

УДК 534.23
OECD 01.03.AA

Об уровнях псевдозвуковых давлений вблизи озвучиваемой пластины

Кирпичников В.Ю.¹, Дроздова Л.Ф.^{2*}, Шашурин А.Е.³, Яковлева Е.В.⁴

¹ Профессор кафедры «Экология и безопасность жизнедеятельности», д.т.н.,

² Профессор кафедры «Экология и безопасность жизнедеятельности», к.т.н.,

³ Доцент кафедры «Экология и безопасность жизнедеятельности», к.т.н.,

⁴ Инженер Федерального государственного унитарного предприятия

^{1, 2, 3} БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург,

⁴ ФГУП «Крыловский государственный научный центр», г. Санкт-Петербург

Аннотация

Целью настоящего исследования является сравнение уровней псевдозвуковых давлений вблизи резонирующих пластин озвучиваемых конструкций с уровнями давления озвучиваемой пластину волны. Выполнен теоретический анализ уровней псевдозвуковых давлений вблизи резонирующих пластин в зависимости от среды. Приведены результаты расчётов. Получено, что уровни псевдозвуковых давлений на поверхности и вблизи резонирующих пластин различных конструкций могут превышать уровни давления в падающих на них звуковых волнах.

Ключевые слова: звуковая волна, резонирующая пластина, уровень давления, псевдозвуковое давление, шумовое поле.

Psevdovukovyh pressure levels near resonant plate

V. Kirpichnikov¹, L. Drozdova², A. Shashurin³, E. Yakovleva⁴

¹Professor of Environment and Safety chair, DSc

²Professor of Environment and Safety chair, PhD

³Assistant Professor of Environment and Safety chair, PhD

⁴Engineer

^{1,2,3} Baltic State Technical University 'VOENMEH' named after D.F. Ustinov

⁴ Federal state unitary enterprise 'Central Scientific-Research Institute named after akad. Krylov'

Abstract

The purpose of this study is to compare the levels of psevdovukovyh pressures near resonant plates with pressure levels of sound waves which incident on plate. Theoretical analysis of psevdovukovyh levels implemented pressures resonating plates depending on the medium. The results of the calculations are presented. It is obtained that the levels of psevdovukovyh pressure at the surface and near the resonant plates of various designs may exceed the pressure levels in incident on them sound waves.

Keywords: sound waves, resonant plate, level pressure, psevdovukovoe pressure, noise field.

Введение

Известно, что ближнее шумовое поле конструкций при их изгибных колебаниях на частотах, меньших частоты совпадения (далее – критическая частота), формируют два принципиально различных типа волн – звуковые и псевдозвуковые [1].

Возникновение первых связано со сжатием–разряжением частиц окружающей конструкцию сред, а вторых – с их перетеканием из зон с повышенным давлением вблизи колеблющейся конструкции в зоны с пониженным давлением.

*E-mail: drozdovalf@yandex.ru (Дроздова Л.Ф.)

Рассмотрим формирование ближнего шумового поля конструкции на примере взаимодействия со средой изгибно-колеблющейся пластины. На рисунке 1 приведена схема взаимодействия со средой бесконечной и конечной пластины в жёстком экране.

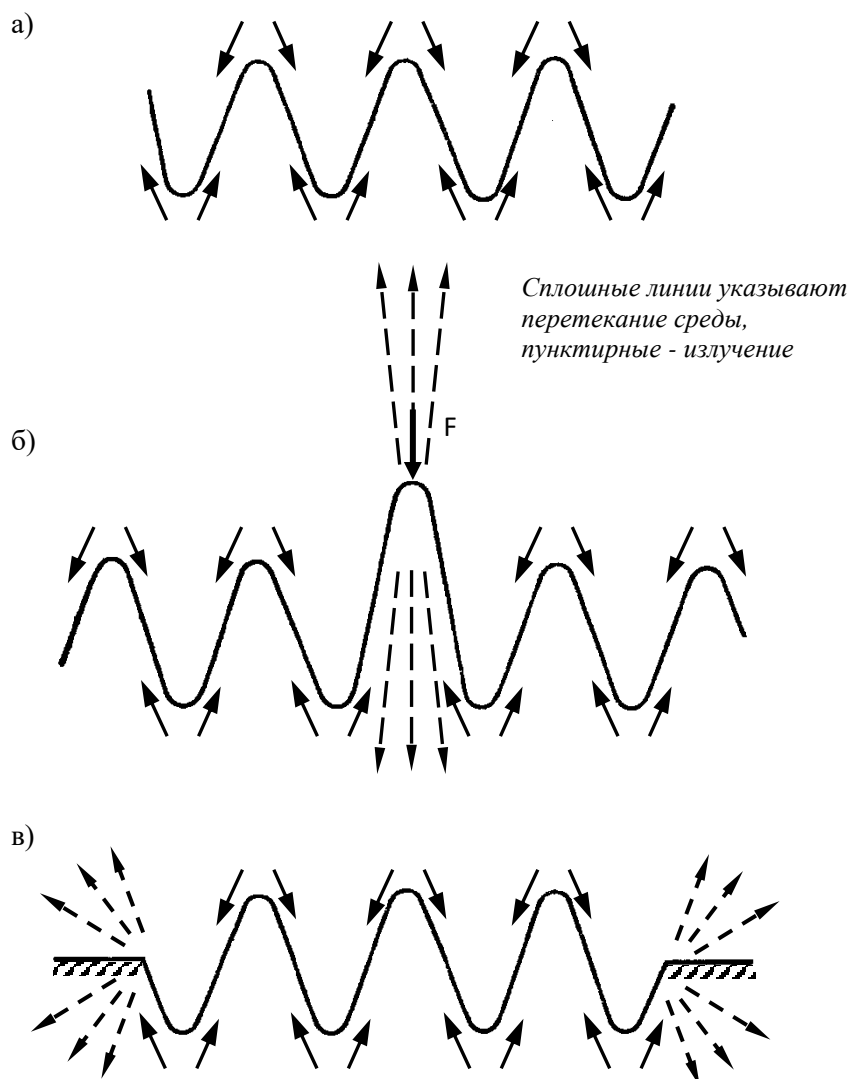


Рис. 1. Схема взаимодействия со средой изгибно-колеблющейся пластины:
а) бесконечная пластина, по которой распространяется изгибная волна
б) бесконечная пластина, возбуждаемая сосредоточенной силой
в) конечная пластина в жёстком экране

В прилегающей к каждой поверхности колеблющейся конструкции области шумового поля уровни, создаваемого ею звукового давления на докритических частотах малы, и ими можно пренебрегать по сравнению с уровнями псевдозвуковых давлений. Соответствующую область называют ближней или, подразумевая малую роль звуковых давлений, неволновой. Второе название не является точным, так как именно волновые процессы и формируют ближнюю область шумового поля конструкции. Под шумовым в данной области подразумевается не звуковое поле, а фиксируемое микрофоном или гидрофоном наличие переменных во времени, псевдозвуковых, давлений, которые создают движущиеся вблизи поверхности конструкции частицы граничащей с ней среды.

Особенности движения этих частиц вблизи изгибно колеблющейся пластины рассмотрены в работе [2]. Исследовано, в частности, влияние вязкости акустической среды на нормальную к поверхности и касательную компоненты скорости. Установлено, что вязкость нарушает равенство амплитудных значений компонент скорости, имеющее место при колебаниях идеальной (невязкой) среды, и способствует, таким образом, перераспределению энергии среды между этими компонентами. Кроме того, она изменяет сдвиг фазы между компонентами от постоянного для всего поля скоростей значения $\pi/2$ в идеальной среде. Величина сдвига фазы определяется расстоянием z от колеблющейся пластины.

Анализ поля скоростей показал, что влияние вязкости воды и воздуха на уровень возникающего в них переменного давления p пренебрежимо мало на большей части полупространства $z \geq 0$. Оно проявляется лишь в очень тонком слое, находящемся непосредственно у пластины, толщина которого $z \approx \pi/2\alpha$ ($\alpha = \sqrt{\frac{\omega}{2\nu}}$, где $\omega = 2\pi f$ – круговая частота колебаний, а ν – кинематическая вязкость среды) при её колебаниях с частотами 10 и 100 Гц не превосходит ~ 1 и $\sim 0,1$ мм, соответственно. (Толщина этого слоя определяется частотой колебания, коэффициентом кинематической вязкости среды и не зависит от материала, толщины пластины и амплитуды бегущей по ней изгибной волны).

Был сделан вывод, что уровни псевдозвуковых давлений p_{nc} определяются прежде всего амплитудой и длиной изгибной волны λ_u в пластине, а также плотностью акустической среды ρ . Расчёты этих уровней вблизи бесконечной однородной пластины, по которой в положительном направлении оси x распространяется незатухающая изгибная волна в форме $v(x, t) = v_0 e^{i(k_u x - \omega t)}$ (v_0 – амплитуда смещения; k_u – волновое число изгибных колебаний, $2\pi/\lambda_u$; x и t – пространственная и временная координаты; множитель $e^{i(k_u x - \omega t)}$ в дальнейшем опускаем) производят с использованием выражения

$$p_{nc} = \frac{\rho_a \ddot{v}_0}{k_u} e^{-zk_u}, \quad (1)$$

где \ddot{v}_0 – амплитуда виброускорения пластины; z – расстояние от пластины, рассматриваемая поверхность которой находится в плоскости $z = 0$; отношение $\frac{\rho_a}{k_u}$ характеризует присоединённую массу акустической среды, участвующую в колебательном процессе.

Определённый интерес для практики представляет соотношение уровней псевдозвуковых давлений вблизи озвучиваемой конечной конструкции и уровня звукового давления падающей волны, которая вызывает колебания конструкции, следовательно, и создаваемые ими псевдозвуковые давления.

Из физических соображений понятно, что наибольшие уровни p_{nc} возникают вблизи тех участков конструкции, которые имеют наибольший вибрационный отклик на действующее усилие. Такими участками подкреплённой пластинчатой конструкции, широко используемой для изготовления корпусов транспортных средств, являются её пластинчатые элементы (условно – пластины), ограниченные соседними подкреплениями. Максимальные уровни вибрации, следовательно, и псевдозвукового давления этих пластин возникают при совпадении их собственных (условно – резонансных) частот с частотами возбуждающей нагрузки. (О негативном влиянии резонансных явлений в пластинах на звукоизоляцию оребрённых конструкций

свидетельствуют результаты экспериментальных исследований, приведённые в §4.7 монографии И.И. Боголепова [3]). В большинстве случаев такой частотой является низшая резонансная частота f_{11} изгибных колебаний пластин с формой, представляющей одну полуволну вдоль каждой из кромок.

Целью настоящей работы являлось получение ответа на вопрос, могут ли уровни псевдозвуковых давлений в ближней зоне пластинчатого элемента подкреплённой конструкции, в том числе и на его поверхности, быть больше уровней давления озвучивающей пластину волны.

Взаимодействие пластин друг с другом через среду и подкрепления учитывать не будем, полагая, что интенсивность потока колебательной энергии из конкретной пластины в соседние равна интенсивности обратного потока. Такое допущение, справедливое при больших расстояниях озвучивающего источника от пластинчатой конструкции, даёт возможность решать стоящую задачу рассмотрением отдельной пластины, а её результаты считать справедливыми для большинства пластин, образующих конструкцию. Исключением могут быть лишь те пластины конструкции, которые находятся у её кромок [1].

При падении звуковой волны с давлением p на конструкцию колебания её отдельной пластины на низшей резонансной частоте f_{11} изгибных колебаний вызывает сила $F = pS$, где S – площадь пластины.

Минимальное механическое сопротивление Z_{min} пластины по отношению к возбуждающей силе, полагая её сосредоточенной и приложенной в геометрическом центре пластины, может быть определено с использованием формулы

$$Z_{min} = \frac{\pi f_{11} M \eta_{11}}{2}, \text{ где } M \text{ – масса пластины; } \eta_{11} \text{ – коэффициент потерь колебательной}$$

энергии в пластине на низшей резонансной частоте f_{11} её изгибных колебаний.

Используя формулу (1) и приведённые выражения для F и Z_{min} , имеем

$$|\ddot{v}_0| = \frac{4p}{m\eta_{11}}$$

и

$$\frac{p_{nc}}{p} = \frac{4\rho \ell b}{\pi\sqrt{\ell^2 + b^2}} \cdot \frac{e^{-zku}}{m\eta_{11}}, \quad (2)$$

где ℓ и b – размеры пластины в плане; m – масса единицы площади пластины; при нахождении конструкции в воздухе m равна произведению $\rho_{nl}h_{nl}$ (ρ_{nl} – плотность материала, h_{nl} – толщина); если окружающей пластину средой является вода с плотностью ρ_e , то m определяется суммой массы единицы площади собственно пластины $\rho_{nl}h_{nl}$ и соколеблющейся (присоединённой) массы воды m_e , равной $\frac{\rho_e \lambda_u}{\pi}$,

где длина изгибной волны пластины в воде $\lambda_u = 2\pi\sqrt{\frac{D}{2\rho_e\omega^2}}$ (при нахождении

конструкции на поверхности воды $m_e = \frac{\rho_e \lambda_u}{2\pi}$, а $\lambda_u = 2\pi\sqrt{\frac{D}{\rho_e\omega^2}}$). Здесь D – изгибная

жёсткость пластины, $D = \frac{Eh_{nl}^3}{12(1-\sigma^2)}$; E и σ – модуль Юнга и коэффициент Пуассона

материала пластины.

При выводе (2) учтено, что в случае колебаний конечной пластины на низшей резонансной частоте f_{11} волновое число k_u в формуле (1) заменяется на величину

$$k_{11} = \sqrt{\left(\frac{\pi}{\ell}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{b}\right)^2}.$$

Отношение $\frac{P_{nc}}{P}$ на поверхности ($z = 0$) пластины для случаев, когда пластину окружает только воздух (плотность ρ) или только вода, может быть записано в виде

$$\frac{P_{nc}}{P} = \frac{4\rho\ell b}{\pi\sqrt{\ell^2 + b^2}} \cdot \frac{1}{\rho_{nl} h_{nl} \eta_{11}}, \quad (3)$$

и

$$\frac{P_{nc}}{P} \approx \frac{4\rho_g \ell b}{\pi\sqrt{\ell^2 + b^2}} \cdot \frac{1}{\left(\rho_{nl} h_{nl} + \frac{\rho_g \lambda_u}{\pi}\right) \eta_{11}}, \quad (4)$$

соответственно.

При частоте f_{11} колебаний пластины в воде, много меньшей критической, выполняется условие $\rho_{nl} h_{nl} \ll \frac{\rho_g \lambda_u}{\pi}$ и выражение (4) принимает вид

$$\frac{P_{nc}}{P} = \frac{4\ell b}{\sqrt{\ell^2 + b^2}} \cdot \frac{1}{\lambda_u \eta_{11}}, \quad (5)$$

Обращаясь к выражениям (3) и (5), видим, что в обоих случаях отношение $\frac{P_{nc}}{P}$ зависит от размеров пластины в плане и потерь колебательной энергии. Соотношение длины ℓ и ширины b пластин инженерных конструкций преимущественно мало отличается от 1,5. Принимая $\ell = 1,5b$, получаем $\frac{\ell b}{\sqrt{\ell^2 + b^2}} \approx 0,8b$ и упрощённую форму выражений (3) и (5) для воздуха

$$\frac{P_{nc}}{P} \approx \frac{\rho b}{\rho_{nl} h_{nl} \eta_{11}}, \quad (6)$$

и воды

$$\frac{P_{nc}}{P} \approx \frac{b}{\lambda_u \eta_{11}}, \quad (7)$$

Обращаясь к (6) и (7), видим, что независимо от среды, где находится конструкция, отношение $\frac{P_{nc}}{P}$ растёт с увеличением ширины пластины b , т.е. с увеличением её размеров в плане, и с уменьшением потерь колебательной энергии η_{11} . В случае, когда пластину окружает воздух, отношение $\frac{P_{nc}}{P}$ пропорционально его плотности ρ и обратно пропорционально массе единицы площади пластины $\rho_{nl} h_{nl}$.

При нахождении пластины в воде отношение $\frac{P_{nc}}{p}$ растёт с уменьшением длины изгибной волны λ_u в пластине, т.е. косвенно – с уменьшением её толщины h_{nl} .

Из выражений (6) и (7) видно, что уровень псевдозвукового давления на поверхности озвучиваемой пластины может быть больше уровня давления падающей на конструкцию звуковой волны при выполнении условий:

– конструкция в воздухе

$$b > \frac{\rho_{nl}}{\rho} h_{nl} \eta_{11}, \quad (8)$$

– конструкция в воде

$$b > \lambda_u \eta_{11}. \quad (9)$$

Рассмотрим условие (8). Принимая толщину стальной ($\rho_{nl} = 7800 \text{ кг/м}^3$) пластины $h_{nl} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ в воздухе ($\rho = 1,29 \text{ кг/м}^3$) при средних конструкционных потерях η_{11} колебательной энергии на низших резонансных частотах её изгибных колебаний $\sim 3 \cdot 10^{-2}$ (пластина в составе конструкции), получаем, что ширина пластины, при озвучивании которой $p_{nc} > p$ должна удовлетворять условию $b \geq 0,36 \text{ м}$. Этому условию удовлетворяют пластины многих инженерных конструкций.

Ширина пластинчатых элементов конструкций из алюминия при ранее указанном значении $\eta_{11} = 3 \cdot 10^{-2}$ должна удовлетворять условию $b \geq 0,12$, которое выполняется в большинстве практических случаев.

Условие (8), а следовательно и отношение $\frac{P_{nc}}{p} > 1$, выполняется и при большей толщине стальных и алюминиевых одиночных (находящихся вне конструкции) пластин с меньшими потерями колебательной энергии.

Проанализируем условие (9) для конструкций, находящихся в воде. При толщине h_{nl} стальной пластины, равной $2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, среднее значение длины изгибной волны на частоте f_{11} порядка 20–60 Гц равняется примерно 0,5 м [1], с учётом чего ширина b пластин, на поверхности которых $p_{nc} > p$, должна быть больше $\sim 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$. Это условие выполняется практически всегда.

Полученный результат подтверждает очевидное соотношение $\lambda_u \approx 1,5b$, справедливое для низшей формы изгибных колебаний пластины на резонансной частоте f_{11} .

На основании выполненного анализа можно сделать вывод, что уровни псевдозвуковых давлений вблизи резонирующих пластин озвучиваемых конструкций независимо от среды, в которой они находятся, превышают уровни давления в падающих на них звуковых волнах.

Сказанное подтверждают расчётные зависимости от z величины $20 \lg \frac{P_{nc}}{p}$, дБ,

в ближнем шумовом поле находящихся в воздухе стальной, алюминиевой и стеклопластиковой пластин толщиной $2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ и $5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ с коэффициентом потерь η_{11} , равным 10^{-2} и 10^{-3} , приведённые на рисунках 2 и 3, соответственно. Анализ приведённой на рисунках информации показывает, что поперечный размер ближней области шумового поля тонких пластин с малыми потерями, где выполняется условие $p_{nc} > p$, превосходит половину длины изгибной волны в пластинах. В силу звукоизолирующей способности пластин указанный размер ближней области шумового

поля со стороны, где находится его источник, меньше размера ближней области с противоположной стороны пластин.

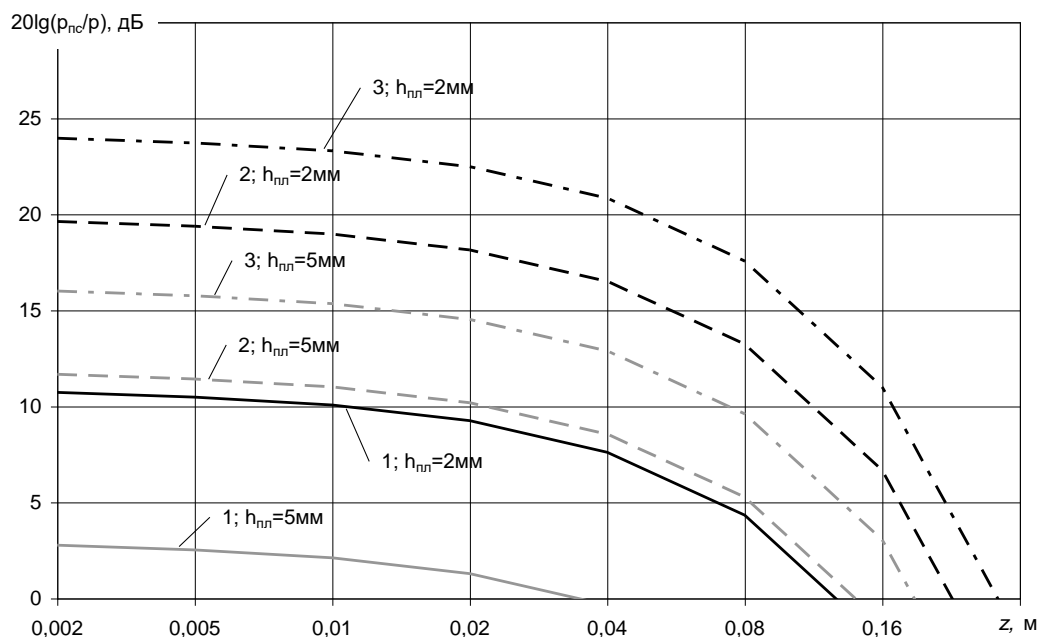


Рис.2. Соотношение уровней псевдозвукового (p_{pc}) и озвучиваемого (p) давлений вблизи пластин из стали (кривые 1), алюминия (кривые 2) и стеклопластика (кривые 3) толщиной $2 \cdot 10^{-3}$ м и $5 \cdot 10^{-3}$ м с коэффициентом потерь $\eta_{11} = 10^{-2}$

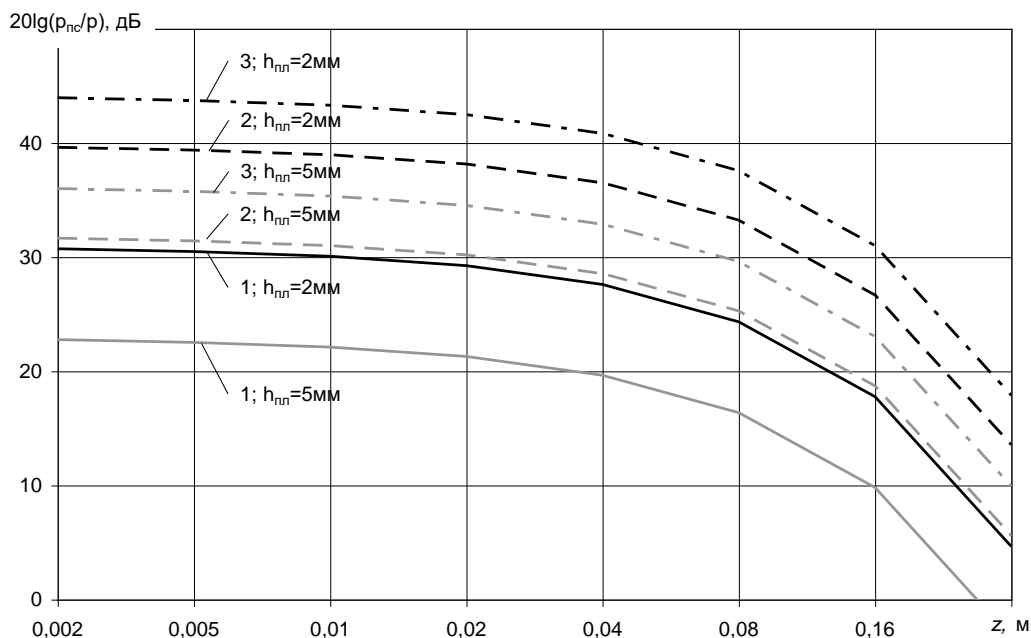


Рис. 3. Соотношение уровней псевдозвукового (p_{pc}) и озвучиваемого (p) давлений вблизи пластин из стали (кривые 1), алюминия (кривые 2) и стеклопластика (кривые 3) толщиной $2 \cdot 10^{-3}$ м и $5 \cdot 10^{-3}$ м с коэффициентом потерь $\eta_{11} = 10^{-3}$

Заключение

Проведенный анализ шумового поля в ближней зоне пластинчатого элемента подкреплённой конструкции (в том числе и на его поверхности), а также полученные результаты проведенных расчетов позволяют сделать вывод, что уровни псевдозвуковых давлений вблизи резонирующих пластин озвучиваемых конструкций независимо от среды, в которой они находятся, превышают уровни давления в падающих на них звуковых волнах.

Полученные результаты могут быть использованы, в частности, при разработке мероприятий по уменьшению уровней ближнего шумового поля озвучиваемых конструкций.

Список литературы

1. Кирпичников В.Ю. Вибровозбудимость конструкций и пути её уменьшения. СПб, 2014.
2. Кирпичников В.Ю. Об учёте вязкости в жидкой среде, возмущённой поперечными колебаниями ограничивающей плоской поверхности. Прикладная механика, т. V, вып. 5, Киев, 1969.
3. Боголепов И.И. Промышленная звукоизоляция. Л., Судостроение, 1986.