины волны [12].

Предельная частота,  $f_{sh.ult.1}$ , начиная с которой в строительной перегородке будут появляться сдвиговые волны по её высоте, находится из условия (5) с учётом скорости распространения сдвиговых волн (6):

$$c_{sh.} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}, \text{ м/с}; \quad (6)$$

где  $E$  – модуль упругости материала, Н/м<sup>2</sup>;  $\nu$  – коэффициент Пуассона.

Преобладающее влияние на прохождение звуковой энергии через пластину, сдвиговые волны будут оказывать при исчезновении изгибных колебаний. Приравняв скорость распространения изгибных волн (7) и скорость распространения сдвиговых волн (6), можно получить начальную частоту преобладающего влияния волн сдвига на третьем участке частотного спектра,  $f_{sh.2}$ , формула (9).

$$c_b = \sqrt{1,8 \cdot c_l \cdot h_{pl} \cdot f}, \text{ м/с}; \quad (7)$$

где  $c_l$  – скорость распространения продольных волн в материале пластины, м/с, находится по формуле (8):

$$c_l = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}}, \text{ м/с}; \quad (8)$$

$$f_{sh.2} \geq \frac{E}{3,6 \cdot \rho \cdot c_l \cdot h_{pl} \cdot (1+\nu)}, \text{ Гц}; \quad (9)$$

В соответствии с определением звукоизоляции [2] и положениями рассматриваемого метода, минимальное значение звукоизоляции с учётом сдвиговых волн будет возникать при падении продольных воздушных волн под углами, близкими к нормальным, рис. 2. По аналогии с изгибными волнами на втором частотном диапазоне, формула (4), на приведённую массу строительной перегородки с двух сторон действуют две приведённых массы воздуха, формула (10). Косинус угла падения  $\alpha$  в знаменателе равен 1 и может не учитываться.

$$R_{pl.sh.} = 10 \lg \left( 1 + \frac{\mu'_{pl.sh.}}{2\mu_a \cdot \cos \alpha} \right)^2, \text{ дБ}; \quad (10)$$

где  $\mu'_{pl.sh.}$  – приведённая масса перегородки с учётом волн сдвига, кг;  $\alpha$  – угол падения воздушной волны на пластину.

Как показывает практика, третий диапазон начинается на частотах ниже условия (9), что делает вероятным обусловленность прямого участка

графика влиянием продольных волн поперёк сечения строительной перегородки.

## 2. Влияние продольных волн

Продольные волны в стандартном частотном диапазоне возникают с частоты  $f_{l,ult.}$ , определяемой по формуле (5) с использованием выражения (8).

Представляет интерес модель распространения продольных механических волн по толщине пластины. При нормальном падении звука на пластину, дающем минимальное значение звукоизоляции, модель прохождения продольных волн через пластину будет выглядеть как упругое взаимодействие приведённых масс воздуха и пластины на границах двух сред, описываемое (для одной границы) уравнением закона сохранения количества движения (11) и уравнением сохранения кинетической энергии (12):

$$\mu_a \cdot v = \mu_a \cdot v \cdot \beta + \mu_{pl.l.} \cdot v \cdot \alpha; \quad (11)$$

$$\frac{\mu_a v^2}{2} = \frac{\mu_a \cdot (\beta v)^2}{2} + \frac{\mu_{pl.l.} (\alpha v)^2}{2}; \quad (12)$$

где  $v$  – единичная скорость колебаний в падающей волне, м/с,  $\mu_a$  – приведенная масса первой среды, кг/м<sup>2</sup>,  $\mu_{pl.l.}$  – приведённая масса второй среды, кг/м<sup>2</sup>;  $\alpha$  и  $\beta$  – соответственно коэффициенты прохождения и отражения колебательной скорости.

Совместное решение двух данных уравнений позволяет получить коэффициент прохождения колебательной скорости:

$$\alpha = \frac{2\mu_a}{\mu_a + \mu_{pl.l.}}. \quad (13)$$

Должна быть посчитана суммарная звукоизоляция на границах двух сред: воздух-пластина и пластина-воздух, рис. 3.

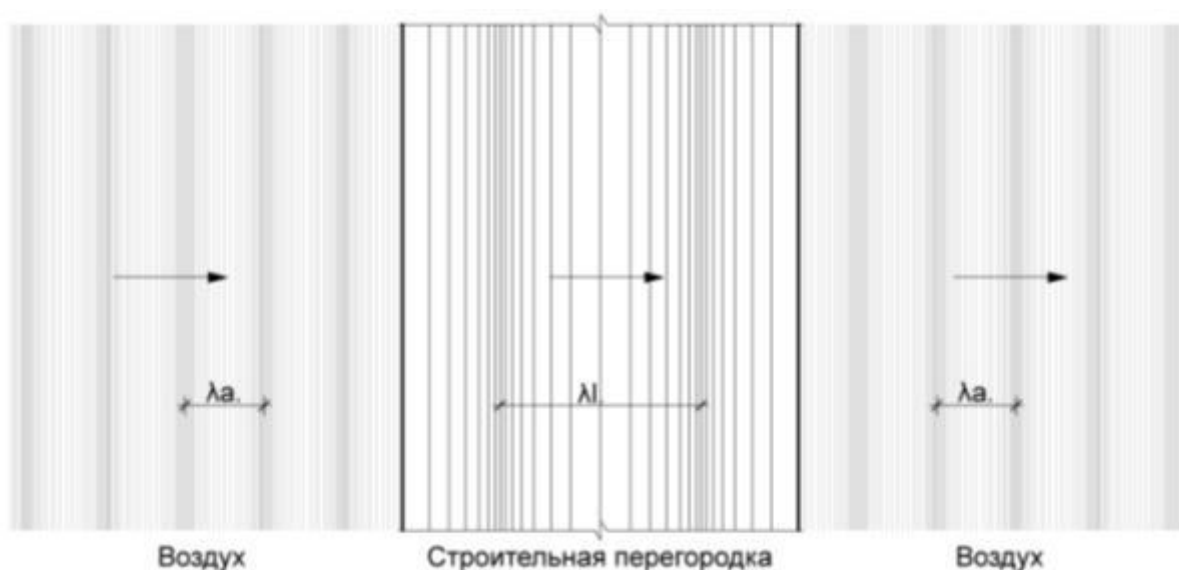


Рис. 3. - Схема нормального падения воздушных волн на однослойную перегородку и образования продольных волн на третьем частотном диапазоне.

Тогда, с учётом физического определения звукоизоляции [2], можно записать:

$$R_l = 10 \lg \frac{1}{\alpha_1^2} + 10 \lg \frac{1}{\alpha_2^2} = 10 \lg \left( \frac{\mu_a + \mu_{pl.l.}}{2\mu_a} \right)^2 + 10 \lg \left( \frac{\mu_{pl.l.} + \mu_a}{2\mu_{pl.l.}} \right)^2, \text{ дБ}; \quad (14)$$

где  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  - коэффициенты прохождения колебательных скоростей на первой и на второй границе сред, соответственно.

После упрощения выражение (14) принимает вид (15):

$$R_l = 2 \cdot 10 \lg \frac{(\mu_{pl.l.} + \mu_a)}{4\mu_a \mu_{pl.l.}}, \quad (15)$$

В большинстве случаев  $\mu_{pl.l.}$  значительно больше  $\mu_a$ , поэтому, справедлива формула (16):

$$R_l = 20 \lg \frac{\mu_{pl.l.}}{4\mu_a} = 20 \lg \frac{\rho c_l}{4\rho_0 c_0}, \text{ дБ}; \quad (16)$$



где  $\rho$  - плотность материала перегородки,  $\text{кг/м}^3$ ;  $c_l$  - скорость распространения продольных волн в материале,  $\text{м/с}$ , по формуле (8).

Также по толщине строительной перегородки будут происходить отражения волн от поверхностей и сложение этих отражений с вновь образующимися волнами. То есть, будут возникать резонансные явления. Для вычисления поправки на резонансы по формуле (17) необходимо вычислить коэффициенты отражения колебательных скоростей  $\beta_l$  с учётом способа закрепления строительных перегородок.

$$\Delta R_{res.l.} = -20 \lg \frac{1}{(1 - \beta_l)}, \text{ дБ}; \quad (17)$$

В большинстве случаев, используется крестообразное соединение стен или перегородок с перекрытиями в реальных зданиях: продольные волны в перегородках вызывают сдвиговые волны в перекрытиях, рис. 4. По аналогии с вычислением резонансов в статье [14], коэффициенты отражения вычисляются по формуле (18):

$$\beta_{l,1} = \beta_{l,2} = \frac{-2\mu_{sl.sh.}}{\mu_{pl.l.} + \mu_{sl.l.} + \mu_{pl.sh.} + \mu_{sl.sh.}}, \quad (18)$$

$\mu_{pl.l.}$  - приведённая масса перегородки с учётом продольных волн в ней и её толщины,  $\text{кг}$ ;  $\mu_{sl.sh.}$  - приведённая масса плиты перекрытия с учётом сдвиговых волн в ней и её толщины,  $\text{кг}$ ;  $\mu_{pl.sh.}$  - приведённая масса перегородки с учётом сдвиговых волн в ней и её толщины,  $\text{кг}$ ;  $\mu_{sl.l.}$  - приведённая масса плиты перекрытия с учётом продольных волн в ней и её толщины,  $\text{кг}$ .

В результате, формула для нахождения звукоизоляции на третьем частотном диапазоне будет выглядеть, как (19):

$$R_l^{tot.} = R_l + \Delta R_{res.l.}, \text{ дБ} \quad (19)$$

Следует отметить, что так как в крестовых соединениях конструкции стен и перекрытий из лёгких и тяжёлых бетонов работают под нагрузкой, целесообразно учитывать свойства ползучести бетонов и определять пониженный модуль упругости по формуле (20). Меньший модуль упругости обуславливает меньшую скорость продольных волн по формуле (8), а значит, и уменьшает значение приведённой массы звукоизолирующей преграды,  $\mu_{p.l.l.}$ , понижая значение звукоизоляции по формуле (16).

$$E_{b,\tau} = \frac{E_b}{1 + \varphi_{b.cr.}}, \text{ Н/м}^2 \quad (20)$$

где  $E_b$  – начальный модуль упругости для рассматриваемого вида бетона,  $\text{Н/м}^2$ ;  $\varphi_{b.cr.}$  – коэффициент ползучести бетона, принимаемый, согласно СП.

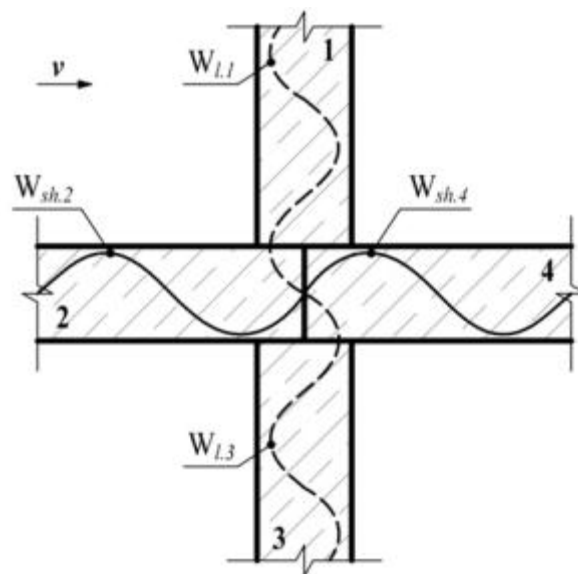


Рисунок 4. Схема прохождения звуковых волн через крестообразное шарнирное соединение для третьего частотного диапазона:  $W_{sh.1}$ ,  $W_{sh.2}$ ,  $W_{sh.3}$  и  $W_{sh.4}$  – изгибных волн в первой – четвёртой вертикальных панелях;  $W_{l.1}$ ,  $W_{l.2}$ ,  $W_{l.3}$  и  $W_{l.4}$  – продольных волн в первой – четвёртой горизонтальных панелях (перекрытиях);  $v$  – единичная скорость звука в направлении падения воздушных волн на перегородку.

### 3. Расчётный эксперимент

В целях проверки представленных выше положений, целесообразно провести расчётный эксперимент. Построим частотную кривую для стен из тяжёлого бетона, толщиной 200, 300 и 400 мм, с перекрытиями, выполненными также из железобетона, толщиной 200 мм. Плотность бетона -  $2400 \text{ кг/м}^3$ , модуль упругости -  $2,98 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$ , коэффициент Пуассона - 0,2. Результаты вычисления для стены толщиной 200 мм представлены в таблице №1.

На рис. 5 показаны графики скоростей изгибных, сдвиговых и продольных волн для четырёх бетонных перегородок различной толщины; также показан график скорости продольных волн в воздухе. Скорости сдвиговых и продольных волн представляют собой прямые линии, так как не зависят от частоты. Скорость изгибных волн растёт с частотой до пересечения с прямой сдвиговых волн на частоте  $f_{sh.2}$  (для перегородки соответствующей толщины). Пересечение графика скорости звука в воздухе и графика скорости изгибных волн даёт частоту волнового совпадения (граничную частоту)  $f_L$ . Частоты  $f_{l.ult.}$  и  $f_{sh.ult.1}$  являются началом проявления продольных и сдвиговых колебаний. Из рисунка 5 следует, что сдвиговые волны в железобетонных перегородках будут оказывать преобладающее влияние на звукоизоляцию на третьем частотном диапазоне по условию (9) начиная с частот, больших, чем частоты появления продольных колебаний. Однако, при практическом построении частотной кривой, третий частотный диапазон возникает уже после значения изоляции, вычисленной из условия возникновения сдвиговых волн (9), рис. 6-9. То есть, при практических вычислениях звукоизоляции целесообразнее учитывать только продольные колебания.

Важно также отметить, что представленная для сравнения частотная кривая 1, построенная по СП на рис. 6-9, даёт отличные значения

звукоизоляции на третьем частотном диапазоне. Используя формулу (20), учитывающую изменение модуля упругости за счёт ползучести бетона ( $E_{b,\tau} = 8,51 \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2$ ;  $\varphi_{b.cr.} = 2,5$ ), можно получить отрезок 3, практически совпадающий с кривой СП.

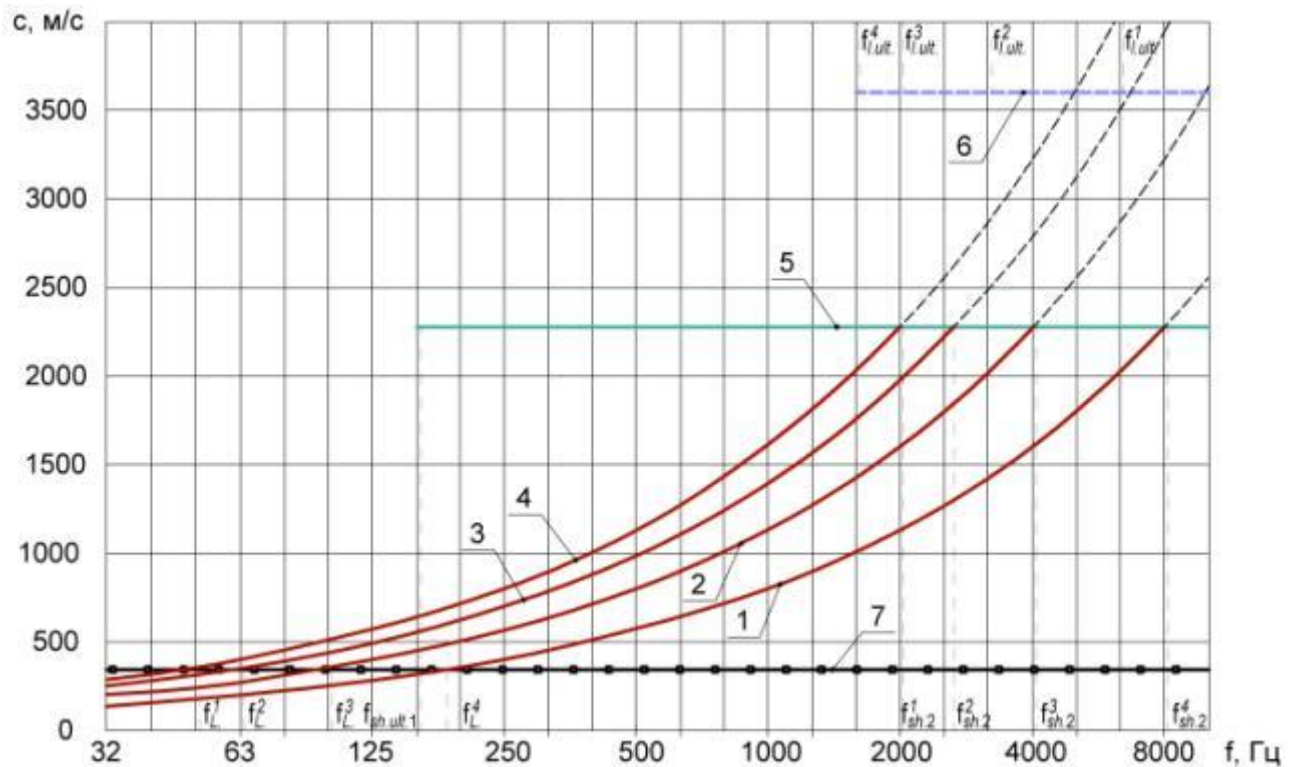


Рис. 5. - Графики скоростей распространения колебаний: 1, 2, 3, 4 -изгибных в строительных перегородках толщиной 100, 200, 300 и 400 мм соответственно; 5 – сдвиговых; 6 – продольных; 7 – продольных в воздухе.

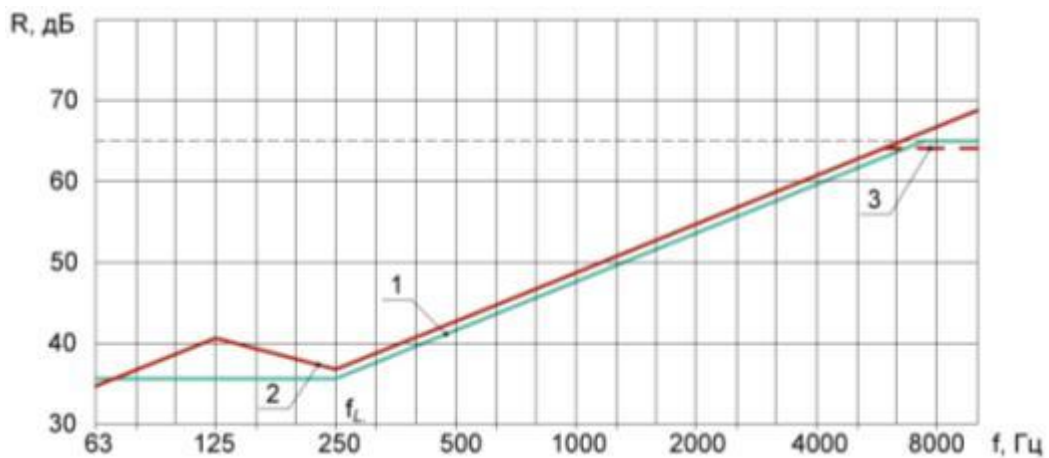


Рис. 6. - Частотные кривые звукоизоляции для строительной перегородки из тяжёлого бетона, толщиной 100 мм: 1 – полученная по методу СП; 2 – построенная по рассматриваемому методу; 3 – построенная по рассматриваемому методу с учётом изменения модуля упругости на высоких частотах за счёт ползучести бетона.

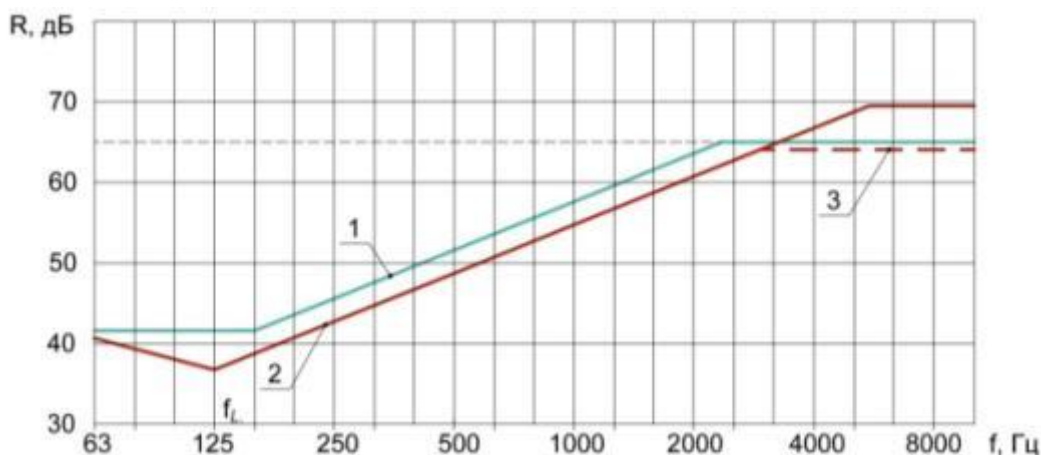


Рис. 7. - Частотные кривые звукоизоляции для строительной перегородки из тяжёлого бетона, толщиной 200 мм: 1 – полученная по методу СП; 2 – построенная по рассматриваемому методу; 3 – построенная по рассматриваемому методу с учётом изменения модуля упругости на высоких частотах за счёт ползучести бетона.

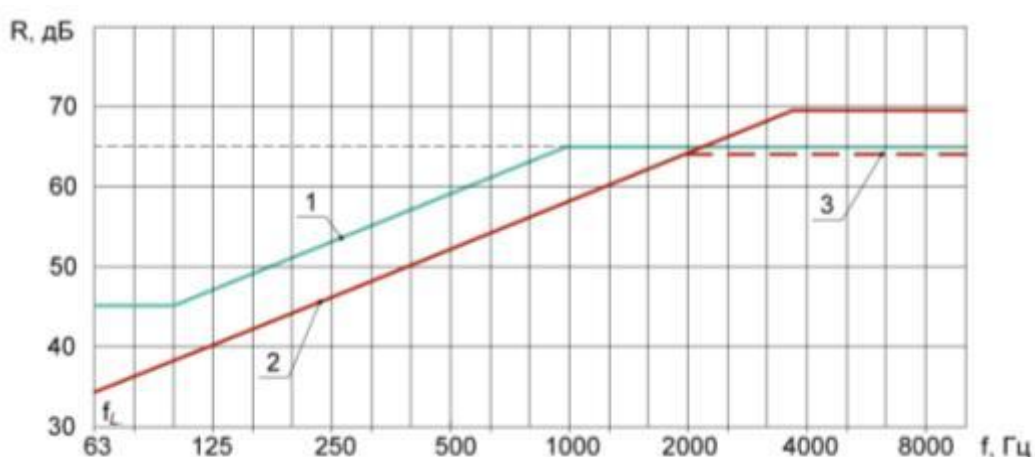


Рис. 8. - Частотные кривые звукоизоляции для строительной перегородки из тяжёлого бетона, толщиной 300 мм: 1 – полученная по методу СП; 2 – построенная по рассматриваемому методу; 3 – построенная по

рассматриваемому методу с учётом изменения модуля упругости на высоких частотах за счёт ползучести бетона.

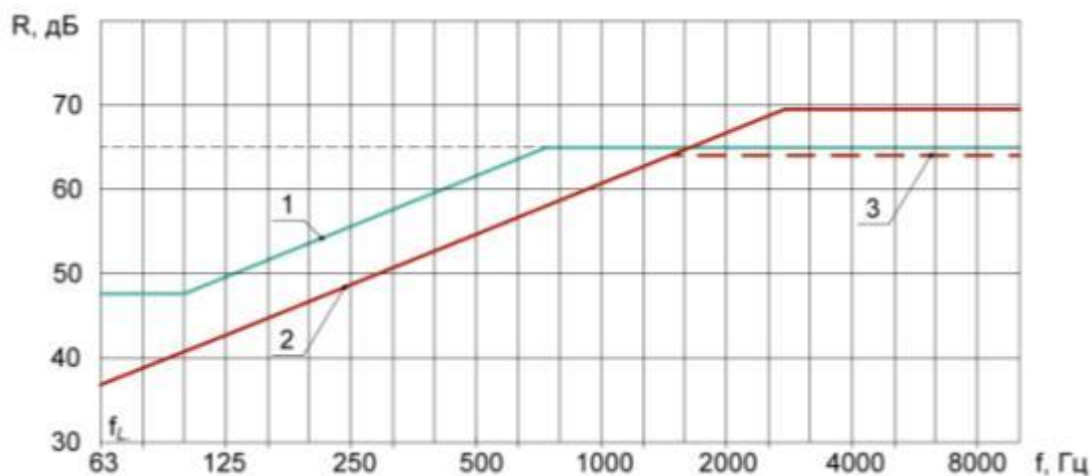


Рис. 9. - Частотные кривые звукоизоляции для строительной перегородки из тяжёлого бетона, толщиной 400 мм: 1 – полученная по методу СП; 2 – построенная по рассматриваемому методу; 3 – построенная по рассматриваемому методу с учётом изменения модуля упругости на высоких частотах за счёт ползучести бетона.

Таким образом, в соответствии с проведёнными исследованиями, в практических расчётах на третьем частотном диапазоне целесообразнее рассматривать продольные волны с учётом изменённого значения модуля упругости бетона. На рисунках 10 и 11 показаны расчётные кривые для реальных конструкций перегородок [3] в сравнении с экспериментом.

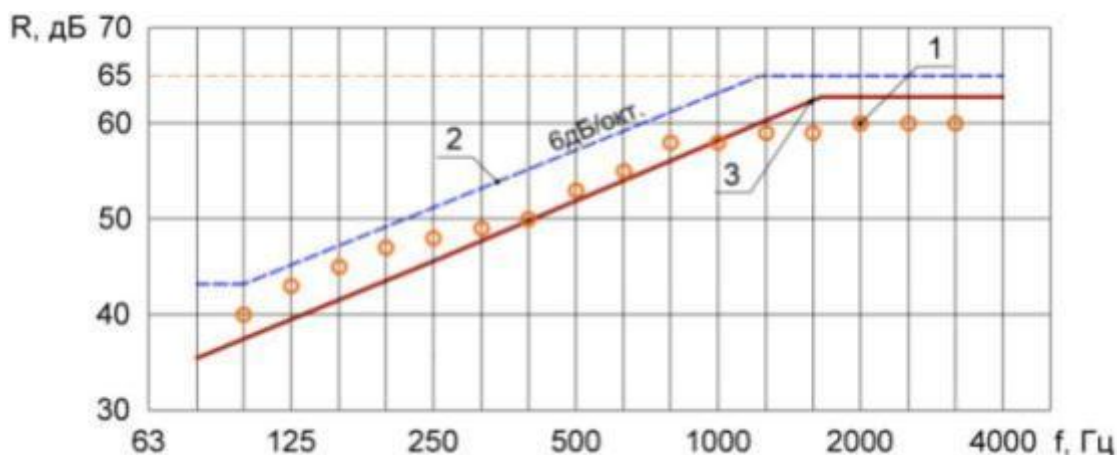


Рис. 10. - Кривые звукоизоляции для стены из силикатных блоков,  $h=400$  мм: 1 - результаты натурных измерений; 2 – кривая, построенная по методике СП; 3 - кривая по рассматриваемому методу.

Таблица №1.

Расчёт звукоизоляции железобетонной перегородки, толщиной 200 мм.

Название расчётного параметра	Величины расчётных параметров							
Поверхностная плотность, $m$ , кг/м <sup>2</sup>	480							
Скорость продольных волн, $c_l$ , м/с	3596							
Граничная частота, $f_L$ , Гц	112 $\approx$ 125							
Скорость сдвиговых волн, $c_{sh}$ , м/с	2275							
Частота, Гц	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Скорость изгибных волн, $c_b$ , м/с	285	402	569	805	1138	1609	2276	3218
Звукоизоляция изгибных волн, $R_b$ , дБ	40,7	36,8	42,7	48,7	54,7	60,7	66,7	-
Приведённая масса воздуха, $\mu_a$ , кг	40,3	10,24	2,56	0,64	0,16	0,04	0,01	0,00
Приведённая масса перегородки, сдвиговые волны, $\mu_{pl.sh}$ , кг	-	-	-	-	-	-	43,4	21,7
Звукоизоляция сдвиговых волн, $R_{pl.sh}$ , дБ	-	-	-	-	-	-	66,7	72,7
Предельная частота возникновения продольных волн, $f_{ult.l}$ , Гц	2862							
Приведённая масса перегородки, продольные волны, $\mu_{pl.l}$ , кг	872,20	439,6	219,8	109,9	54,95	27,5	13,7	6,9
Приведённая масса перекрытия, продольные волны, $\mu_{sl.l}$ , кг	872,2	439,6	219,8	109,9	54,95	27,5	13,7	6,9
Приведённая масса перегородки, сдвиговые волны, $\mu_{pl.sh}$ , кг	551,6	278,0	139,0	69,5	34,8	17,4	8,7	4,3
Приведённая масса перекрытия, сдвиговые волны, $\mu_{sl.sh}$ , кг	551,6	278,0	139,0	69,5	34,8	17,4	8,7	4,3
Коэффициент отражения, продольные колебания, $\beta_l$	-	-	-	-	-	-	-0,39	-0,39

Снижение звукоизоляции на резонансах, $R_{res.l.}$ , дБ	-	-	-	-	-	-	4,26	4,26
Звукоизоляция, продольные волны, $R_l$ , дБ	-	-	-	-	-	-	73,77	73,77
Итоговое значение звукоизоляции, $R_{tot.l.}$ , дБ	-	-	-	-	-	-	69,52	69,52

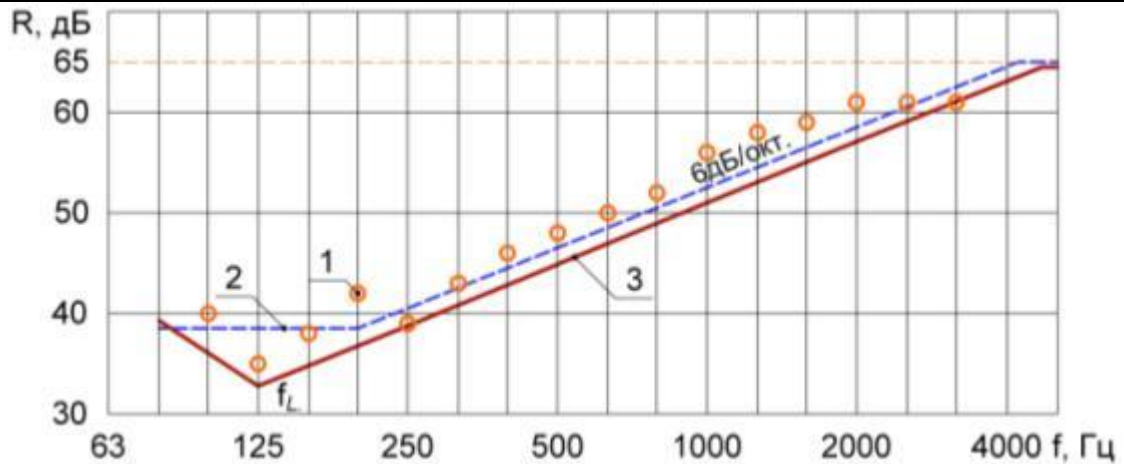


Рис. 11. - Кривые звукоизоляции для сплошной железобетонной панели,  $h = 140$  мм: 1 - результаты натуральных измерений; 2 – кривая, построенная по методике СП; 3 - кривая по рассматриваемому методу.

### Выводы

В соответствии с приведённым в статье материалом, можно сделать следующие выводы:

1. На третьем частотном диапазоне на звукоизоляцию преимущественное влияние оказывают не изгибные, а сдвиговые и продольные волны в перегородке.
2. Сдвиговые волны, как правило, начинают появляться на более высоких частотах на графике, чем продольные. Следовательно, при выполнении расчётов для каменных материалов, подобных бетону, в расчёте можно учитывать только продольные волны по толщине перегородки.
3. При вычислении звукоизоляции необходимо учитывать волновые резонансы, вычисление поправки на которые возможно при нахождении



коэффициентов отражения в крестообразных соединениях стен и перекрытий.

Представленная в статье физическая модель для вычисления звукоизоляции на третьем частотном диапазоне стандартного акустического спектра позволяет выполнять построение частотной кривой для массивных однослойных строительных перегородок. Точность и уточнение отдельных моментов данной модели требует дальнейших исследований.

### Литература

1. Cremer L. Die wissen schaftlichen Grundlagen der Raumakustik. Band III. Wellentheorie Raumakustik. Leipzig. 1950. 355 с.
2. Заборов В.И. Теория звукоизоляции ограждающих конструкций. М.: Изд. лит. по строит., 1969. 186 с.
3. Заборов В.И, Лалаев Э.М., Никольский В.Н. Звукоизоляция в жилых и общественных зданиях. М.: Стройиздат, 1979. 254 с.
4. Клюкин И.Н. Борьба с шумом и звуковой вибрацией на судах. Л.: Судостроение, 1971. 416 с.
5. Седов М.С. Звукоизоляция / Справочник «Техническая акустика транспортных машин»: Под ред. д-ра техн. наук профессора Н. И. Иванова. – СПб: Политехника, 1992. Глава 4. С.68–106.
6. Bobulyov V.N., Tishkov V.A., Monich D.V., Dymchenko V.V., Grebnev P.A. Experimental study of sound insulation in multilayer building partitions. // Noise Control Engineering Journal. 2014. Т. 62. № 5. pp. 354-359.
7. Бобылев В.Н., Монич Д.В., Тишков В.А., Гребнев П.А. Резервы повышения звукоизоляции однослойных ограждающих конструкций. Монография. Нижний Новгород, 2014. 118 с.
8. Овсянников С.Н. Развитие теории статистического энергетического анализа для расчета звукоизоляции в гражданских зданиях // Вестник ТГАСУ, № 1, Томск, Изд-во Томского ГАСУ. – 2000. – С. 72-83.

9. Ovsyannikov, S.N., Leliuga, O.V., Gradov, V.A. Calculation Model of Sound and Vibration Propagation in a Building Fragment Based on the Method of Statistical Energy Analysis // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020. №753(4). URL: [iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/753/4/042006](https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/753/4/042006) (Дата обращения: 07.03.22).

10. Захаров А.В. Дискретные модели прохождения волн при расчетах звукоизоляции в зданиях // Промышленное и гражданское строительство. 2012. № 11. С. 50-54.

11. Zakharov Arkadiy. Discrete models upon calculation of soundproofing by solid // International Journal of Pure and Applied Mathematics. 2018. Vol. 119. No. 10. (2108). Pp. 439-443. URL: [acadpubl.eu/jsi/2018-119-10/articles/10c/54.pdf](https://acadpubl.eu/jsi/2018-119-10/articles/10c/54.pdf) (Дата обращения: 07.03.22).

12. Захаров А.В. Обеспечение условий неразрывности при косом прохождении звука через массивную пластину.// Инновации и инвестиции. 2018. №12. С. 163-166.

13. Волощенко А.П., Тарасов С.П. Исследование неоднородных волн вблизи границ раздела сред // Инженерный вестник Дона. 2013. №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1652](https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1652) (Дата обращения: 07.03.22).

14. Zakharov A.V., Saltykov I.P. 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. J. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2021. №1079. URL: [iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1079/3/032068](https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1079/3/032068) (Дата обращения: 07.03.22).

### References

1. Cremer L. Die wissen schaftlichen Grundlagen der Raumakustik. Band III. Wellentheorie Raumakustik. Leipzig. 1950. P.355.

2. Zaborov V.I. Teoriya zvukoizol'atsyi ograzhdayustchikh konstruktsyy [The Theory of Sound Insulation of Enclosing Structures]. Moskva: Construction Literature Publishing, 1969; p.186.

3. Zaborov V.I., Lalayev A.M. and Nikol'skiy V.N. Zvukoizol'atsyya v zhilykh i obshchestvennykh zdaniyakh [Sound insulation in residential and public buildings]. Moskva: Stroyizdat Publishing, 1979. P.254.

4. Kl'ukin I.N. Bor'ba s shumom i zvukovoy vebratsiyey na sudakh. [The Noise and Sound Vibration Abatement on the Ships]. Leningrad: Sudostroyeniye Publishing, 1971. p. 416.

5. Sedov M.S. Zvukoizol'atsyya. Spravochnik "Tekhnicheskaya acustika transportnykh mashin" [Sound insulation. Handbook "Technical acoustics of transport vehicles"]: Edited by Dr. of Technical Sciences, Professor N. I. Ivanov. St. Petersburg: Polytechnic, 1992. Chapter 4. Pp.68-106.

6. Bobylyov V.N., Tishkov V.A., Monich D.V., Dymchenko V.V., Grebnev P.A. Noise Control Engineering Journal. 2014. V. 62. № 5. pp. 354-359.

7. Bobylyov V.N., Tishkov V.A., Monich D.V., Grebnev P.A. Rezervy povysheniya zvukoizol'atsyi odnosloynnykh ograzhdayutchikh konstruktsiy [Reserves for increasing the sound insulation of single-layer enclosing structures]. Monographia. Nizhniy Novgorod: 2014. 118 p.

8. Ovsyannikov, S.N. Vestnik TGASU. №1, 2000. pp. 72-83.

9. Ovsyannikov, S.N., Leliuga, O.V., Gradov, V.A. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. №753 (4). URL: [iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/753/4/042006](http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/753/4/042006) (Date accessed: 07.03.22).

10. Zakharov A.V. Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo. 2012. №11. pp. 50-54.



11. Zakharov Arkadiy. International Journal of Pure and Applied Mathematics. 2018. Vol. 119. No. 10. pp. 439-443. URL: [acadpubl.eu/jsi/2018-119-10/articles/10c/54.pdf](http://acadpubl.eu/jsi/2018-119-10/articles/10c/54.pdf) (Date accessed: 07.03.22).
12. Zakharov A.V. Innovacii i investicii. 2018. №12. pp. 163-166.
13. Voloshchenko A.P., Tarasov S.P. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013, №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1652](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1652) (Date accessed: 07.03.22).
14. Zakharov A.V., Saltykov I.P. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. №1079. URL: [iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1079/3/032068](http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1079/3/032068) (Date accessed: 07.03.22).