

Минобрнауки России
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»

В.Н. БОБЫЛЕВ, В.А. ТИШКОВ, Д.В. МОНИЧ

ИЗОЛЯЦИЯ ВОЗДУШНОГО ШУМА
ОДНОСЛОЙНЫМИ
ОГРАЖДАЮЩИМИ КОНСТРУКЦИЯМИ

Утверждено редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия

Нижегород

2014

ББК 38.113
И 38

Рецензенты:

Кочкин А.А. – д-р техн. наук, профессор,
заведующий кафедрой промышленного и гражданского строительства,
декан инженерно-строительного факультета
ФГБОУ ВПО «Вологодский государственный университет» (г. Вологда)

Истомин С.Н. – технический директор МП «Институт развития города
«НижегородгражданНИИпроект» (г. Нижний Новгород)

Бобылев, В.Н. Изоляция воздушного шума однослойными ограждающими конструкциями [Текст]: учеб. пособие / В.Н. Бобылев, В.А. Тишков, Д.В. Монич. – Нижегород. гос. архитектур.-строит. ун-т. – Н. Новгород: ННГАСУ, 2014. – 67 с. ISBN 978-5-528-00004-6

Рассмотрены теоретические основы расчета звукоизоляции однослойных ограждающих конструкций зданий конечных размеров при диффузном падении звуковых волн. Представлены инженерные методы расчета звукоизоляции однослойных ограждений.

Учебное пособие предназначено для студентов по направлениям подготовки «Строительство», «Строительство уникальных зданий и сооружений», а также для специалистов в области строительной акустики – научных работников, преподавателей вузов, аспирантов профильных научных специальностей.

Учебное пособие подготовлено в рамках выполнения НИР (код проекта 3038) с финансированием из средств Минобрнауки России в рамках базовой части государственного задания на научные исследования.

Ил. 13; табл. 33; библиограф. назв. 21

ББК 38.113

ISBN 978-5-528-00004-6

© Коллектив авторов, 2014

© ННГАСУ, 2014

Введение

В современном городе человек постоянно подвергается воздействию повышенного уровня шума. Это происходит в быту, на рабочем месте, в местах массового отдыха, на транспорте и в других условиях. Наружные и внутренние ограждения квартир, служебных и рабочих помещений зачастую не обеспечивают требуемую шумозащиту. Поэтому обеспечение акустического комфорта в среде обитания человека является важнейшей задачей при проектировании и строительстве гражданских и промышленных зданий.

Одним из наиболее эффективных средств снижения воздушного шума является устройство на пути его распространения звукоизолирующих преград в виде стен, перегородок, перекрытий, специальных звукоизолирующих кожухов, кабин наблюдения и т.д.

Звукоизоляция – это способность ограждающей конструкции ослаблять энергию звуковых волн при ее прохождении через нее.

Проектирование звукоизолирующих преград следует вести на основании акустического расчета изоляции воздушного шума ограждающими конструкциями.

Для этого необходимо знать частотную характеристику звукоизоляции ограждающих конструкций, которую можно установить путем экспериментальных исследований в натурных или лабораторных условиях или построить теоретическими способами.

В настоящей работе даны основные сведения о звукоизоляции бесконечных пластин и о звукоизоляции ограждений конечных размеров. Кроме того, в работе приводятся способы построения частотных характеристик звукоизоляции и расчет индекса изоляции воздушного шума ограждающими конструкциями по наиболее широко применяемой в проектной методике, установленной сводами правил [1], [2]. Представлены аналитические способы расчета и построения частотных характеристик звукоизоляции однослойных

ограждающих конструкций, основанные на теории самосогласования звуковых полей с волновым полем пластины реальных размеров.

Известно, что одним из недостатков современных стандартных облегченных ограждений является их низкая звукоизоляция по сравнению с более массивными панелями. Поэтому в настоящее время особую актуальность приобретают технологии, позволяющие повысить изоляцию воздушного шума легкими ограждениями без увеличения их массы. Одним из способов, который позволяет улучшить звукоизоляцию легких ограждающих конструкций без увеличения их массы, является способ ослабления их поперечного сечения. В работе приводится инженерный метод расчета звукоизоляции таких ограждающих конструкций.

1 Звукоизоляция однослойных ограждающих конструкций

Под однослойными ограждениями подразумеваются конструкции, состоящие из одного или нескольких слоев, жестко связанных друг с другом.

Собственная звукоизоляция ограждающей конструкции, т.е. звукоизоляция без учета косвенной передачи звука, равна, дБ:

$$R = 10 \lg \frac{1}{\tau} . \quad (1)$$

τ – коэффициент прохождения (проницаемости) звука:

$$\tau = \frac{E_{\text{пр}}}{E_{\text{пад}}} = \frac{W_{\text{пр}}}{W_{\text{пад}}} = \frac{p^2_{\text{пр}}}{p^2_{\text{пад}}},$$

где $E_{\text{пр}}$ и $E_{\text{пад}}$ – энергия, падающих и прошедших звуковых волн;

$W_{\text{пр}}$ и $W_{\text{пад}}$ – прошедшая и падающая звуковая мощность соответственно;

$p_{\text{пр}}$ и $p_{\text{пад}}$ – звуковое давление в прошедшей и падающей звуковых волнах соответственно.

Сущность звукоизоляции ограждающей конструкции состоит в том, что большая часть падающей на нее звуковой энергии отражается, некоторая часть поглощается в материале и лишь незначительная часть проникает через конструкцию в смежное помещение (от 0,1 % до 0,001 % и менее – для ограждений

из традиционных строительных материалов). Такой доле проникающей звуковой энергии соответствует звукоизоляция ограждающей конструкции от 30 до 50 дБ.

Для определения численных значений звукоизоляции необходимо знать механизм прохождения звука через ограждающую конструкцию.

1.1 Прохождение звука через ограждающие конструкции неограниченной протяженности

1.1.1 Нормальное падение звука

Первые теоретические исследования прохождения звука через ограждения были сделаны еще в XIX веке британским физиком Лордом Рэлеем (Дж. У. Стретт) [3]. Лорд Рэлей рассмотрел прохождение звука через преграду неограниченной протяженности при перпендикулярном падении на нее плоских звуковых волн и сделал вывод, что звук проходит через преграду в результате нормальных поршневых колебаний.

Собственная звукоизоляция, по Лорду Рэлею, равна, дБ:

$$R \cong 20 \lg \frac{m \omega}{2 \rho_0 c_0}, \quad (2)$$

где $m = \rho h$ – масса единицы поверхности ограждения или поверхностная плотность, $\text{кг}/\text{м}^2$;

ρ – плотность материала ограждения, $\text{кг}/\text{м}^3$;

$\omega = 2\pi f$ – круговая частота звука, Гц;

$\rho_0 c_0$ – удельное акустическое сопротивление воздуха при прохождении звуковых волн (характеристический импеданс), $\frac{\text{Па}\cdot\text{с}}{\text{м}}$.

Выражение звукоизоляции (2) называют законом масс при нормальном падении звука (см. рис. 1). Выражение «нормальное падение» означает падение звуковых волн на ограждение под углом 90° («нормаль» – перпендикуляр).

Р. Бергер [4] проводил многочисленные экспериментальные исследования с использованием электроакустической аппаратуры и установил, что звукоизоляция в первую очередь зависит от массы ограждения (поверхностной

плотности). Позднее Р. Бергер экспериментально обнаружил, что звукоизоляция ограждения определяется не только поверхностной плотностью, но и другими физико-механическими характеристиками.

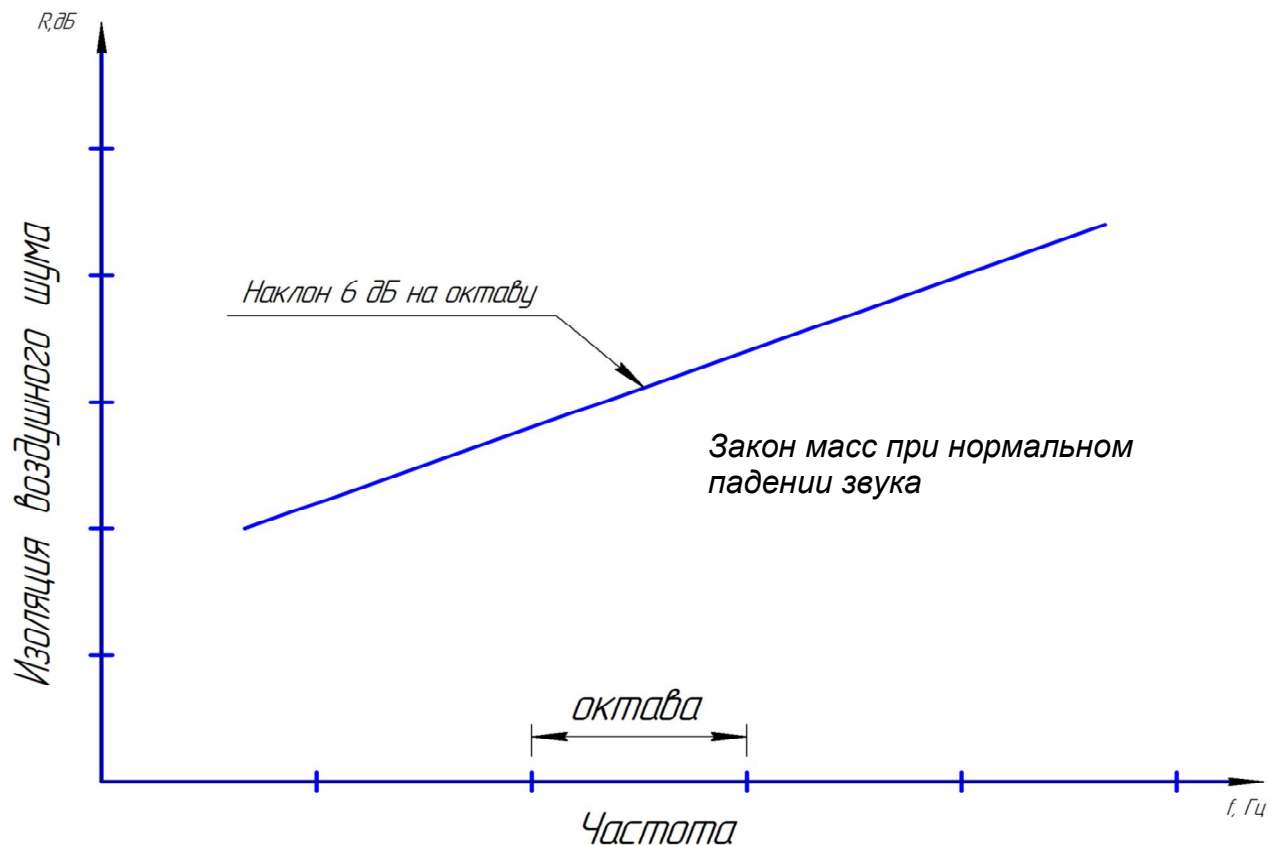


Рис. 1. Частотная характеристика звукоизоляции ограждения неограниченной протяженности при нормальном падении звука

1.1.2. Наклонное падение звука. Теория Л. Кремера.

Волновое совпадение

Задачу прохождения звука при произвольных углах падения звуковых волн рассматривали А. Шох, Х. Рейснер и другие исследователи. Однако четкого объяснения физической природы полученных результатов они не сделали. В своих исследованиях А. Шох [5] представил пластину как совокупность независимых друг от друга элементарных частей, каждая из которых представляет собой колебательную систему. Он показал, что в случае, когда плоские звуковые волны падают на ограждение под углами θ , звукоизоляция равна:

$$R = 10 \lg \left[1 + \left(\frac{m \omega \cos \theta}{2 \rho_0 c_0} \right)^2 \right], \quad (3)$$

где θ – угол падения звуковых волн на ограждение (между нормалью к поверхности ограждения и направлением падения плоской звуковой волны).

Однако экспериментальные значения звукоизоляции реальных ограждающих конструкций значительно расходились с теорией А. Шоха. В области высоких частот это расхождение достигало $10 \div 20$ дБ. Таким образом, представление пластины в виде колеблющегося поршня или как совокупность несвязанных масс не позволяет достоверно определить звукоизоляцию ограждающих конструкций.

В 1942 году Л. Кремер рассмотрел задачу прохождения звука через тонкую бесконечную пластину при разных углах падения на нее плоской звуковой волны [6]. Было установлено, что основное влияние на передачу звука через тонкие пластины оказывают изгибные волны, которые образуются, если толщина конструкции меньше одной шестой длины волны изгиба на рассматриваемой частоте. В основу теории Л. Кремера заложен эффект волнового совпадения, который ранее был обнаружен в области ультразвука Ф. Сандерсом [7].

При падении звуковых волн на пластину в ней возникают вынужденные волны и свободные изгибные волны. Вынужденная волна бежит со скоростью распространения звуковой волны c_0 , а свободная изгибная волна распространяется со скоростью $c_{и}$ без участия звуковой волны.

Известно, что скорость распространения изгибных волн в пластине равна:

$$c_{и} = \sqrt[4]{\frac{D \omega^2}{m}}, \quad (4)$$

где D – цилиндрическая жесткость пластины, Па/м³:

$$D = \frac{E h^3}{12(1-\mu^2)}, \quad (5)$$

где E – модуль упругости материала (модуль Юнга) пластины, Па;

h – толщина пластины, м;

μ – коэффициент Пуассона материала пластины.

В момент, когда скорость распространения вынужденной волны в пластине совпадает со скоростью свободной изгибной волны, наступает своеобразный резонанс, который был назван эффектом волнового совпадения. Рассмотрим график на рис. 2.

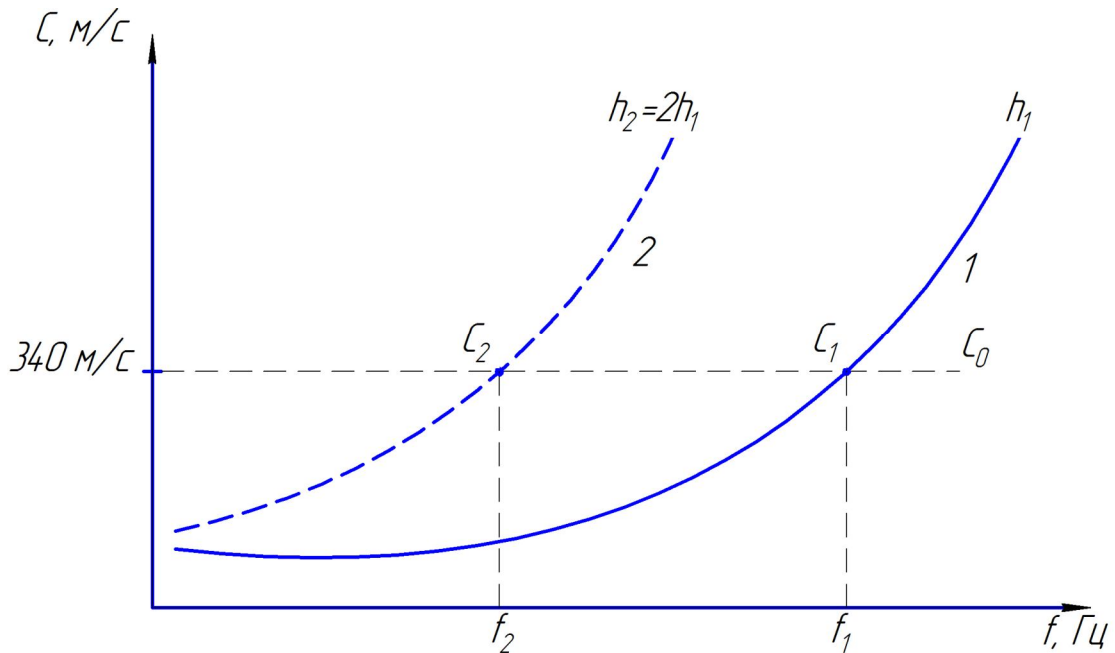


Рис. 2. График частотной зависимости скорости распространения звуковой волны и скорости распространения изгибной волны в пластине

Кривые 1 и 2 показывают скорости распространения волн изгиба в пластинах из одного и того же материала (вторая пластина в два раза толще первой). На частотах f_1 и f_2 скорости $c_{1и}$ и $c_{2и}$ равны скорости звуковой волны c_0 – наступает момент волнового совпадения.

Волновое совпадение – это явление, когда точно совпадают фазовые скорости распространения свободных изгибных волн в пластине и фазовые скорости распространения падающих звуковых волн вдоль пластины.

$$c_{и} = \frac{c_0}{\sin \theta} . \quad (6)$$

Рассмотрим схему, иллюстрирующую эффект волнового совпадения, (рис. 3) .

Из ΔABC видно и можно записать, что

$$\lambda_{и} = \frac{\lambda_0}{\sin \theta}. \quad (7)$$

Волновое совпадение наступает тогда, когда длина изгибной волны $\lambda_{и}$ будет равна проекции длины звуковой волны λ_0 на пластину (рис. 3).

При этом интенсивность изгибных колебаний резко увеличивается и, следовательно, резко возрастает прохождение звука через ограждение в изолированное помещение. Теоретически имеет место полное прохождение звука через ограждение.

Частота эффекта волнового совпадения f_c , Гц определяется из зависимостей (4) и (6):

$$f_c = \frac{c_0^2}{2\pi \sin^2 \theta} \sqrt{m/D}. \quad (8)$$

Если $\theta = \frac{\pi}{2}$ – первый момент наступления волнового совпадения, а частота этого момента называется граничной, или критической частотой:

$$f_{гр} = f_{кр} = \frac{c_0^2}{2\pi} \sqrt{m/D}. \quad (9)$$

Согласно теории Л. Кремера весь диапазон частот делится на две области: область ниже и область выше критической частоты, в каждой из которых механизм прохождения звука различен (рис. 4):

- 1 – падающая плоская звуковая волна;
- 2 – отраженная звуковая волна;
- 3 – прошедшая через ограждение (излученная ограждением) звуковая волна.

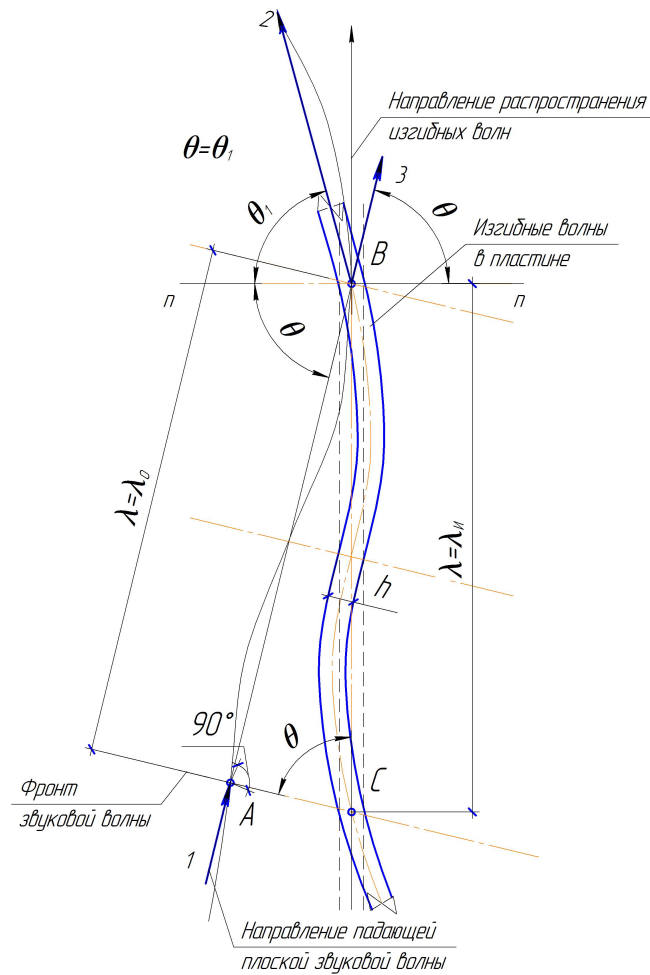


Рис. 3. Схема, иллюстрирующая эффект волнового совпадения

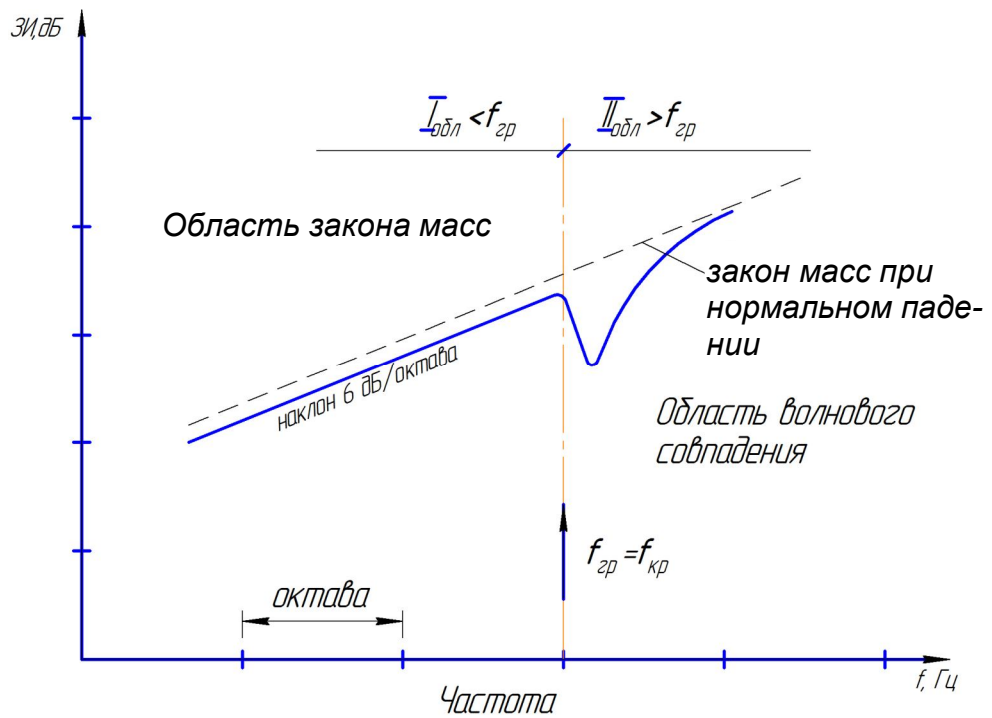


Рис. 4. Частотная характеристика звукоизоляции бесконечной тонкой пластины с делением на две области, по Л. Кремеру

В области ниже граничной частоты, где эффект волнового совпадения отсутствует, звукоизоляция тонкой бесконечной пластины определяется законом масс по формуле А. Шоха (3).

В области выше $f_{гр}$ на каждой частоте существует такой угол падения, которому соответствует «полное» прохождение звука через ограждающую конструкцию. В этой области звукоизоляция ограждения определяется не только его массой, но и коэффициентом внутренних потерь материала. На частотах в области выше $2f_{кр}$ звукоизоляция может быть подсчитана по формуле Л. Кремера, дБ:

$$R = 20\lg \frac{\pi f_{кр} m}{\rho_0 c_0} + 30\lg \frac{f}{f_{кр}} + 10\lg \eta - 3 \text{ дБ}, \quad (10)$$

где η – коэффициент внутренних потерь материала ограждения (например, для стекла $\eta = 3,1 \cdot 10^{-3}$).

1.1.3 Диффузное падение звуковых волн. Закон масс

В области закона масс наибольшая звукоизоляция для бесконечной пластины достигается при нормальном падении звука на ограждение ($\theta = 0^\circ$).

В случае диффузного звукового поля звуковые волны падают на ограждение под различными углами и общая переданная через ограждение энергия равна сумме переданных энергий при каждом угле падения звука. На практике принято считать, что углы падения звука θ меняются от 0 до 80° . В этом случае звукоизоляция ограждения неограниченного размера $R = R_{\theta=0} - 5$ дБ, тогда закон масс в случае диффузного звукового поля для бесконечной пластины запишется следующим образом:

$$R = 20\lg \frac{\pi f m}{\rho_0 c_0} - 5 \text{ дБ} \quad \text{или}$$

$$R = 20\lg f m - 47,5 \text{ дБ}, \quad (11)$$

где f – текущая частота звука, Гц.

2 Звукоизоляция однослойных ограждающих конструкций ограниченных размеров

Многочисленные данные экспериментальных исследований показали, что численные значения звукоизоляции ограждений реальных размеров не совпадают с теоретическими значениями звукоизоляции для бесконечных пластин, и особенно это заметно в областях средних и низких частот для ограждающих конструкций из традиционных материалов, таких как кирпич, бетон, сталь, стекло, гипсокартон и других материалов. Кроме того, результаты измерений показывают, что звукоизоляция реальных ограждений больше по сравнению с идеализированным случаем безграничной пластины. Данный вопрос подробно исследовался А. Шохом и К. Фейером, В. Пьютцом, Т. Кильманом, М. Хеклем, Р. Жосом и С. Лямуром, а также другими учеными.

Л.М. Лямшев рассмотрел прохождение звука через бесконечную полосу с шарнирно опертыми противоположными краями. При этом он учитывал не только колебания изгиба, но и продольные колебания ограждения [8]. В.И. Заборов в своих исследованиях получил формулу звукоизоляции Кремера в области волнового совпадения при подробном рассмотрении прохождения звука через слой [9].

Наряду с теоретическим изучением звукоизоляции ограждающих конструкций, проводились многочисленные экспериментальные исследования, в результате которых обнаружено, что расчетные значения звукоизоляции, по Кремеру, в области волнового совпадения хорошо согласуются с экспериментом только для материалов с достаточно высоким коэффициентом потерь ($\eta > 0,04$). А. Лондон произвел уточнение расчетной формулы звукоизоляции для реальных ограждений [10]. Для этого он ввел дополнительное слагаемое в выражение импеданса безграничной пластины при изгибных колебаниях. Это позволило учесть дополнительное рассеяние энергии. Г.Л. Осипов показал, что это выражение может быть использовано для расчета звукоизоляции ограждающих конструкций. При этом дополнительное слагаемое определяется по экспериментальной частотной характеристике [11]. В статистическо-

энергетическом методе М. Крокера, М. Батгачарии, А. Прайса закон масс принят в качестве характеристики нерезонансного прохождения звука через ограждающую конструкцию [12]. Теоретические и экспериментальные исследования звукоизоляции однослойных ограждающих конструкций зданий с использованием метода статистически-энергетического анализа проведены С.Н. Овсянниковым [13], [14].

Однако, несмотря на многочисленные исследования, теоретического объяснения наблюдаемому, в частности повышению звукоизоляции на низких и средних частотах, не было сделано.

Физическая природа этого явления впервые была объяснена исследованиями проф. М.С. Седова. Он создал теорию самосогласования волновых полей, которая устанавливает двойственный характер прохождения звука через преграду. При этом рассматривается прохождение звука через ограждающие конструкции конечных размеров с учетом граничных условий на краях.

Согласно теории проф. М.С. Седова [15] – [17], весь практически важный диапазон частот делится на пять областей резонансного прохождения: дорезонансная область, область простых резонансов, область простых пространственных резонансов (ПрПП), неполных пространственных резонансов (НПП) и полных пространственных резонансов (ППР). Каждая из этих областей находится между граничными частотами: основной резонансной частотой f_0 , граничной частотой простых ПР $f_{\Gamma m_0 n_0}$, неполных ПР $f_{\Gamma mn_0}$ и полных ПР $f_{\Gamma mn}$ соответственно.

Такое разделение существенно отличается от разделения Л. Кремера (две области) и Л. Беранека (три области) [18]. На рис. 5 и 6 приведены обобщенные частотные характеристики звукоизоляции однослойного ограждения реальных размеров, деление частотной характеристики звукоизоляции на три области, по Л. Беранеку, и на пять областей по теории самосогласования волновых полей проф. М.С. Седова.

Л. Беранек установил, что в зоне I прохождение звука через пластину зависит от изгибной жесткости. Кроме того, в этой области значительное влия-

ние оказывают резонансы пластины. В зоне II звукоизоляция ограждения определяется только его массой, а в зоне III – волновым совпадением и жесткостью пластины. Представление частотной характеристики звукоизоляции, по Л. Кремеру и Л. Беранеку, не объясняет механизма прохождения звука и не дает объяснения явлениям, наблюдаемым экспериментально (повышение звукоизоляции на низких и средних частотах, резонансные явления в пластине и т.д.).

Согласно теории самосогласования волновых полей, разработанной научной школой проф. М.С. Седова, установлено, что во всем диапазоне частот прохождение звука пластину ограниченного размера связано с явлением самосогласования звуковых полей с собственным полем пластины. При этом прохождение звука имеет двойственную природу: резонансное и инерционное прохождение звука. С учетом двойственной природы прохождения звука выражение звуковой мощности, излучаемой ограждающей конструкцией, запишется как:

$$W_2 = W_{2C} + W_{2И}, \quad (12)$$

где W_{2C} – мощность, излучаемая упругими волнами; $W_{2И}$ – мощность, излучаемая инерционными волнами.

В этом случае суммарный коэффициент прохождения звука через ограждение $\tau = \tau_c + \tau_{и}$, где τ_c – коэффициент резонансного прохождения звука, а $\tau_{и}$ – коэффициент инерционного прохождения звука через ограждение. Собственная звукоизоляция ограждения, дБ:

$$R = 10 \lg \frac{1}{\tau_c + \tau_{и}} . \quad (13)$$

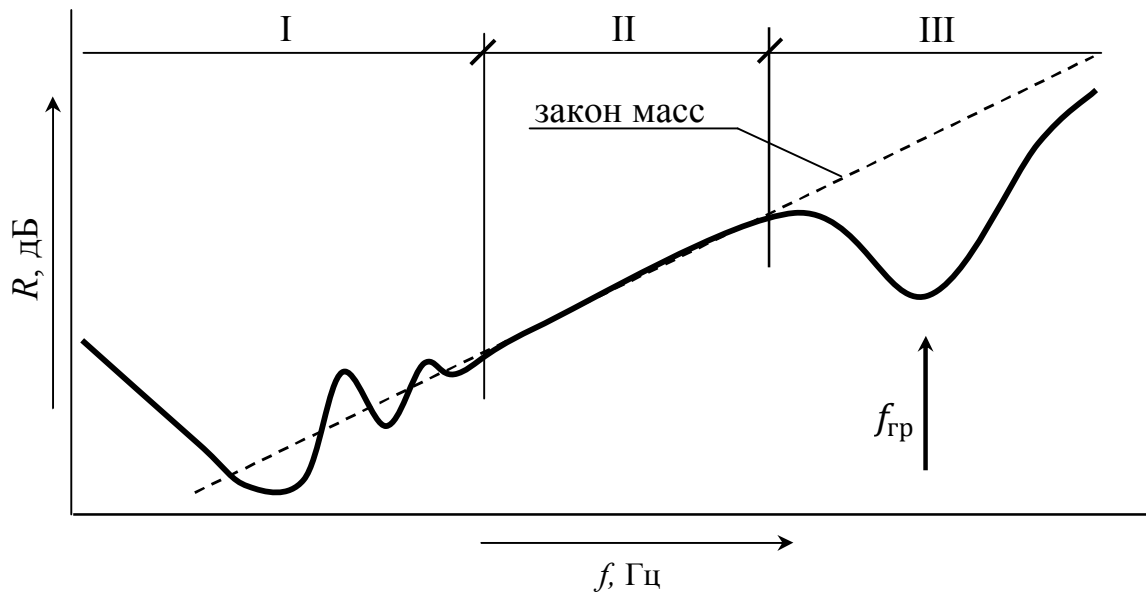


Рис. 5. Обобщенная частотная характеристика звукоизоляции однослойного ограждения при диффузном падении звука с делением на три области, по Л. Беранеку

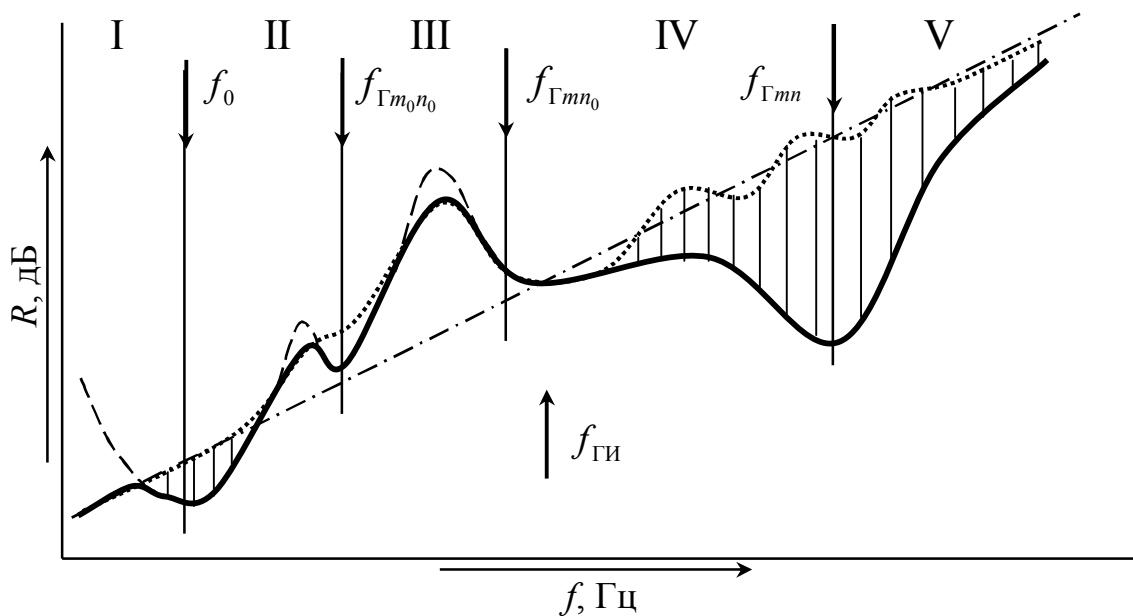


Рис. 6. Обобщенная частотная характеристика звукоизоляции однослойного ограждения конечных размеров; – инерционное прохождение звука; - - - – резонансное прохождение звука; - · - · - – закон масс

Механизм прохождения звука через однослойную панель заключается в следующем: звуковые волны, падающие со стороны источника шума, образуют в плоскости ограждения поле звукового давления, которое, в свою очередь, возбуждает в пластине изгибные колебания. При этом волновое поле смещений пластины формируется свободными упругими и инерционными (чисто вынужденными) волнами [17]. Поле инерционных волн образовано однородной вынужденной волной и краевыми неоднородными вынужденными волнами. Распространение инерционных волн происходит со скоростью следа падающей звуковой волны и не зависит от упругих характеристик материала, а определяется массой и размерами ограждения. Данные волны существуют на каждой частоте, а на частотах собственных колебаний панели собственные и инерционные волны отличаются начальной фазой движения [17].

Резонансное прохождение звука через панель определяется потерями энергии на рассеивание в материале (характеризуются коэффициентом потерь η) и степенью самосогласования собственного волнового поля и звуковыми полями перед и за ограждением (A_1 и A_2 – в «шумном» и «тихом» помещениях соответственно). Таким образом, излучение звука в режиме собственных колебаний различно в областях простых, неполных и полных ПР. Выражение звукоизоляции однослойной строительной панели в области частот ниже граничного ППР ($f < f_{\Gamma mn}$) имеет вид [15]:

$$R = 10 \lg \frac{\pi^2}{\rho_0^2 c_0^2} \frac{\mu^2 \cdot f^2}{\left(\frac{F_{\text{и}}^2}{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_{2\text{и}}} + \frac{\pi}{1,15} \cdot \frac{A^4}{2 \cdot \eta \cdot \cos \theta_1 \cdot \cos \theta_{2\text{с}}} \right)}, \quad (14)$$

где θ_1 – угол падения звуковых волн на ограждение (для диффузного звукового поля используется усредненное значение $\theta_{\text{ср}} = 51^\circ, 75 \dots$ [17]);

$\theta_{2\text{и}}, \theta_{2\text{с}}$ – углы излучения звуковых волн инерционными и свободными колебаниями соответственно;

μ – поверхностная плотность ограждения (масса единицы поверхности, кг/м²);

$F_{и}$ – функция отклика ограждающей конструкции [17];

$A^4 = A_1^2 \cdot A_2^2$ – характеристика самосогласования звуковых полей перед и за панелью (A_1 и A_2 соответственно) с волновым полем собственных колебаний ограждения:

$$A = \frac{\int_0^a \int_0^b \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \sin \frac{m_0\pi x}{a} \sin \frac{n_0\pi y}{b} dx dy}{\int_0^a \int_0^b \sin^2 \frac{m_0\pi x}{a} \sin^2 \frac{n_0\pi y}{b} dx dy}, \quad (15)$$

где m, n – числа, характеризующие собственное волновое поле ограждающей конструкции;

m_0, n_0 – числа, характеризующие звуковое поле в плоскости ограждения.

Для частот выше граничного ППР ($f > f_{Гmn}$) звукоизоляция ограждений вычисляется по формуле [15]:

$$R = 10 \lg \frac{\pi^2}{\rho_0^2 c_0^2} \frac{\mu^2 \cdot f^2}{\left(\frac{F_{и}^2}{\cos\theta_1 \cdot \cos\theta_{2и}} + \frac{\pi}{8} \cdot \frac{f_{Гmn} \cdot \bar{s}_{mn}}{f \cdot \eta \cdot \cos\theta_1 \cdot \cos\theta_{2с}} \right)}, \quad (16)$$

где \bar{s}_{mn} – коэффициент излучения панели, усредненный по полосе пропускания Δf .

В знаменателях выражений (15) и (16) первое слагаемое в круглых скобках характеризует инерционное прохождение звука через ограждение, а второе слагаемое – резонансное прохождение.

Для случая $\frac{F_{и}^2}{\cos\theta_1 \cdot \cos\theta_{2и}} \gg \frac{\pi}{1,15} \cdot \frac{A^4}{2 \cdot \eta \cdot \cos\theta_1 \cdot \cos\theta_{2с}}$, т. е. когда основной

вклад в излучение звука вносят инерционные волны, формула (14) имеет вид [17]:

$$R = 20 \lg \frac{\mu \cdot f}{F_{и}} - 46,7 \text{ дБ}. \quad (17)$$

Формула (17) выражает предельную звукоизоляцию ограждающих конструкций конечных размеров. Ее превышения не произойдет даже при существенном демпфировании собственных колебаний [17]. Для панели заданной мас-

сы предельная звукоизоляция определяется величиной функции отклика $F_{\text{И}}$ и текущей частотой звука f . На рис. 6 нанесены кривые, соответствующие инерционному и резонансному прохождению звука через однослойную преграду. Заштрихованная область между ними обозначает резерв повышения звукоизоляции за счет снижения акустического излучения панелью в режиме собственных колебаний. Путем сравнения вклада резонансной и инерционной составляющих в величину общей звукоизолирующей способности ограждения (см. формулы (14) и (16)) можно установить физико-механические характеристики, оказывающие наибольшее влияние на прохождение звука в том или ином частотном диапазоне. Например, на частотах ниже граничной частоты инерционного прохождения звука ($f < f_{\text{ГИ}}$) звукоизоляцию ограждающей конструкции определяют чисто вынужденные колебания. Здесь звукоизоляция пластины конечных размеров повышается относительно закона масс в соответствии с изменением величины функции отклика.

Изменяя размеры ограждения в плане, можно смещать область повышенных значений звукоизоляции по частотной шкале. При увеличении размеров панели эта область смещается на более низкие частоты. Для ограждения бесконечных размеров $a \rightarrow \infty$, $b \rightarrow \infty$ повышения звукоизоляции не будет, т. к. $F_{\text{И}} \rightarrow 1$ во всем диапазоне частот. При этом формула (17) совпадает с известным выражением «закона масс», т. е. «закон масс» является выражением предельной звукоизоляции для панелей неограниченных размеров [17].

В диапазоне частот $f_{\text{ГИ}} \leq f < 1/2 f_{\text{Гmn}}$ инерционное и резонансное прохождения соизмеримы. Для панелей с небольшой цилиндрической жесткостью инерционное прохождение может преобладать, и тогда звукоизоляция определяется поверхностной массой. Чем выше цилиндрическая жесткость ограждения, тем больший вклад в излучение звука вносят резонансные колебания. В этом случае на величину звукоизоляции, кроме массы, оказывают влияние толщина пластины, модуль упругости и коэффициент потерь материала.

Повысить собственную звукоизоляцию ограждения можно путем уменьшения цилиндрической жесткости D или увеличением коэффициента потерь.

На частотах $1/2f_{\Gamma mn} \leq f < f_{\Gamma mn}$ в области НПП возникают условия дополнительного самосогласования, что приводит к более интенсивным резонансным колебаниям ограждающей конструкции. Снизить излучение звука в режиме собственных колебаний можно путем уменьшения жесткости панели, а также увеличением ее размеров в плане и коэффициента потерь. В диапазоне частот выше граничного ППР ($f \geq f_{\Gamma mn}$) характеристика самосогласования волновых полей $A = 1$ и размеры пластины практически не оказывают влияния на ее звукоизоляцию. Здесь преобладает резонансное прохождение звука, и снизить его можно путем увеличения массы ограждения, коэффициента потерь, а также путем смещения провала звукоизоляции на более высокие частоты.

Таким образом, теория самосогласования волновых полей устанавливает физическую природу прохождения звука через ограждения ограниченных размеров на основе рассмотрения волновых явлений. Это позволяет точно определять граничные частоты областей прохождения звука, аналитически рассчитывать и строить частотные характеристики звукоизоляции реальных ограждающих конструкций конечных размеров, а также устанавливать, какие физико-механические характеристики ограждения оказывают наибольшее влияние на звукопроницаемость в различных частотных диапазонах. При проектировании ограждений необходимо использовать резервы повышения звукоизоляции, определяемые инерционным прохождением звука, а путем снижения резонансного прохождения звука можно приближать значения звукоизоляции к их предельным значениям.

3 Расчет звукоизоляции однослойных ограждающих конструкций по стандартной методике графоаналитическим способом

Расчет производится в соответствии с требованиями сводов правил [1], [2]. Нормируемым параметром звукоизоляции внутренних ограждающих конструкций жилых и общественных зданий является индекс изоляции воздушного шума ограждающими конструкциями R_w , дБ (см. приложение).

3.1 Расчет изоляции воздушного шума однослойными ограждающими конструкциями сплошного сечения

3.1.1. Рассмотрим методику построения частотных характеристик изоляции воздушного шума ограждений в соответствии с требованиями [2].

3.1.1.1. Частотная характеристика изоляции воздушного шума однослойной плоской ограждающей конструкции сплошного сечения с поверхностной плотностью от 100 до 800 кг/м² из бетона, железобетона, кирпичной кладки и т.п. материалов изображается в виде ломаной линии ABCD (см. рис. 7).

Определяется координата точки В (f_B , R_B):

а) абсциссу точки В – f_B следует определять по табл. 1 в зависимости от толщины и плотности материала конструкции.

Значения f_B следует округлять до среднегеометрической частоты 1/3-октавной полосы пропускания звука, в пределах которой она находится (см. табл. 2).

Таблица 1

Плотность материала, ρ , кг/м ³	f_B , Гц
≥ 1800	29000/h
1600	31000/h
1400	33000/h
1200	35000/h

Окончание таблицы 1

1000	$37000/h$
800	$39000/h$
600	$40000/h$
Примечания: h – толщина ограждения, мм; промежуточные значения табл. 1 определяются интерполяцией.	

Таблица 2

Среднегеометрическая частота 1/3-октавной полосы, f , Гц	Границы 1/3-октавной полосы, Гц
50	45 - 56
63	57 - 70
80	71 - 88
100	89 - 111
125	112 - 140
160	141 - 176
200	177 - 222
250	223 - 280
315	281 - 353
400	354 - 445
500	446 - 561
630	562 - 707
800	708 - 890
1000	891 - 1122
1250	1123 - 1414
1600	1415 - 1782
2000	1783 - 2244
2500	2245 - 2828
3150	2829 - 3563
4000	3564 - 4489
5000	4490 - 5657

Таблица 3

Вид материала	Класс	Плотность материала, ρ , кг/м ³	Коэффициент k
Керамзитобетон	В 7,5	1500 - 1550	1,1
		1300 - 1450	1,2
		1200	1,3
		1100	1,4
	В 12,5 – В 15	1700 - 1750	1,1
		1500 - 1650	1,2
		1350 - 1450	1,3
		1250	1,4
Перлитобетон	В 7,5	1400 - 1450	1,2
		1300 - 1350	1,3
		1100 - 1200	1,4
		950 - 1000	1,5
Аглопоритобетон	В 7,5	1300	1,1
		1100 - 1200	1,2
		950 - 1000	1,3
	В 12,5	1500 - 1800	1,2
Шлакопемзобетон	В 7,5	1600 - 1700	1,2
	В 12,5	1700 - 1800	1,2
Газобетон, пенобетон, газосиликат	В 5,0	1000	1,5
		800	1,6
		600	1,7
Кладка из кирпича, пустотелых керамических блоков		1500 - 1600	1,1
		1200 - 1400	1,2
Гипсобетон, гипс (в том числе поризованный или с легкими заполнителями)	В 7,5	1300	1,3
		1200	1,4
		1000	1,5
		800	1,6

б) ординату точки В (R_B) следует определять в зависимости от эквивалентной поверхностной плотности ограждения $m_э$ по формуле, дБ:

$$R_B = 20 \lg m_э - 12 \text{ дБ}, \quad (18)$$

где $m_э = k \cdot m$, кг/м²; здесь $m = \rho \cdot h$, кг/м² – поверхностная плотность ограждения (для ребристых конструкций принимается без учета ребер).

$$\text{Тогда } m_э = k \cdot \rho \cdot h ,$$

где k – коэффициент, учитывающий относительное увеличение цилиндрической жесткости ограждения из легких бетонов на легких заполнителях, поризованных бетонов и т.п. материалов по отношению к конструкциям из тяжелого бетона с той же поверхностной плотностью (см. табл. 3).

Для сплошных ограждающих конструкций плотностью $\rho \geq 1800 \text{ кг/м}^3 - k = 1,0$. Для материалов с другой плотностью коэффициент k определяется по табл. 3.

Значения R_B следует округлять до 0,5 дБ.

Далее строится график частотной характеристики изоляции воздушного шума однослойным ограждением (см. рис. 7).

Построение частотной характеристики изоляции воздушного шума в нормируемом диапазоне частот производится в следующей последовательности: по подсчитанным координатам на график наносим точку В (в ряде случаев, точка В может находиться за пределами нормируемого частотного диапазона ($f_B < 100 \text{ Гц}$)).

Далее из точки В влево проводится горизонтальный отрезок ВА (точка А должна находиться на частоте 100 Гц). Затем вправо от точки В проводится отрезок ВС с наклоном 6 дБ на октаву до точки С (ордината точки С равна 65 дБ для всех случаев), а из точки С вправо проводится горизонтальный отрезок CD (точку D отмечают на частоте 3150 Гц).

Если точка С лежит за пределами нормируемого диапазона частот ($f_c > 3150 \text{ Гц}$), отрезок CD отсутствует.

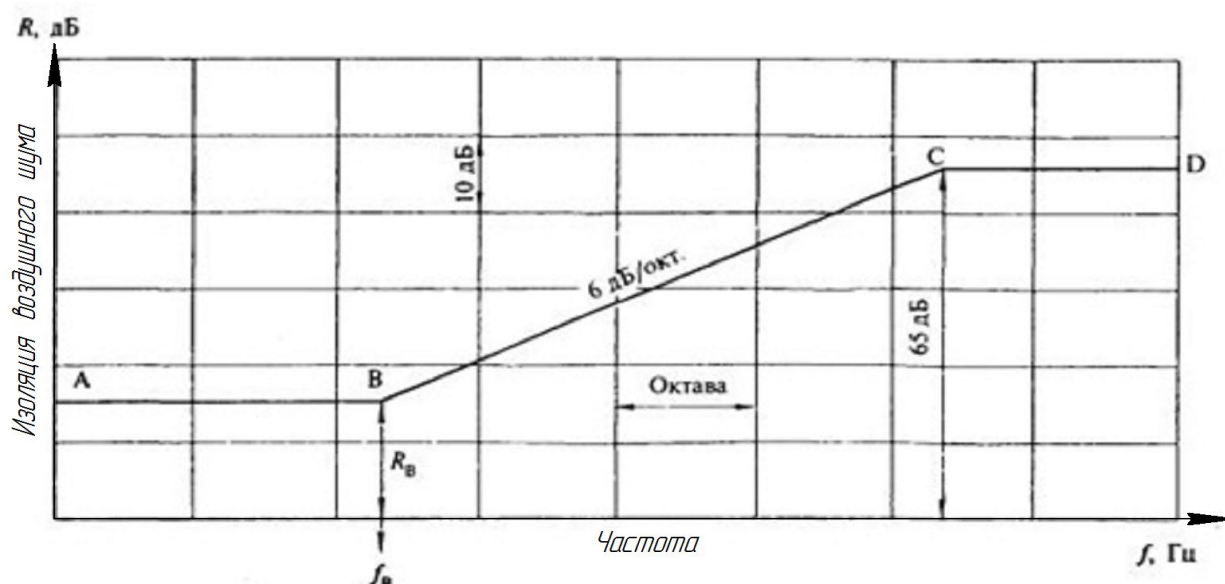


Рис. 7. Частотная характеристика изоляции воздушного шума однослойным ограждением

Таблица 4

Материалы	Плотность, ρ , кг/м ³	f_B , Гц	f_C , Гц	R_B , дБ	R_C , дБ
Сталь	7800	6000/ h	12000/ h	40	32
Алюминиевые сплавы	2500 - 2700	6000/ h	12000/ h	32	22
Стекло силикатное	2500	6000/ h	12000/ h	35	29
Стекло органическое	1200	17000/ h	34000/ h	37	30
Асбоцементные листы	2100	9000/ h	18000/ h	35	29
	1800	9000/ h	18000/ h	34	28
	1600	10000/ h	20000/ h	34	28
Гипсокартонные листы (ГКЛ), гипсоволокнистые листы (ГВЛ)	1100	19000/ h	38000/ h	36	30
	850	19000/ h	38000/ h	34	28
Древесно-стружечные плиты (ДСП)	850	13000/ h	26000/ h	32	27
	650	13500/ h	27000/ h	30,5	26
Твердые древесно-волоконистые плиты (ДВП)	1100	19000/ h	38000/ h	35	29

Примечание: h – толщина ограждения, мм.

3.1.1.2. Частотную характеристику изоляции воздушного шума однослойной тонкой ограждающей конструкцией из металла, стекла, асбоцементного листа, ДСП, ГВЛ, ГКЛ) и т.п. материалов изображают в виде ломаной линии ABCD (см. рис. 8).

Координаты точек В и С определяются по табл. 4, при этом значения f_B и f_C округляются до ближайшей среднегеометрической 1/3-октавной полосы (см. табл. 2).

Наклон отрезка АВ принимается 4,5 дБ на октаву, а отрезка CD – – 7,5 дБ на октаву (см. рис. 8).

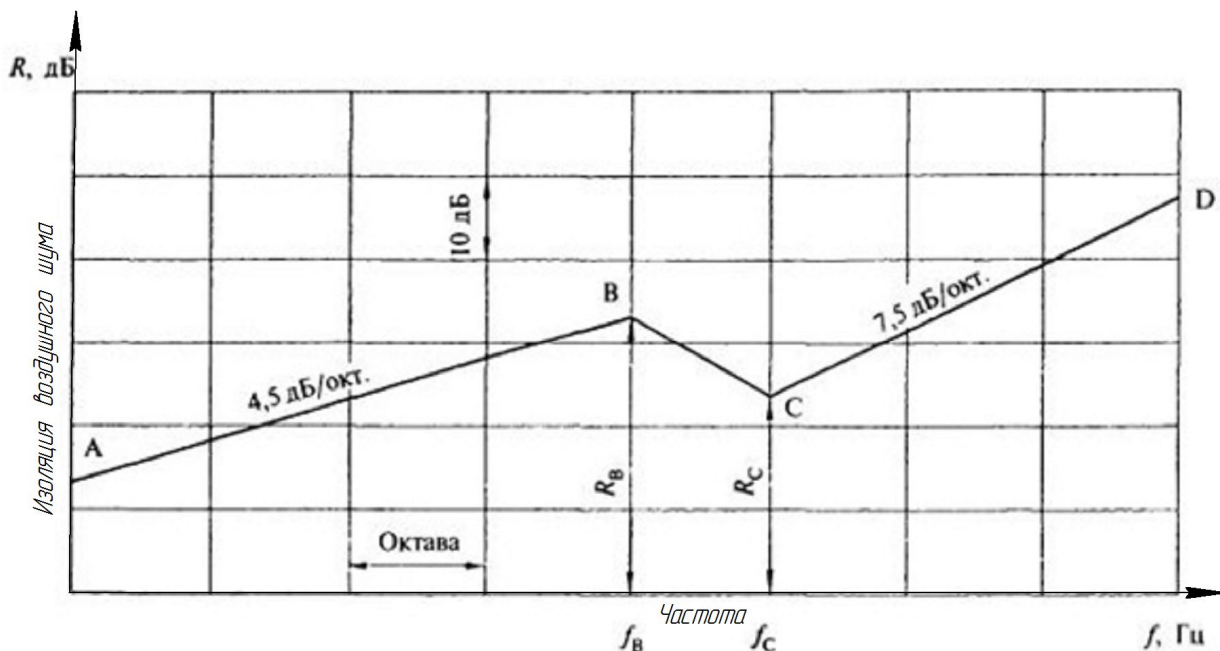


Рис. 8. Частотная характеристика изоляции воздушного шума однослойной тонкой ограждающей конструкцией

3.1.2. Рассмотрим методику определения индекса изоляции воздушного шума ограждающей конструкцией в соответствии с требованиями [1].

Индекс изоляции воздушного шума R_w , дБ ограждающей конструкции с известной (рассчитанной или измеренной) частотной характеристикой изоляции воздушного шума определяются путем сопоставления этой характеристики с нормативным спектром (см. табл. 5).

Значения нормативного спектра изоляции воздушного шума

Показатель	Среднегеометрические частоты 1/3-октавных полос, Гц															
	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
Изоляция воздушного шума, R , дБ	33	36	39	4	45	48	51	52	53	54	55	56	56	56	56	56

Для определения индекса изоляции воздушного шума необходимо определить сумму неблагоприятных отклонений построенной или измеренной частотной характеристики от нормативного спектра. Неблагоприятными считают отклонения вниз от нормативного спектра.

При сопоставлении возможны три случая:

1) если сумма неблагоприятных отклонений максимально приближается по абсолютной величине к 32 дБ, но не превышает эту величину, то $R_w = 52$ дБ;

2) если сумма неблагоприятных отклонений превышает по абсолютной величине 32 дБ, нормативный спектр смещается вниз на целое число децибел так, чтобы сумма неблагоприятных отклонений не превышала указанную величину;

3) если сумма неблагоприятных отклонений значительно меньше 32 дБ или неблагоприятные отклонения отсутствуют, нормативный спектр смещается вверх на целое число децибел так, чтобы сумма неблагоприятных отклонений от смещенного нормативного спектра максимально приближалась по абсолютной величине к 32 дБ, но не превышала эту величину.

За величину индекса R_w принимают ординату смещенного вверх или вниз нормативного спектра в 1/3-октавной полосе со среднегеометрической частотой 500 Гц.

3.1.3. Нормативные значения индексов изоляции воздушного шума внутренними ограждающими конструкциями зданий (R_w^H , дБ) приведены в приложении.

Пример №1. Построить частотную характеристику изоляции воздушно-го шума межквартирной стеновой панелью из керамзитобетона толщиной 160 мм, плотностью $\rho = 1700 \text{ кг/м}^3$. На график нанести нормативный спектр, определить индекс изоляции воздушного шума ограждающей конструкции и сравнить его с нормативным.

Исходные данные представлены в таблице.

Наименование конструкции	Материал ограждения	Плотность, ρ , кг/м ³	Толщина ограждения, h , мм	Расположение ограждающей конструкции
Стеновая панель	Керамзитобетон	1700	160	Межквартирная

Порядок расчета:

1) Определяем координаты точки В (f_B , R_B):

а) абсциссу точки В (f_B) определяем по табл. 1:

$$f_B = \frac{30\,000}{h} = \frac{30\,000}{160} = 187,5 \text{ Гц.}$$

Принимаем $f_B = 200$ Гц по табл. 2.

б) ординату точки В (R_B) определяем по формуле:

$$R_B = 20 \lg m_{\text{э}} - 12 \text{ дБ.}$$

Определяем эквивалентную поверхностную плотность ограждения:

$$m_{\text{э}} = k \cdot m = k \cdot \rho \cdot h = 1,1 \cdot 1700 \cdot 0,16 = 299,2 \text{ кг/м}^2.$$

Коэффициент $k = 1,1$ находим по табл. 3.

$$\text{Тогда } R_B = 20 \cdot \lg 299,2 - 12 = 37,5 \text{ дБ.}$$

2) Строим график частотной характеристики изоляции воздушного шума керамзитобетонной стеновой панелью по методике, изложенной в п.3.1.1.1. На график наносим нормативный спектр, численные значения которого приведены в табл. 5 – см. рис. 9.

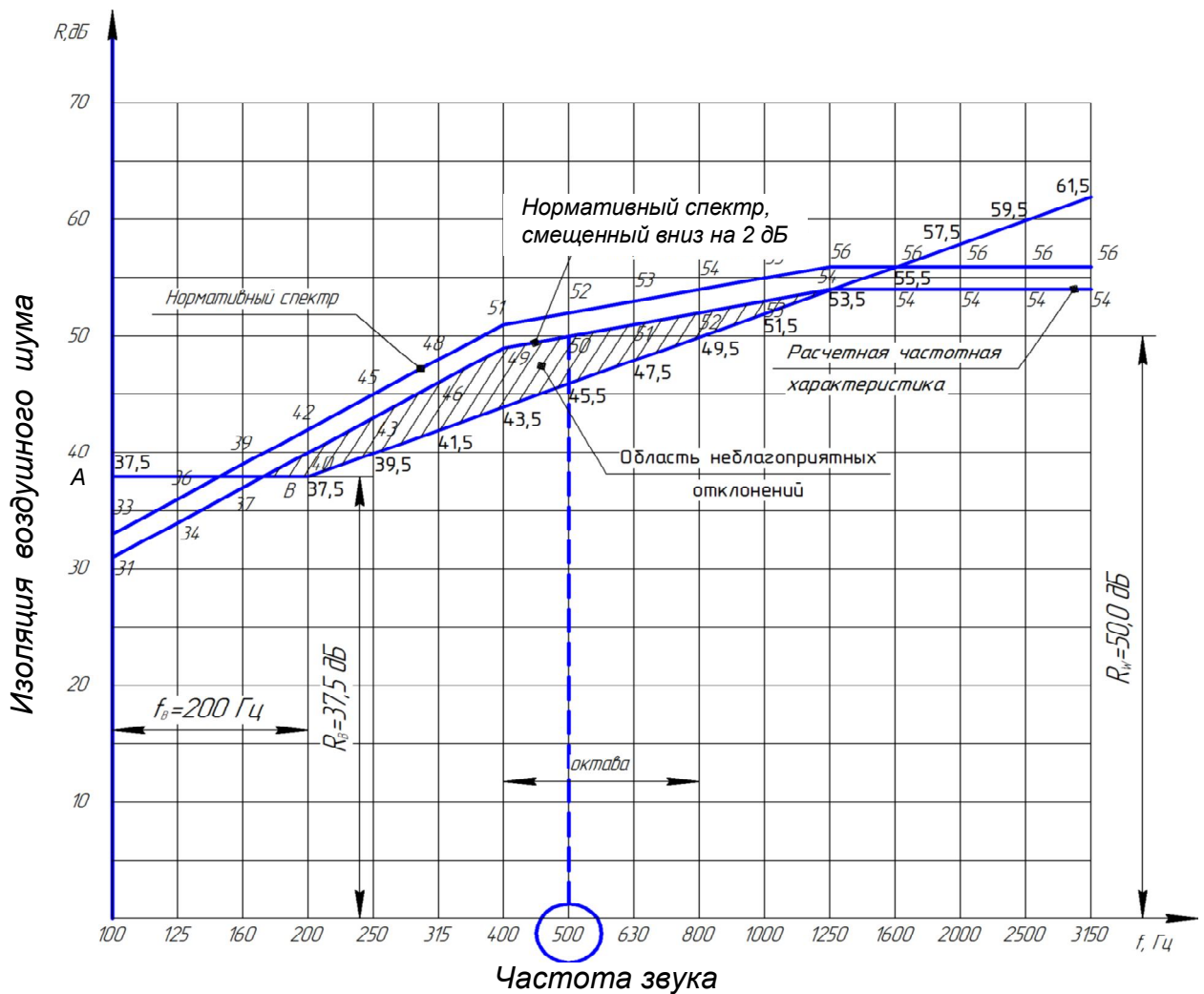


Рис. 9. Расчетная частотная характеристика изоляции воздушного шума керамзитобетонной стеновой панелью толщиной 160 мм и нормативный спектр, к примеру 1

3) Вычисление суммы неблагоприятных отклонений построенной частотной характеристики изоляции воздушного шума стеновой панелью от нормативного спектра и вычисление индекса изоляции воздушного шума рассчитываемой ограждающей конструкцией производим в табличной форме (см. табл. 6). Нормативный спектр смещаем вниз на 2 дБ, т.к. при этом сумма неблагоприятных отклонений равна «-28,5дБ» и максимально приближается по абсолютной величине к значению 32 дБ (2-й случай), см. табл. 6 и рис. 9.

Значение ординаты смещенного вниз нормативного спектра на 2дБ на частоте 500 Гц является величиной индекса изоляции воздушного шума ограждающей конструкцией: $R_w = 50$ дБ.

4) Находим нормативный индекс изоляции воздушного шума по таблице приложения: $R_W^H = 52$ дБ.

Таблица 6

№ П/П	Частота звука f , Гц	Вычисленные значения звукоизоляции, R , дБ	Значения нормативного спектра R_H , дБ	Отклонения вычисленных значений от значений нормативного спектра, дБ	Значения нормативного спектра, смещенного вниз на 2 дБ, дБ	Отклонения вычисленных значений от значений смещенного нормативного спектра, дБ
1	100	37,5	33	+	31	+
2	125	37,5	36	+	34	+
3	160	37,5	39	-1,5	37	+
4	200	37,5	42	-4,5	40	-2,5
5	250	39,5	45	-5,5	43	-3,5
6	315	41,5	48	-6,5	46	-4,5
7	400	43,5	51	-7,5	49	-5,5
8	500	45,5	52	-6,5	50	-4,5
9	630	47,5	53	-5,5	51	-3,5
10	800	49,5	54	-4,5	52	-2,5
11	1000	51,5	55	-3,5	53	-1,5
12	1250	53,5	56	-2,5	54	-0,5
13	1600	55,5	56	-0,5	54	+
14	2000	57,5	56	+	54	+
15	2500	59,5	56	+	54	+
16	3150	61,5	56	+	54	+
				$\sum(\text{небл. откл.}) =$ $= -48,5$ дБ	$\sum(\text{небл.откл.}) =$ $= -28,5$ дБ	

Вывод. Так как $R_W = 50$ дБ $<$ $R_W^H = 52$ дБ, то межквартирная стеновая панель из керамзитобетона толщиной 160 мм и плотностью 1700 кг/м³ не удовлетворяет нормативным требованиям по звукоизоляции [1].

Пример №2. Построить частную характеристику изоляции воздушного шума окном, остекленным одним силикатным стеклом толщиной 8 мм, расположенным между учебным классом и лабораторным кабинетом. Определить индекс изоляции воздушного шума ограждающей конструкцией и сравнить его с нормативным.

Исходные данные представлены в таблице.

Наименование конструкции	Материал ограждения	Плотность, ρ , кг/м ³	Толщина ограждения, h , мм	Расположение ограждающей конструкции
Окно с одинарным остеклением	Стекло силикатное	2 500	8	Между учебным классом и лабораторным кабинетом

Порядок расчета:

1) Определяем координаты точек В и С по табл. 4, при этом значения f_B и f_C округляем до ближайшей среднегеометрической частоты 1/3-октавной полосы (см. табл. 2):

для точки В:

$$f_B = \frac{6\,000}{h} = \frac{6\,000}{8} = 750 \text{ Гц, принимаем по табл. 2 } f_B = 800 \text{ Гц,}$$

$$R_B = 35 \text{ дБ;}$$

для точки С:

$$f_C = \frac{12\,000}{h} = \frac{12\,000}{8} = 1\,500 \text{ Гц, принимаем по табл. 2 } f_C = 1\,600 \text{ Гц,}$$

$$R_C = 29 \text{ дБ.}$$

2) Строим график частотной характеристики изоляции воздушного шума окном с одинарным остеклением по методике, изложенной в п. 3.1.1.2 (см. рис. 8).

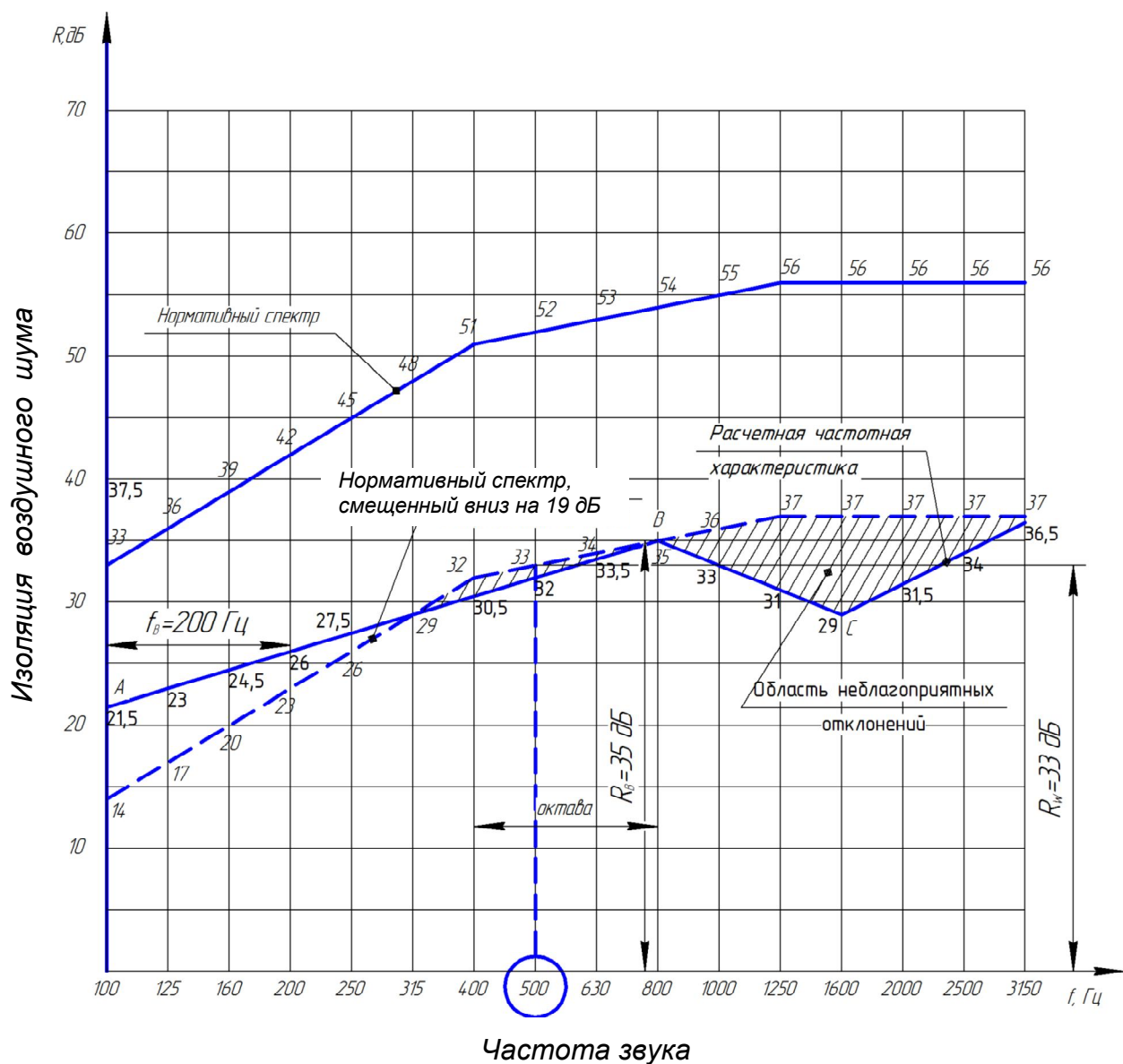


Рис. 10. Расчетная частотная характеристика изоляции воздушного шума окном, заполненным одинарным силикатным стеклом толщиной 8 мм, к примеру 2

Построение расчетной частотной характеристики изоляции воздушного шума в виде ломаной линии ABCD производим в следующей последовательности: соединяем точки В и С прямой ВС, затем из точки В проводим влево отрезок ВА с наклоном 4,5 дБ на октаву, а из точки С вправо – отрезок CD с наклоном 7,5 дБ на октаву (см. рис. 10).

3) На график наносим нормативный спектр (см. табл. 5).

Таблица 7

№ п/п	Частота звука, f , Гц	Вычисленные значения звукоизоляции, R , дБ	Значения нормативного спектра, R_n , дБ	Отклонения вычисленных значений от значений нормативного спектра, дБ	Значения нормативного спектра, смещенного вниз на 19 дБ, дБ	Отклонения вычисленных значений от значений смещенного нормативного спектра, дБ
1	100	21,5	33	-11,5	14	-
2	125	23,0	36	-13,0	17	-
3	160	24,5	39	-14,5	20	-
4	200	26,0	42	-16,0	23	-
5	250	27,5	45	-17,5	26	-
6	315	29,0	48	-19,0	29	0,0
7	400	30,5	51	-20,5	32	-1,5
8	<u>500</u>	32,0	52	-20,0	<u>33</u>	-1,0
9	630	33,5	53	-19,5	34	-0,5
10	800	35,0	54	-19,0	35	0,0
11	1000	33,0	55	-22,0	36	-3,0
12	1250	31,0	56	-25,0	37	-6,0
13	1600	29,0	56	-27,0	37	-8,0
14	2000	31,5	56	-24,5	37	-5,5
15	2500	34,0	56	-22,0	37	-3,0
16	3150	36,5	56	-19,5	37	-0,5
				Σ (небл. откл.) =		
				= -310,5 дБ	Σ (небл.откл.)=	
					= -29 дБ	

4) Вычисление суммы неблагоприятных отклонений построенной частотной характеристики изоляции воздушного шума окном, остекленным одним силикатным стеклом толщиной 8 мм, от нормативного спектра и вычисление индекса изоляции воздушного шума данной ограждающей конструкцией производим в табличной форме (см. табл. 7). Нормативный спектр смещаем вниз на 19 дБ, т.к. при этом сумма неблагоприятных отклонений, равная «-29 дБ», по абсолютной величине максимально приближается к значению 32 дБ (2-й случай, см. табл. 7 и рис. 10).

5) За расчетную величину индекса изоляции воздушного шума принимаем ординату смещенного вниз на 19 дБ нормативного спектра на частоте 500 Гц: $R_w = 33$ дБ.

6) По приложению находим нормативный индекс изоляции воздушного шума: $R_w^H = 48$ дБ.

Вывод. Так как индекс изоляции воздушного шума $R_w = 33$ дБ меньше нормативного $R_w^H = 48$ дБ, то окно с одинарным остеклением из силикатного стекла толщиной 8 мм, расположенное между учебным классом и лабораторным кабинетом, не удовлетворяет нормативным требованиям по звукоизоляции [1].

4 Расчет звукоизоляции однослойных ограждающих конструкций конечных размеров по теории самосогласования волновых полей

4.1 Определение физико-механических характеристик однослойного ограждения

4.1.1. На начальном этапе расчета устанавливаются основные параметры ограждающей конструкции: размеры в плане (ширина, длина), толщина, а также характеристики материала конструкции: плотность, модуль упругости, коэффициент Пуассона и коэффициент потерь. Эти параметры можно представить в табличной форме (см. табл. 8).

Исходные данные звукоизолирующего ограждения

Характеристики ограждения		Характеристики материала ограждения			
Размеры в плане, $a \times b$, м	Толщина, h , м	Плотность, ρ , кг/м ³	Модуль упругости, E , Па	Коэффициент Пуассона, ν	Коэффициент потерь, η

4.1.2. Вычисление поверхностной плотности, кг/м², производится по формуле:

$$\mu = \rho \cdot h, \quad (19)$$

а цилиндрической жесткости ограждения, Па м³ – по формуле (5):

$$D = \frac{E \cdot h^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)}.$$

4.2 Определение граничных частот областей резонансного прохождения звука для ограждения

Для большинства применяемых в гражданском строительстве ограждений в нормируемом диапазоне частот (100 ÷ 3150 Гц) находятся области неполных и полных пространственных резонансов (НПР и ППР).

Расчеты проводятся по теории самосогласования волновых полей [15] – [17] (см. табл. 9). Полученные значения округляются до ближайшей среднегеометрической 1/3-октавной частоты.

Таблица 9

Вычисление граничных частот областей резонансного прохождения звука через ограждение

Диапазон частот	Граничная частота, Гц
Область НПР	$f_{\Gamma mn_0} = \frac{c_0 \sqrt{a^2 + 4b^2}}{4ab} + \Delta f_{\Gamma mn_0}$
Область ППР	$f_{\Gamma mn} = \frac{c_0^2}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu}{D}}$

Граничная частота области НПР вычисляется с учетом поправки на дискретность частот собственных колебаний ограждения конечных размеров [16]:

$$\Delta f_{\Gamma mn} = \frac{\pi \cdot O_{mn}}{b^2} \sqrt{\frac{D}{\mu}} \left(n_n + \frac{O_{mn}}{2} \right), \quad (20)$$

где $n_n = \frac{b}{a} \cdot \sqrt{\frac{c_0 \cdot a \cdot \sqrt{a^2 + 4 \cdot b^2}}{\pi \cdot 2b}} \cdot \sqrt{\frac{\mu}{D}} - 1$;

$O_{mn} = n - n_n$ – нерегулярная ступенчатая функция со значениями от 0 до 1; здесь n – целое число, ближайшее большее к n_n .

4.3 Расчет звукоизоляции однослойной ограждающей конструкции

4.3.1. Расчет звукоизоляции исследуемого ограждения проводится по теории самосогласования волновых полей для областей частот НПР и ППР (см. табл. 10).

Таблица 10

Вычисление звукоизоляции ограждающей конструкции

Диапазон частот	Звукоизоляция, дБ
Область НПР	$R = 10 \lg \frac{0,56 \cdot 10^{-4} \mu^2 f^2}{2,61 \cdot F_{\text{И}}^2 + 0,586 \cdot \frac{A_0^4}{\eta}}$
Область ППР	$R = 10 \lg \frac{0,56 \cdot 10^{-4} \mu^2 f^2}{2,61 \cdot F_{\text{И}}^2 + 0,63 \cdot \frac{f_{\Gamma mn} \cdot \bar{s}_{mn}}{f \cdot \eta}}$

В знаменателе всех выражений, приведенных в табл. 10, первое слагаемое характеризует инерционное прохождение звука через ограждающую конструкцию, а второе слагаемое – резонансное прохождение звука.

4.3.2. Величина характеристики самосогласования волновых полей A_0 определяется в соответствии с требованиями [17] – см. табл. 11.

В области ППР характеристика самосогласования $A_{mn} = 1$ и прохождение звука через панель определяется величиной усредненного коэффициента излучения \bar{s}_{mn} [17]. Здесь $\Delta f = f_B - f_H$ – ширина полосы пропускания звука.

Таблица 11

Вычисление характеристики самосогласования волновых полей и коэффициента излучения звука

Диапазон частот	Характеристика самосогласования
Область НПР	$A_0^2 = m_{0\max} \frac{n^2}{(n^2 - n_{0\text{cp}}^2)^2} + n_{0\max} \frac{m^2}{(m^2 - m_{0\text{cp}}^2)^2}$
Область ППР	$\bar{s}_{mn} = \frac{1}{\Delta f} \left(f_B \sqrt{1 - \frac{f_{\Gamma mn}}{f_B}} - f_H \sqrt{1 - \frac{f_{\Gamma mn}}{f_H}} \right)$

4.3.3. Величины m , n и m' , n' характеризуют волновое поле собственных колебаний ограждения. Величины $m_{0\max}$, $n_{0\max}$ и $m_{0\text{cp}}$, $n_{0\text{cp}}$ являются характеристиками звукового поля в плоскости рассматриваемого ограждения. Значения данных величин определяются по формулам, приведенным в табл. 12.

Таблица 12

Вычисление характеристик волновых полей

Характеристики собственного волнового поля ограждения	Характеристики звукового поля
$m^2 = a^2 \left(\frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{\mu}{D}} \cdot f - \frac{n_{0\text{cp}}^2}{b^2} \right)$	$n_{0\text{cp}}^2 = \left(\frac{n_{0\max}}{2} \right)^2 ;$
$n^2 = b^2 \left(\frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{\mu}{D}} \cdot f - \frac{m_{0\text{cp}}^2}{a^2} \right)$	$m_{0\text{cp}}^2 = \left(\frac{m_{0\max}}{2} \right)^2$
	$n_{0\max} = b \sqrt{\frac{4f^2}{c_0^2} - \frac{1}{a^2}} ;$
	$m_{0\max} = a \sqrt{\frac{4f^2}{c_0^2} - \frac{1}{b^2}}$

Анализируя формулы табл. 12, можно видеть, что резонансным прохождением звука через ограждающую конструкцию можно управлять, изменяя ха-

рактическую характеристику самосогласования волновых полей A_0 и коэффициент потерь материала η .

В табл. 13 приведены значения характеристик звукового поля для различных размеров ограждений, вычисленные по формулам табл. 12.

Таблица 13

Характеристики звукового поля в плоскости ограждения

Размеры ограждения, $a \times b$, м	Наименование характеристик звукового поля	Величина характеристик звукового поля при среднегеометрических значениях частот полосы пропускания звука, Гц						
		100	125	160	200	250	315	400
1,2×1,0	$m_{0\max}$	0	0	0	0,71	1,26	1,84	2,51
	$n_{0\max}$	0	0	0,41	0,81	1,19	1,63	2,17
1,8×1,0	$m_{0\max}$	0	0	0	1,07	1,90	2,76	3,78
	$n_{0\max}$	0,17	0,47	0,75	1,02	1,34	1,75	2,26
2,0×2,0	$m_{0\max}$	0,59	1,05	1,57	2,10	2,73	3,52	4,54
	$n_{0\max}$	0,59	1,05	1,57	2,10	2,73	3,52	4,54
2,5×2,0	$m_{0\max}$	0,74	1,32	1,96	2,62	3,41	4,40	5,68
	$n_{0\max}$	0,84	1,21	1,68	2,18	2,79	3,57	4,58
3,0×2,0	$m_{0\max}$	0,89	1,58	2,35	3,15	4,09	5,29	6,81
	$n_{0\max}$	0,95	1,29	1,74	2,23	2,83	3,60	4,60
3,0×2,5	$m_{0\max}$	1,27	1,82	2,52	3,28	4,19	5,36	6,87
	$n_{0\max}$	1,19	1,61	1,17	2,78	3,54	4,50	5,75
4,0×3,0	$m_{0\max}$	1,91	2,58	3,47	4,46	5,66	7,20	9,21
	$n_{0\max}$	1,57	2,05	2,69	3,41	4,30	5,44	6,94
5,0×2,5	$m_{0\max}$	2,11	3,03	4,20	5,46	6,99	8,94	11,45
	$n_{0\max}$	1,36	1,75	2,27	2,86	3,60	4,55	5,79

Величина характеристик звукового поля при среднегеометрических значениях частот полосы пропускания звука, Гц										
500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
3,28	4,22	5,45	6,87	8,64	11,10	13,90	17,40	21,94	27,8	34,8
2,78	3,56	4,57	5,75	7,21	9,26	11,60	14,51	18,29	23,2	29,0
4,91	6,34	8,18	10,3	12,96	16,65	20,85	26,10	32,92	41,8	52,2
2,85	3,62	4,62	5,79	7,24	9,29	11,60	14,52	18,31	23,2	29,0
5,73	7,26	9,25	11,5	14,50	18,58	23,23	29,05	36,61	46,5	58,3
5,73	7,26	9,25	11,5	14,50	18,58	23,23	29,05	36,61	46,5	58,1
7,16	9,07	11,5	14,4	18,13	23,22	29,04	36,32	45,77	58,1	72,6
5,76	7,28	9,27	11,6	14,51	18,59	23,24	29,06	36,62	46,5	58,1
8,59	10,8	13,8	17,3	21,75	27,87	34,85	43,58	54,92	69,7	87,2
5,78	7,30	9,28	11,6	14,52	18,59	23,25	29,06	36,62	46,5	58,1
8,64	10,9	13,9	17,4	21,77	27,88	34,86	43,59	54,93	69,7	87,2
7,22	9,12	11,6	14,5	18,15	23,24	29,06	36,33	45,78	58,1	72,6
11,5	14,5	18,5	23,2	29,04	37,19	46,49	58,12	73,24	93,0	116
8,69	10,9	13,9	17,4	21,79	27,90	34,88	43,60	54,94	69,7	87,2
14,4	18,2	23,1	29,0	36,28	46,47	58,11	72,65	91,55	116	145
7,25	9,14	11,6	14,5	18,16	23,25	29,07	36,33	45,78	58,1	72,6

4.3.4. Инерционное прохождение звука определяется поверхностной массой и функцией отклика ограждения $F_{и}$ [17]. Эта величина имеет численные значения $(0,2 \div 1,0)$, зависит от размеров панели в плане и от частоты звука. Значения функции отклика в нормируемом диапазоне частот для различных размеров строительных панелей можно определить по табл. 14.

Функция отклика ограждения

Размеры Огражде- ния, а×b, м	Величина функции отклика ($F_{и}$) при среднегеометрических значениях частот полосы пропускания звука, Гц						
	100	125	160	200	250	315	400
1,2×1,0	0,454	0,334	0,266	0,412	0,833	1,010	0,774
1,8×1,0	0,388	0,284	0,313	0,648	0,999	0,911	0,720
2,0×2,0	0,320	0,667	1,014	0,870	0,714	1,008	0,818
2,5×2,0	0,436	0,862	0,994	0,758	0,837	0,949	0,939
3,0×2,0	0,547	0,954	0,943	0,717	0,945	0,869	1,006
3,0×2,5	0,833	1,013	0,774	0,809	0,976	0,885	0,872
4,0×3,0	1,013	0,802	0,809	0,977	0,873	0,885	0,928
5,0×2,5	1,011	0,897	0,734	1,009	0,828	0,978	1,005

Окончание табл. 14

Величина функции отклика при среднегеометрических значениях частот полосы пропускания звука, Гц										
500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
0,81	0,96	0,911	0,872	0,927	0,917	1,00	0,96	1,002	1,00	0,97
0,99	0,83	0,985	0,999	0,999	0,952	0,99	0,99	0,964	0,99	0,99
0,97	1,00	0,994	0,936	1,002	0,975	0,99	0,99	0,987	0,99	0,99
0,86	0,90	0,932	1,000	0,991	0,968	0,99	0,98	0,981	0,98	0,98
0,93	0,94	1,003	0,939	0,954	0,998	0,99	1,00	0,998	0,98	1,00
0,92	0,91	1,001	0,966	0,997	1,001	0,97	0,99	0,983	1,00	0,99
0,92	0,98	0,965	0,997	0,971	0,973	0,99	0,98	0,987	0,99	0,99
1,00	0,94	0,997	0,994	0,977	0,985	0,98	0,98	0,999	0,99	1,00

4.3.5. Построение частотных характеристик звукоизоляции ограждения.

По результатам вычислений звукоизоляции строительной панели строится график частотных зависимостей для нормируемого диапазона частот. Для контроля проводимых построений на этот график также наносятся стрелки, соответствующие граничным частотам рассматриваемых областей ($f_{\Gamma mn0}$, $f_{\Gamma mn}$ и $f'_{\Gamma mn0}$, $f'_{\Gamma mn}$).

Таким образом, получаем частотную характеристику звукоизоляции ограждающей конструкции $R(f)$.

4.4 Пример расчета звукоизоляции однослойной ограждающей конструкции конечных размеров

Задание: построить частотную характеристику звукоизоляции гипсобе-тонной панели.

Исходные данные:

Таблица 15

Характеристики ограждения		Характеристики материала ограждения			
Размеры в плане, $a \times b$, м	Толщина, h , м	Плотность, ρ , кг/м ³	Модуль упругости, E , Па	Коэффициент Пуассона, ν	Коэффициент потерь, η
1,8×1,0	0,08	1040	$1,43 \cdot 10^9$	0,2	$1,3 \cdot 10^{-2}$

4.4.1 Вычисляем поверхностную плотность панели по формуле (19):

$\mu = \rho \cdot h = 1040 \text{ кг/м}^3 \cdot 0,08 \text{ м} = 83,2 \text{ кг/м}^2$ и ее цилиндрическую жесткость по формуле (5):

$$D = \frac{Eh^3}{12 \cdot (1-\nu^2)} = \frac{1,43 \cdot 10^9 \text{ Па} \cdot (0,08 \text{ м})^3}{12 \cdot (1-0,2^2)} = 61\,635 \text{ Па м}^3 \text{ (кг м}^2/\text{с}^2\text{)}.$$

4.4.2. Вычисление граничных частот областей НПР и ППР проводим в табличной форме:

Диапазон частот	Граничная частота, Гц
Область НПР	$f_{\Gamma mn_0} = \frac{344\text{м/с} \cdot \sqrt{(1,8\text{м})^2 + 4 \cdot (1\text{м})^2}}{4 \cdot 1,8\text{м} \cdot 1\text{м}} +$ $+ \Delta f_{\Gamma mn_0} = 129 \text{ Гц} + 56 \text{ Гц} = 185 \text{ Гц}$
Область ППР	$f_{\Gamma mn} = \frac{(344\text{м/с})^2}{2 \cdot 3,14} \sqrt{\frac{83,2\text{кг/м}^2}{61635\text{кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}^2}} =$ $= 692 \text{ Гц}$

Поправку к граничной частоте области НПР вычисляем в соответствии с формулой (20):

$$\Delta f_{\Gamma mn} = \frac{\pi \cdot O_{mn}}{b^2} \sqrt{\frac{D}{\mu}} \left(n_H + \frac{O_{mn}}{2} \right) = \frac{3,14 \cdot 0,358}{(1\text{м})^2} \sqrt{\frac{61635\text{кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}^2}{83,2\text{кг/м}^2}} \left(1,642 + \frac{0,358}{2} \right) =$$

$$= 56 \text{ Гц};$$

$$\text{здесь } n_H = \frac{b}{a} \cdot \sqrt{\frac{c_0 \cdot a \cdot \sqrt{a^2 + 4 \cdot b^2}}{\pi \cdot 2b}} \cdot \sqrt{\frac{\mu}{D}} - 1 =$$

$$= \frac{1\text{м}}{1,8\text{м}} \cdot \sqrt{\frac{344\text{м/с} \cdot 1,8\text{м} \cdot \sqrt{(1,8\text{м})^2 + 4 \cdot (1\text{м})^2}}{3,14 \cdot 2 \cdot (1\text{м})}} \cdot \sqrt{\frac{83,2\text{кг/м}^2}{61635\text{кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}^2}} - 1 = 1,642;$$

$$\text{при этом } O_{mn} = 2 - 1,642 = 0,358$$

$$\Delta f'_{\Gamma mn} = \frac{\pi \cdot O'_{mn}}{b^2} \sqrt{\frac{D'}{\mu'}} \left(n'_H + \frac{O'_{mn}}{2} \right) = \frac{3,14 \cdot 0,228}{(1\text{м})^2} \sqrt{\frac{7943\text{кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}^2}{75,7\text{кг/м}^2}} \left(2,772 + \frac{0,228}{2} \right) =$$

$$= 21 \text{ Гц};$$

$$\text{здесь } n'_H = \frac{b}{a} \cdot \sqrt{\frac{c_0 \cdot a \cdot \sqrt{a^2 + 4 \cdot b^2}}{\pi \cdot 2b}} \cdot \sqrt{\frac{\mu'}{D'}} - 1 =$$

$$= \frac{1\text{м}}{1,8\text{м}} \cdot \sqrt{\frac{344\text{м/с} \cdot 1,8\text{м} \cdot \sqrt{(1,8\text{м})^2 + 4 \cdot (1\text{м})^2}}{3,14 \cdot 2 \cdot (1\text{м})}} \cdot \sqrt{\frac{75,7\text{кг/м}^2}{7943\text{кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}^2}} - 1 = 2,772;$$

$$\text{при этом } O'_{mn} = 3 - 2,772 = 0,228.$$

Таким образом, частотные области прохождения звука через гипсобетонную панель выглядят следующим образом:

Таблица 17

Диапазон частот	Граничная частота, Гц
Область НПР	200 ÷ 630
Область ППР	800 ÷ 5000

Значения граничных частот округляются до ближайшей среднегеометрической частоты полосы пропускания звука.

4.4.3. Собственную звукоизоляцию гипсобетонной панели определяем по формулам табл. 10.

Таблица 18

	Звукоизоляция ограждения, R , дБ, при среднегеометрических значениях частот полосы пропускания звука, Гц						
	100	125	160	200	250	315	400
$D/\mu = 740,8 \text{ м}^4/\text{с}^2$ ($h = 80 \text{ мм}$)	31,3	33,1	34,1	33,9	32,6	33,0	33,5

Окончание табл. 18

Звукоизоляция ограждения, R , дБ, при среднегеометрических значениях частот полосы пропускания звука, Гц										
500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
33,6	29,2	35,1	39,6	42,8	46,1	48,9	51,7	54,6	57,5	60,1

4.4.4. Значения характеристик самосогласования волновых полей и коэффициента излучения звука вычисляются по формулам табл. 11.

Таблица 19

Величины характеристик самосогласования A_0^4 (для частот 100÷630 Гц) и коэффициента излучения \bar{S}_{mn} (для частот 800÷5000 Гц) при среднегеометрических значениях частот полосы пропускания звука, Гц						
100	125	160	200	250	315	400
0,335	0,369	0,491	0,113	0,239	0,378	0,571

Окончание табл. 19

Величины характеристики самосогласования A_0^4 (для частот 100÷630 Гц) и коэффициента излучения \bar{S}_{mn} (для частот 800÷5000 Гц) при среднегеометрических значениях частот полосы пропускания звука, Гц										
500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
0,87	1,00	1,75	1,18	1,083	1,042	1,023	1,013	1,00	1,00	1,003

4.4.5. Значения характеристик волновых полей были определены в соответствии с выражениями табл. 12.

Таблица 20

Характеристики волнового поля собственных колебаний ограждения	Величины характеристик волнового поля при среднегеометрических значениях частот полосы пропускания звука, Гц						
	100	125	160	200	250	315	400
m^2	1,79	2,24	2,86	14,32	17,49	21,42	26,20
n^2	1,79	2,24	2,86	4,59	5,57	6,78	8,26
ΔN_p	0,76	0,96	1,22	1,52	1,92	2,41	3,04

Окончание табл. 20

Величины характеристик волнового поля при среднегеометрических значениях частот полосы пропускания звука, Гц										
500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
31,3	37,15	–	–	–	–	–	–	–	–	–
9,84	11,64	–	–	–	–	–	–	–	–	–
3,80	4,83	–	–	–	–	–	–	–	–	–

4.4.6. Значения функции отклика ограждающей конструкции $F_{и}$ для данных размеров в плане определяем по табл. 14.

Таблица 21

Размеры ограждения, $a \times b$, м	Величина функция отклика $F_{и}$ при среднегеометрических значениях частот полосы пропускания звука, Гц						
	100	125	160	200	250	315	400
1,8×1,0	0,388	0,284	0,313	0,648	0,999	0,911	0,720

Окончание табл. 21

Величина функция отклика $F_{и}$ при среднегеометрических значениях частот полосы пропускания звука, Гц										
500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
0,99	0,83	0,985	0,99	0,99	0,95	0,99	0,99	0,96	0,998	0,998

4.4.7. После определения численных значений звукоизоляции гипсобетонной панели строим ее частотную характеристику (рис. 11).

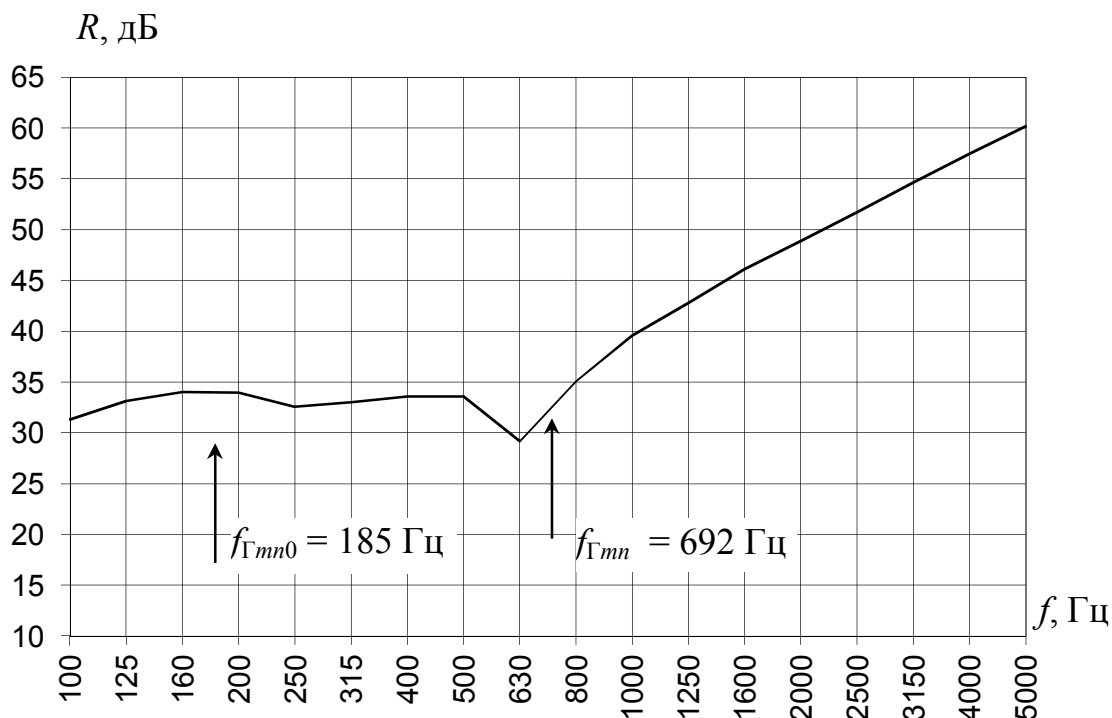


Рис. 11. Теоретическая (расчетная) частотная характеристика звукоизоляции гипсобетонной панели ($h = 80$ мм, $D = 61\ 635$ Па м³)

5 Инженерный метод расчета звукоизоляции ограждающих конструкций с ослабленным поперечным сечением

Для решения задачи изоляции воздушного шума легкими ограждениями без увеличения их массы необходимо прежде всего знать механизм прохождения звука через однослойную пластину, которая является составной частью любой ограждающей конструкции (см. п. 2).

Теория самосогласования волновых полей, устанавливающая двойственную природу прохождения звука через ограждение (резонансное и инерционное), позволяет установить предельные значения звукоизоляции пластины заданной массы, которые определяются инерционным прохождением звука. Предельная звукоизоляция определяется только массой ограждающей конструкции и ее размерами.

Резонансное прохождение звука определяется степенью самосогласования звуковых полей в плоскости ограждения со стороны «шумного» и «тихого» помещений и волнового поля собственных колебаний панели. Чем больше согласование волновых полей, тем более интенсивно пластина излучает звук в резонансном режиме.

Таким образом, резонансное прохождение звука снижает звукоизоляцию ограждающей конструкции относительно ее предельных значений, определяемых инерционным прохождением, что позволяет сделать вывод о необходимости уменьшения прохождения звука в режиме собственных колебаний. Для решения этой задачи необходимо снижение характеристики самосогласования волновых полей, которая определяется поверхностной массой строительной панели, ее цилиндрической жесткостью, геометрическими размерами и частотой звука. Проведенные исследования показали, что для ограждающей конструкции с известной поверхностной массой и заданными размерами можно управлять резонансным прохождением звука путем изменения (уменьшения) ее цилиндрической жесткости. Одним из способов, который позволяет уменьшать цилиндрическую жесткость ограждения, – это ослабление его поперечного сечения (ОПС).

Ограждающая конструкция с ОПС – это однослойная панель с продольными и поперечными прорезями определенного шага и глубины. Шаг и глубина устанавливаются предварительно в зависимости от поверхностной массы и цилиндрической жесткости. Впервые эффект повышения звукоизоляции фанерного листа с пропилами был обнаружен Л. Кремером.

Для конструирования эффективных ограждающих конструкций с ОПС разработан способ повышения звукоизоляции реальных строительных ограждений [19] – [21], который включает в себя расчет звукоизоляции ограждающей конструкции с ОПС, состоящий из нескольких этапов:

- определение оптимальных характеристик ОПС (глубины и шага пропилов каждого конкретного ограждения в зависимости от его физико-

механических характеристик (поверхностной плотности, цилиндрической жесткости, размеров и т. д.);

- определение звукоизоляции ограждающей конструкции в расчетных областях частот до и после ОПС по теории самосогласования волновых полей;

- сравнение частотных характеристик звукоизоляции ограждающей конструкции до и после ОПС – вывод об эффективности применения технологии ОПС для данного ограждения.

Таким образом, разработанный способ ОПС строительных ограждающих конструкций позволяет определять оптимальную степень ослабления сечения в зависимости от предельных значений звукоизоляции. На основании этих данных можно рассчитывать собственную звукоизоляцию ограждений, улучшая ее путем подбора оптимальных характеристик ОПС в зависимости от спектра изолируемого шума.

5.1 Определение физико-механических характеристик ограждений с ОПС

5.1.1. На начальном этапе расчета устанавливаются основные параметры проектируемой ограждающей конструкции: размеры в плане, толщина, а также характеристики материала конструкции: плотность, модуль упругости, коэффициент Пуассона и коэффициент потерь. Эти параметры можно представить в табличной форме (см. табл. 22).

Таблица 22

Исходные данные звукоизолирующего ограждения

Характеристики ограждения		Характеристики материала ограждения			
Размеры в плане, $a \times b$, м	Толщина, h , м	Плотность, ρ , кг/м ³	Модуль упругости, E , Па	Коэффициент Пуассона, ν	Коэффициент потерь, η

5.1.2. Вычисление поверхностной плотности, кг/м², и цилиндрической жесткости ограждения, Па м³, по формулам (19) и (5):

$$\mu = \rho \cdot h; \quad D = \frac{E \cdot h^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)}.$$

5.1.3. Определение оптимальной степени ОПС ограждения (глубина и шаг пропиливания):

- оптимальная толщина ограждения ($h_{\text{ОПТ.}}$), м,

$$h_{\text{ОПТ.}} = \sqrt[3]{\frac{12 \cdot \mu \cdot (1 - \nu^2)}{E \cdot X_1^2}}, \quad (21)$$

где $X_1 = \frac{\beta + \sqrt{\beta^2 - \alpha \cdot \gamma}}{2 \cdot \alpha},$

где α, β, γ – коэффициенты, определяемые по формулам:

$$\alpha = \frac{4f^2}{\pi^2} a^2 b^2 \varphi, \quad \text{где } \varphi = [4,454 \cdot \eta \cdot (1,211 - F_{\text{И}}^2)]^{1/2},$$

$$\beta = \frac{f}{\pi} [2(a^3 z_1 + b^3 z_2) + a^2 b^2 \varphi (z_1^2 + z_2^2)],$$

$$\gamma = (a^3 z_1^3 + b^3 z_2^3) + \frac{1}{4} a^2 b^2 \varphi (z_1^2 + z_2^2)^2,$$

где $z_1 = \left(\frac{4f^2}{c_0^2} - \frac{1}{b^2} \right)^{1/2}, \quad z_2 = \left(\frac{4f^2}{c_0^2} - \frac{1}{a^2} \right)^{1/2},$

где c_0 – скорость звука в воздухе, м/с; f – частота звука, Гц; $F_{\text{И}}$ – функция отклика ограждения (см. табл. 28).

Кроме того, оптимальная толщина назначается с учетом условий работы ограждения и его конструктивного решения (однослойная внутренняя перегородка, обшивка по каркасу или др.) и в зависимости от прочности материала:

$$h_{\text{ОПТ.}} \leq h_{\text{пред. доп.}}^{\min},$$

т.е. поперечное сечение нельзя ослаблять больше минимальной предельно допустимой величины. Обычно для несущих внутренних перегородок назначается:

$$h_{\text{ОПТ.}} \leq \frac{1}{2} h .$$

Таким образом, глубина пропиливания ограждения, м:

$$\delta = h - h_{\text{ОПТ.}} , \quad (22)$$

где h – толщина ограждения в исходном состоянии (до ослабления сечения).

Шаг прорезей, м, определяется, исходя из условия [19]:

$$d < \frac{\lambda_{\text{и}}}{4} , \quad (23)$$

где $\lambda_{\text{и}}$ – длина изгибной волны, м, в ограждении:

$$\lambda_{\text{и}} = 4 \sqrt{\frac{4\pi^2 \cdot D}{\mu \cdot f_{\Gamma mn}^2}} , \quad (24)$$

где $f_{\Gamma mn}$ – граничная частота области полных пространственных резонансов (ППР), Гц.

Для листовых ограждений спектр частот собственных колебаний в области ($f_{\Gamma mn}$), Гц, достаточно плотный, поэтому можно принять, что

$$f_{\Gamma mn} = f_{\Gamma} = \frac{c_0^2}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu}{D}} . \quad (25)$$

Фактическая толщина ограждения, м, после выполнения прорезей на глубину δ определяется как:

$$h' = h - \delta .$$

5.1.4. Вычисление цилиндрической жесткости и поверхностной плотности ограждающей конструкции после ОПС.

Цилиндрическая жесткость (D'), Па м³, ограждения с ОПС определяется по формуле, аналогичной формуле (5):

$$D' = \frac{E \cdot h'^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)} . \quad (26)$$

Поверхностная плотность ограждения с ОПС (μ'), кг/м², изменится в зависимости от размеров выполненных прорезей:

$$\mu' = \frac{\rho}{S} \cdot (V - V_{\text{пр.}}), \quad (27)$$

где $S = a \times b$ – площадь поверхности панели, м^2 ;

$V = a \times b \times h$ – объем панели до ослабления сечения, м^3 ;

$V_{\text{пр.}} = a \times b_{\text{пр.}} \times \delta \times n_{\text{прод.}} + b \times b_{\text{пр.}} \times \delta \times n_{\text{поп.}}$ – объем прорезей, м^3 ,

где a, b – размеры ограждения в плане, м ($a > b$);

$b_{\text{пр.}}, \delta$ – ширина и глубина прорезей соответственно, м ;

$n_{\text{прод.}}, n_{\text{поп.}}$ – количество прорезей в продольном и поперечном направлениях соответственно.

5.2 Определение граничных частот областей резонансного прохождения звука для ограждений ОПС

Для большинства применяемых в гражданском строительстве ограждений в нормируемом диапазоне частот (100 ÷ 5000 Гц) находятся области неполных и полных пространственных резонансов (НПР и ППР). Проведем вычисление граничных частот этих областей для двух случаев – для ограждения без пропилов и для ограждения с расчетным ослаблением сечения по п. 1.3.

Расчеты проводятся по теории самосогласования волновых полей (см. табл. 23). Полученные значения округляются до ближайшей среднегеометрической 1/3-октавной частоты.

Таблица 23

Вычисление граничных частот областей резонансного прохождения звука через ограждение

Диапазон частот	Граничная частота, Гц	
	для ограждающей конструкции до ОПС	для ограждающей конструкции после ОПС
Область НПР	$f_{\Gamma mn_0} = \frac{c_0 \sqrt{a^2 + 4b^2}}{4ab} + \Delta f_{\Gamma mn_0}$	$f'_{\Gamma mn_0} = \frac{c_0 \sqrt{a^2 + 4b^2}}{4ab} + \Delta f'_{\Gamma mn_0}$
Область ППР	$f_{\Gamma mn} = \frac{c_0^2}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu}{D}}$	$f'_{\Gamma mn} = \frac{c_0^2}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu'}{D'}}$

Граничная частота области НПР вычисляется с учетом поправки на дискретность частот собственных колебаний ограждения конечных размеров по формуле (20):

$$\Delta f_{\Gamma mn} = \frac{\pi \cdot O_{mn}}{b^2} \sqrt{\frac{D}{\mu}} \left(n_n + \frac{O_{mn}}{2} \right),$$

где $n_n = \frac{b}{a} \cdot \sqrt{\frac{c_0 \cdot a \cdot \sqrt{a^2 + 4 \cdot b^2}}{\pi \cdot 2b}} \cdot \sqrt{\frac{\mu}{D}} - 1;$

$O_{mn} = n - n_n$ – нерегулярная ступенчатая функция со значениями от 0 до 1; здесь n – целое число, ближайшее большее к n_n .

Для панели с ОПС вместо значений D и μ подставляют значения D' и μ' соответственно.

5.3 Расчет звукоизоляции ограждающих конструкций с ОПС

5.3.1. Расчет звукоизоляции проектируемого ограждения в исходном состоянии (без пропилов) и после ОПС проводится по теории самосогласования волновых полей для областей частот НПР и ППР (см. табл. 24).

Таблица 24

Вычисление звукоизоляции ограждающей конструкции

Диапазон частот	Звукоизоляция, дБ	
	для ограждающей конструкции до ОПС	для ограждающей конструкции после ОПС
Область НПР	$R = 10 \lg \frac{0,56 \cdot 10^{-4} \mu^2 f^2}{2,61 \cdot F_{\text{и}}^2 + 0,586 \cdot \frac{A_0^4}{\eta}}$	$R' = 10 \lg \frac{0,56 \cdot 10^{-4} \mu'^2 f^2}{2,61 \cdot F_{\text{и}}^2 + 0,586 \cdot \frac{A_0'^4}{\eta}}$
Область ППР	$R = 10 \lg \frac{0,56 \cdot 10^{-4} \mu^2 f^2}{2,61 \cdot F_{\text{и}}^2 + 0,63 \cdot \frac{f_{\Gamma mn} \cdot \bar{s}_{mn}}{f \cdot \eta}}$	$R' = 10 \lg \frac{0,56 \cdot 10^{-4} \mu'^2 f^2}{2,61 \cdot F_{\text{и}}^2 + 0,63 \cdot \frac{f'_{\Gamma mn} \cdot \bar{s}'_{mn}}{f \cdot \eta}}$

В знаменателе всех выражений, приведенных в табл. 24, первое слагаемое характеризует инерционное прохождение звука через ограждающую конструкцию, а второе слагаемое – резонансное прохождение звука.

5.3.2. Величина характеристики самосогласования волновых полей A_0 определяется по формулам табл. 25.

В области ППР характеристика самосогласования $A_{mn} = 1$ и прохождение звука через панель определяется величиной усредненного коэффициента излучения \bar{s}_{mn} . Здесь $\Delta f = f_B - f_H$ – ширина полосы пропускания звука.

Таблица 25

**Вычисление характеристики самосогласования волновых полей
и коэффициента излучения звука**

Диапазон частот	Характеристика самосогласования	
	для ограждающей конструкции до ОПС	для ограждающей конструкции после ОПС
Область НПР	$A_0^2 = m_{0\max} \frac{n^2}{(n^2 - n_{0\text{cp}}^2)^2} + n_{0\max} \frac{m^2}{(m^2 - m_{0\text{cp}}^2)^2}$	$A_0'^2 = m_{0\max} \frac{n'^2}{(n'^2 - n_{0\text{cp}}'^2)^2} + n_{0\max} \frac{m'^2}{(m'^2 - m_{0\text{cp}}'^2)^2}$
Область ППР	$\bar{s}_{mn} = \frac{1}{\Delta f} \left(f_B \sqrt{1 - \frac{f_{\Gamma mn}}{f_B}} - f_H \sqrt{1 - \frac{f_{\Gamma mn}}{f_H}} \right)$	$\bar{s}'_{mn} = \frac{1}{\Delta f} \left(f_B \sqrt{1 - \frac{f'_{\Gamma mn}}{f_B}} - f_H \sqrt{1 - \frac{f'_{\Gamma mn}}{f_H}} \right)$

5.3.3. Величины m , n и m' , n' характеризуют волновое поле собственных колебаний ограждения до и после ОПС соответственно. Величины $m_{0\max}$, $n_{0\max}$ и $m_{0\text{cp}}$, $n_{0\text{cp}}$ являются характеристиками звукового поля в плоскости рассматриваемого ограждения. Значения данных величин определяются по формулам, приведенным в табл. 26.

Вычисление характеристик волновых полей

Состояние ограждения	Характеристики собственного волнового поля ограждения	Характеристики звукового поля
До ОПС	$m^2 = a^2 \left(\frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{\mu}{D}} \cdot f - \frac{n_{0\text{cp}}^2}{b^2} \right)$ $n^2 = b^2 \left(\frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{\mu}{D}} \cdot f - \frac{m_{0\text{cp}}^2}{a^2} \right)$	$n_{0\text{cp}}^2 = \left(\frac{n_{0\text{max}}}{2} \right)^2 ;$ $m_{0\text{cp}}^2 = \left(\frac{m_{0\text{max}}}{2} \right)^2$
После ОПС	$m'^2 = a^2 \left(\frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{\mu'}{D'}} \cdot f - \frac{n_{0\text{cp}}^2}{b^2} \right)$ $n'^2 = b^2 \left(\frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{\mu'}{D'}} \cdot f - \frac{m_{0\text{cp}}^2}{a^2} \right)$	$n_{0\text{max}} = b \sqrt{\frac{4f^2}{c_0^2} - \frac{1}{a^2}} ;$ $m_{0\text{max}} = a \sqrt{\frac{4f^2}{c_0^2} - \frac{1}{b^2}}$

Анализируя формулы табл. 26, можно увидеть, что резонансным прохождением звука через ограждающую конструкцию можно управлять, изменяя характеристику самосогласования волновых полей A_0 и коэффициент потерь материала η . При ослаблении поперечного сечения панели граничная частота ППР смещается на более высокие частоты, и область с пониженным прохождением звука (область НПР) расширяется. При этом величина A_0 снижается за счет уменьшения отношения D/μ .

5.3.4. Инерционное прохождение звука определяется поверхностной массой и функцией отклика ограждения $F_{\text{И}}$. Эта величина имеет численные значения (0,2 ÷ 1,0) и зависит от размеров панели в плане и от частоты звука. Значения функции отклика в нормируемом диапазоне частот для различных размеров строительных панелей можно определить по табл. 14.

5.3.5. Построение частотных характеристик изоляции воздушного шума ограждением в исходном состоянии (без пропилов) и после ОПС.

По результатам вычислений звукоизоляции строительной панели строится график частотных зависимостей для нормируемого диапазона частот. Для контроля проводимых построений на этот график также наносятся стрел-

ки, соответствующие граничным частотам рассматриваемых областей ($f_{\Gamma mn0}$, $f_{\Gamma mn}$ и $f'_{\Gamma mn0}$, $f'_{\Gamma mn}$).

Таким образом, получаем две частотные характеристики звукоизоляции ограждающей конструкции – без ОПС (исходный вариант) и после ОПС (искомый вариант).

5.3.6. Сравниваем частотные характеристики звукоизоляции проектируемой ограждающей конструкции с нормативной кривой. В соответствии с требованиями [1] определяем индекс изоляции воздушного шума R_w , дБ для исходной панели и для панели после ОПС.

5.4 Определение эффективности применения ограждающих конструкций с ОПС

На заключительном этапе расчета проводится сравнение теоретической частотной характеристики звукоизоляции панели с ОПС с исходной кривой (для панели без пропилов).

По результатам проведенных сравнений делается вывод об эффективности применения строительной панели с расчетным ослаблением поперечного сечения (заданного по п. 5.1.3.) в зависимости от спектра изолируемого шума.

5.5 Пример расчета звукоизоляции ограждающей конструкции с ОПС

Задание: определить эффект повышения звукоизоляции гипсобетонной панели при ослаблении ее поперечного сечения.

5.5.1. Определение физико-механических характеристик ограждения с ОПС.

Исходные данные:

Таблица 27

Характеристики ограждения		Характеристики материала ограждения			
Размеры в плане, $a \times b$, м	Толщина, h , м	Плотность, ρ , кг/м ³	Модуль Упругости, E , Па	Коэффициент Пуассона, ν	Коэффициент потерь, η
1,8×1,0	0,08	1040	$1,43 \cdot 10^9$	0,2	$1,3 \cdot 10^{-2}$

5.5.1.1. Поверхностную плотность панели и ее цилиндрическую жесткость вычисляем по формулам (19) и (5) соответственно:

$$\mu = 1040 \text{ кг/м}^3 \cdot 0,08 \text{ м} = 83,2 \text{ кг/м}^2;$$

$$D = \frac{E \cdot h^3}{12 \cdot (1 - \mu^2)} = \frac{1,43 \cdot 10^9 \text{ Па} \cdot (0,08 \text{ м})^3}{12 \cdot (1 - 0,2^2)} = 61635 \text{ Па м}^3 \text{ (кг м}^2/\text{с}^2).$$

5.5.1.2. По формуле (21) определяем, что для данного ограждения $h_{\text{опт.}} = 0,27$ м. В жилищном строительстве гипсобетонные панели толщиной 80 мм обычно применяются в качестве межкомнатных перегородок. Так как эти перегородки ненесущие, а материал достаточно прочный, то назначаем глубину пропиливания $\delta = h/2 = 40$ мм. Таким образом, фактическая толщина ограждения с ослабленным сечением составит: $h' = 80 - 40 = 40$ мм = 0,04 м.

Шаг прорезей определяем по формуле (23). Для этого необходимо провести ряд вычислений:

- граничную частоту области полных пространственных резонансов (ППР) для данного ограждения – по формуле (25):

$$f_{\Gamma mn} = f_{\Gamma} = \frac{(344 \text{ м/с})^2}{2 \cdot 3,14} \sqrt{\frac{83,2 \text{ кг/м}^2}{61635 \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}^2}} = 692 \text{ Гц.}$$

- по формуле (24) определяем длину изгибной волны ограждения, соответствующую частоте $f_{\Gamma mn}$:

$$\lambda_{\text{и}} = \sqrt[4]{\frac{4 \cdot (3,14)^2 \cdot 61635 \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}^2}{83,2 \text{ кг/м}^2 \cdot (692 \text{ Гц})^2}} = 0,497 \text{ м,}$$

при этом $\lambda_{\text{и}}/4 = 0,124$ м.

Назначаем шаг прорезей, кратный длинам сторон a и b :

$$d = 0,1 \text{ м} < \lambda_{II}/4 = 0,124 \text{ м}.$$

Таким образом, на рассматриваемой панели необходимо сделать 9 продольных прорезей длиной $a = 1,8$ м и 17 поперечных длиной $b = 1,0$ м. Пропилы наносятся во взаимно перпендикулярных направлениях параллельно сторонам панели. Ширина прорезей принимается, исходя из технологии, но чем меньше она будет, тем лучше. Обычно для этих целей применяется электрическая дисковая пила, для которой ширина пропила $b_{\text{пр.}} \approx 10$ мм. Схема ослабления поперечного сечения гипсобетонной панели показана на рис. 12.

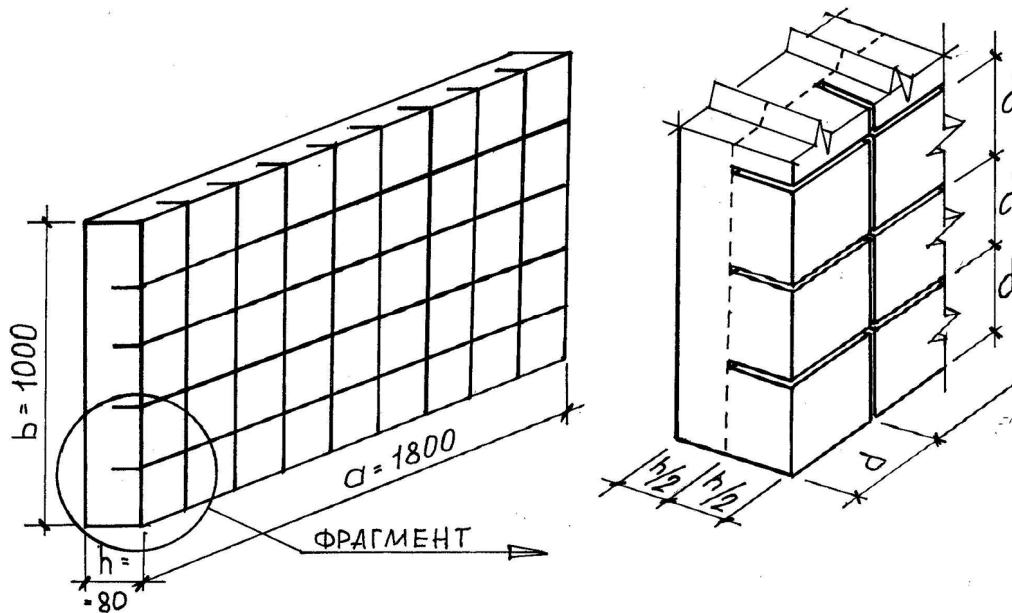


Рис. 12. Схема ослабления поперечного сечения гипсобетонной панели

5.5.1.3. Цилиндрическую жесткость и поверхностную плотность ограждающей конструкции с ОПС определяем по формулам (26) и (27) соответственно:

$$D' = \frac{E \cdot h^3}{12 \cdot (1 - \mu^2)} = \frac{1,43 \cdot 10^9 \text{ Па} \cdot (0,04 \text{ м})^3}{12 \cdot (1 - 0,2^2)} = 7943 \text{ Па м}^3,$$

$$\mu' = \frac{1040 \text{ кг/м}^3}{1,8 \text{ м}^2} \cdot (0,144 \text{ м}^3 - 0,013 \text{ м}^3) = 75,7 \text{ кг/м}^2,$$

где $S = a \times b = 1,8 \text{ м}^2$; $V = 0,144 \text{ м}^3$; $V_{\text{пр.}} = 0,013 \text{ м}^3$.

5.5.2. Вычисление граничных частот областей НПР и ППР приводим в табличной форме:

Таблица 28

Диапазон частот	Граничная частота, Гц	
	для ограждающей конструкции до ОПС	для ограждающей конструкции после ОПС
Область НПР	$f_{\Gamma mn_0} = \frac{344\text{м/с}\sqrt{(1,8\text{м})^2 + 4 \cdot (1\text{м})^2}}{4 \cdot 1,8\text{м} \cdot 1\text{м}} +$ $+ \Delta f_{\Gamma mn_0} = 129 \text{ Гц} + 56 \text{ Гц} =$ $= 185 \text{ Гц}$	$f'_{\Gamma mn_0} = \frac{344\text{м/с}\sqrt{(1,8\text{м})^2 + 4 \cdot (1\text{м})^2}}{4 \cdot 1,8\text{м} \cdot 1\text{м}} +$ $+ \Delta f'_{\Gamma mn_0} = 129 \text{ Гц} + 21 \text{ Гц} =$ $= 150 \text{ Гц}$
Область ППР	$f_{\Gamma mn} = \frac{(344\text{м/с})^2}{2 \cdot 3,14} \sqrt{\frac{83,2\text{кг/м}^2}{61635\text{кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}^2}} =$ $= 692 \text{ Гц}$	$f'_{\Gamma mn} = \frac{(344\text{м/с})^2}{2 \cdot 3,14} \sqrt{\frac{75,7\text{кг/м}^2}{7943\text{кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}^2}} =$ $= 1840 \text{ Гц}$

Поправку к граничной частоте области НПР вычисляем в соответствии с формулой (20):

$$\Delta f_{\Gamma mn} = \frac{\pi \cdot O_{mn}}{b^2} \sqrt{\frac{D}{\mu}} \left(n_H + \frac{O_{mn}}{2} \right) = \frac{3,14 \cdot 0,358}{(1\text{м})^2} \sqrt{\frac{61635\text{кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}^2}{83,2\text{кг/м}^2}} \left(1,642 + \frac{0,358}{2} \right) =$$

$$= 56 \text{ Гц};$$

$$\text{здесь } n_H = \frac{b}{a} \cdot \sqrt{\frac{c_0 \cdot a \cdot \sqrt{a^2 + 4 \cdot b^2}}{\pi \cdot 2b}} \cdot \sqrt{\frac{\mu}{D}} - 1 =$$

$$= \frac{1\text{м}}{1,8\text{м}} \cdot \sqrt{\frac{344\text{м/с} \cdot 1,8\text{м} \cdot \sqrt{(1,8\text{м})^2 + 4 \cdot (1\text{м})^2}}{3,14 \cdot 2 \cdot (1\text{м})}} \cdot \sqrt{\frac{83,2\text{кг/м}^2}{61635\text{кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}^2}} - 1 = 1,642,$$

при этом $O_{mn} = 2 - 1,642 = 0,358$.

$$\Delta f'_{\Gamma mn} = \frac{\pi \cdot O'_{mn}}{b^2} \sqrt{\frac{D'}{\mu'}} \left(n'_H + \frac{O'_{mn}}{2} \right) = \frac{3,14 \cdot 0,228}{(1\text{м})^2} \sqrt{\frac{7943\text{кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}^2}{75,7\text{кг/м}^2}} \left(2,772 + \frac{0,228}{2} \right) =$$

$$= 21 \text{ Гц};$$

$$\text{здесь } n'_H = \frac{b}{a} \cdot \sqrt{\frac{c_0 \cdot a \cdot \sqrt{a^2 + 4 \cdot b^2}}{\pi \cdot 2b}} \cdot \sqrt{\frac{\mu'}{D'}} - 1 =$$

$$= \frac{1\text{м}}{1,8\text{м}} \cdot \sqrt{\frac{344\text{м/с} \cdot 1,8\text{м} \cdot \sqrt{(1,8\text{м})^2 + 4 \cdot (1\text{м})^2}}{3,14 \cdot 2 \cdot (1\text{м})}} \cdot \sqrt{\frac{75,7\text{кг/м}^2}{7943\text{кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}^2}} - 1 = 2,772;$$

при этом $O'_{mn} = 3 - 2,772 = 0,228$.

При рассмотрении полученных данных можно видеть, что ослабление поперечного сечения оказывает наибольшее влияние на величину граничной частоты ППР. При снижении цилиндрической жесткости ограждения с ОПС происходит смещение $f_{\Gamma mn}$ на более высокие частоты, и область НПР расширяется.

Таким образом, частотные области прохождения звука через гипсобетонную панель выглядят следующим образом:

Таблица 29

Диапазон частот	Граничная частота, Гц	
	для ограждающей конструкции до ОПС	для ограждающей конструкции после ОПС
Область НПР	200 ÷ 630	160 ÷ 1600
Область ППР	800 ÷ 5000	2000 ÷ 5000

Значения граничных частот округляются до ближайшей среднегеометрической частоты полосы пропускания звука.

5.5.3. Собственную звукоизоляцию гипсобетонной панели в исходном состоянии и после ОПС определяем по формулам табл. 24.

Таблица 30

Состояние ограждения	$D/\mu, \text{ м}^4/\text{с}^2$	Звукоизоляция ограждения R , дБ, при среднегеометрических значениях частот полосы пропускания звука, Гц						
		100	125	160	200	250	315	400
До ОПС	740,8 ($h = 80$ мм)	31,3	33,1	34,1	33,9	32,6	33,0	33,5
После ОПС	104,9 ($h' = 40$ мм)	37,2	41,4	43,3	37,9	36,4	38,4	40,9

Звукоизоляция ограждения R , дБ, при среднегеометрических значениях частот полосы пропускания звука, Гц										
500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
33,6	29,2	35,1	39,6	42,8	46,1	48,9	51,7	54,6	57,5	60,1
41,1	43,5	44,4	44,0	45,0	43,5	40,4	45,8	49,1	52,3	55,1

5.5.4. Значения характеристик самосогласования волновых полей и коэффициента излучения звука вычисляются по формулам табл. 25.

Таблица 31

Состояние ограждения	Величины характеристики самосогласования A_0^4 (для частот 100÷630 Гц) и коэффициента излучения \bar{s}_{mn} (для частот 800 ÷ 5000 Гц) при среднегеометрических значениях частот полосы пропускания звука, Гц						
	100	125	160	200	250	315	400
До ОПС	0,335	0,369	0,491	0,113	0,239	0,378	0,571
После ОПС	0,016	0,012	0,010	0,014	0,027	0,038	0,047

Окончание табл. 31

Величины характеристики самосогласования A_0^4 (для частот 100÷630 Гц) и коэффициента излучения \bar{s}_{mn} (для частот 800 ÷ 5000 Гц) при среднегеометрических значениях частот полосы пропускания звука, Гц										
500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
0,87	1,00	1,75	1,18	1,083	1,042	1,023	1,013	1,00	1,00	1,003
0,05	0,06	0,08	0,17	0,240	0,629	2,184	1,208	1,09	1,04	1,025

Полученные данные показывают, что для панели с ОПС волновые поля менее самосогласованы, чем для панели в исходном состоянии (без пропилов). Особенно сильно этот эффект проявляется на средних частотах (области НПР и ППР).

5.5.5. Значения характеристик волновых полей m , n и m' , n' были определены в соответствии с выражениями табл. 26.

Таблица 32

Состояние ограждения	Наименование характеристик волнового поля	Величины характеристик волнового поля при среднегеометрических значениях частот полосы пропускания звука, Гц						
		100	125	160	200	250	315	400
До ОПС	m^2	1,79	2,24	2,86	14,32	17,49	21,42	26,20
	n^2	1,79	2,24	2,86	4,59	5,57	6,78	8,26
	ΔN_p	0,76	0,96	1,22	1,52	1,92	2,41	3,04
После ОПС	m'^2	4,62	5,78	7,40	38,36	47,54	59,27	74,27
	n'^2	4,62	5,78	7,40	12,01	14,85	18,47	23,10
	$\Delta N'_p$	1,96	2,48	3,16	3,93	4,96	6,24	7,86

Окончание табл. 32

Величины характеристик волнового поля при среднегеометрических значениях частот полосы пропускания звука, Гц										
500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
31,3	37,15	—	—	—	—	—	—	—	—	—
9,84	11,64	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3,80	4,83	—	—	—	—	—	—	—	—	—
91,4	112,9	139,5	168,9	202,4	243,8	—	—	—	—	—
28,3	35,01	43,24	52,29	62,67	75,41	—	—	—	—	—
9,83	12,48	15,64	19,75	24,87	32,06	—	—	—	—	—

Анализируя данные табл. 32, можно видеть, что после ослабления поперечного сечения гипсобетонной панели, характеристики волнового поля ее собственных колебаний значительно изменились. При снижении цилиндрической жесткости ограждения во всем нормируемом диапазоне частот увеличились значения чисел m и n , т. е. спектр частот собственных колебаний панели уплотнился.

5.5.6. Значения функции отклика ограждающей конструкции $F_{и}$ для данных размеров в плане определяем по табл. 14.

Таблица 33

Размеры ограждения, $a \times b$, м	Величина функция отклика $F_{и}$ при среднегеометрических значениях частот полосы пропускания звука, Гц						
	100	125	160	200	250	315	400
1,8×1,0	0,388	0,284	0,313	0,648	0,999	0,911	0,720

Окончание табл. 33

Величина функция отклика $F_{и}$ при среднегеометрических значениях частот полосы пропускания звука, Гц										
500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
0,99	0,83	0,985	0,99	0,99	0,95	0,99	0,99	0,96	0,998	0,998

5.5.7. После определения численных значений звукоизоляции гипсобетонной панели строим ее частотные характеристики (см. рис. 13).

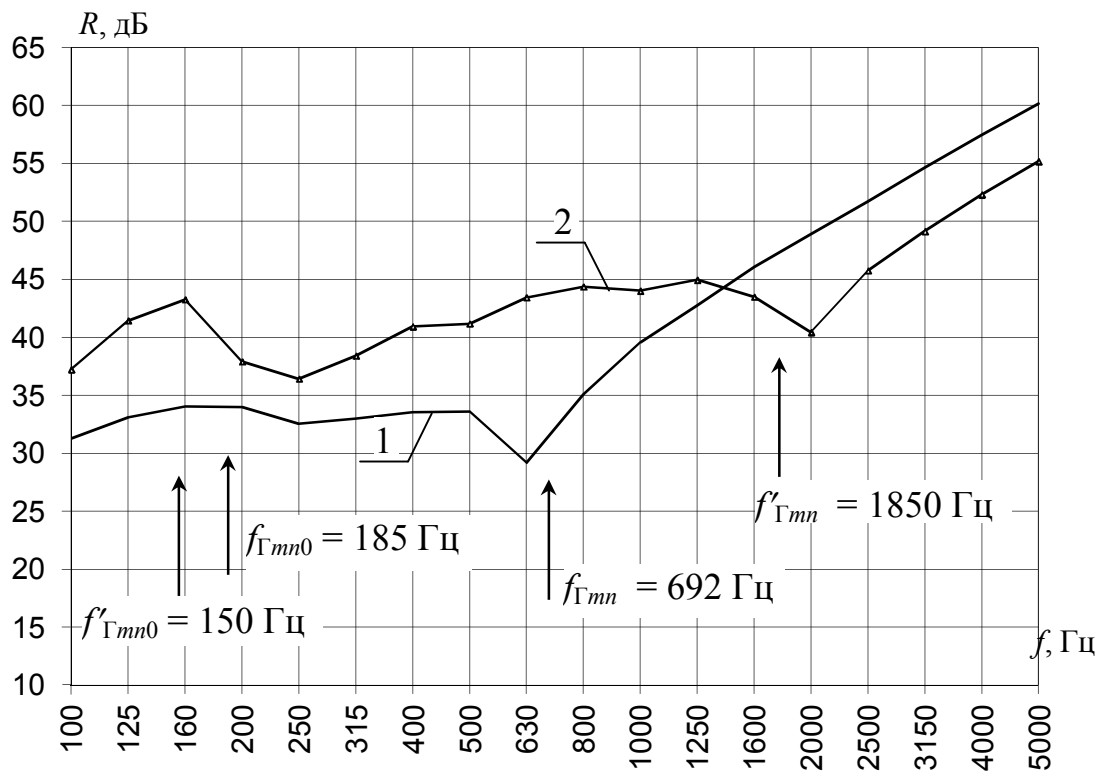


Рис. 13. Теоретические частотные характеристики звукоизоляции гипсобетонной панели: 1 – для панели без ОПС; 2 – для панели после ОПС

5.6. По результатам сравнения рассчитанных частотных характеристик можно видеть, что после ослабления сечения звукоизоляция панели повысилась в области неполных пространственных резонансов, а также на низких частотах. Особенно значительное повышение произошло вблизи граничной частоты ППР $f_{Гmn}$ (на 14 дБ для $f = 630$ Гц). Это произошло за счет смещения $f'_{Гmn}$ на более высокие частоты и расширения области НПР.

Библиографический список

1. СП 51.13330-2011. Защита от шума (Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003).
2. СП 23-103-2003. Проектирование звукоизоляции ограждающих конструкций жилых и общественных зданий.
3. Лорд Рэлей (Дж. У. Стретт). Теория звука: в 2 т. / Пер.с англ. под ред. С.М. Рытова. – М.: Гостехиздат, 1955.–Т.1: 504 с.–Т.2: 427 с.
4. Berger R. Die Luftschalldämpfung von Wänden. Forschung aus dem Gebiete des Ingenieurwesens, 1932, B.3, S. 193-202.
5. Schoch A. Die physicalischen und technischen Grundlagen der Schalldämmung im Bauwesen, Leipzig, 1937.
6. Cremer L. Theorie der Schalldämmung dünner Wände bei schrägem Einfall. Akustische Zeitschrift, 1942, B.7, №3, S.81-104.
7. Sanders F.H. Can. J. Research, Vol. 1, 1939.
8. Лямшев Л.М. Отражение звука тонкими пластинками и оболочками в жидкости. Изд-во АН СССР, 1955.
9. Заборов В.И. Теория звукоизоляции ограждающих конструкций.–М.: Стройиздат, 1969.–185 с.
10. London A. Transmission of Reverberant Sound Through Single Walls. Journal of Research of the National Bureau of Standards, vol. 42, № 6, 1949, p. 605-615.
11. Осипов Г.Л. Шумы и звукоизоляция. М., Госстройиздат, 1967. – 252с.
12. Крокер М.Дж, Баттачария М.К., Прайс А.Дж. Расчет прохождения звука и вибрации через перегородки и соединительные стержни при помощи статического энергетического метода//Конструирование и технология машин: Пер.с англ. – 1971. – 93 В.3. – С.11–18
13. Овсянников, С.Н. Распространение звуковой вибрации в гражданских зданиях. – Томск: Изд-во ТГАСУ, 2000. – 378 с.

14. Ovsyannikov S.N., Koshkin Y.G., Fatyanova A.P. The prediction of sound and vibration in a building using the method of statistical energy analysis // 8th Korea-Russia International Symposium on Science and Technology, KORUS 2004. Tomsk, 2004. – P. 331-335

15. Седов М.С. Проектирование звукоизоляции / М.С. Седов.–Горький: ГГУ им. Н.И. Лобачевского, 1980. – 54 с.

16. Седов М.С. Прогнозирование и измерения звуковой среды: Учеб. пособие / М.С. Седов, В.Н. Бобылев, В.А. Тишков и др. – Н.Новгород: Изд-во ННГУ, 1991. – 67 с.

17. 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

18. Beranek L.L. Noise Reduction, New York-Toronto-London. Mc.Graw-Hill. Book Company.–1960, 752 p.

19. Мониц Д.В. Повышение звукоизоляции ограждающих конструкций зданий и сооружений без увеличения их массы. Автореф. дис. канд. техн. наук. – ННГАСУ. – 2002. – 24 с.

20. Бобылев В.Н., Тишков В.А., Мониц Д.В. Оптимальные параметры звукоизолирующих ограждений // XV сессия Российского акустического общества: сб. тр. М., ГЕОС, 2004. Том III. – С. 135-139.

21. Бобылев В.Н., Тишков В.А., Мониц Д.В., Красов Д.В. О резервах звукоизоляции внутренних ограждающих конструкций зданий // Academia. Архитектура и строительство. – М.: НИИСФ РААСН, 2009. – С. 246-249.

**Требуемые нормативные индексы изоляции воздушного шума
ограждающих конструкций жилых и общественных зданий по СП [1]**

Наименование и расположение ограждающей конструкции	Требуемый норматив- ный индекс изоляции воздушного шума R_w , дБ (не менее)
Жилые здания	
Стены и перегородки между квартирами, между помещениями квартир и офисами; между помещениями квартир и лестничными клетками, холлами, коридорами, вестибюлями	52
Стены между помещениями квартир и магазинами	55
Стены и перегородки, отделяющие помещения квартир от ресторанов, кафе, спортивных залов	57
Перегородки без дверей между комнатами, между кухней и комнатой в квартире	43
Перегородки между санузлом и комнатой одной квартиры	47
Стены и перегородки между комнатами общежитий	50
Входные двери квартир, выходящие на лестничные клетки, в вестибюли и коридоры	32
Гостиницы	
Стены и перегородки между номерами: - гостиницы, имеющие по международной классификации пять и четыре звезды;	53
- гостиницы, имеющие по международной классификации три звезды;	51
- гостиницы, имеющие по международной классификации менее трех звезд	50
Стены и перегородки, отделяющие номера от помещений общего пользования (лестничные клетки, вестибюли, холлы, буфеты): - гостиницы, имеющие по международной классификации пять и четыре звезды;	53
- гостиницы, имеющие по международной классификации три звезды и менее	51

Наименование и расположение ограждающей конструкции	Требуемый нормативный индекс изоляции воздушного шума R_w , дБ (не менее)
Стены и перегородки, отделяющие номера от ресторанов, кафе: - гостиницы, имеющие по международной классификации пять и четыре звезды; - гостиницы, имеющие по международной классификации три звезды и менее	60 57
Административные здания, офисы	
Стены и перегородки между кабинетами и отделяющие кабинеты от рабочих комнат	45
Стены и перегородки между офисами различных фирм, между кабинетами различных фирм	48
Больницы и санатории	
Стены и перегородки между палатами, кабинетами врачей	48
Стены и перегородки между операционными и отделяющие операционные от других помещений	54
Учебные заведения	
Стены и перегородки между классами, кабинетами и аудиториями и отделяющие эти помещения от помещений общего пользования	48
Стены и перегородки между музыкальными классами средних учебных заведений и отделяющие эти помещения от помещений общего пользования	55
Стены и перегородки между музыкальными классами высших учебных заведений	57
Детские дошкольные учреждения	
Стены и перегородки между групповыми комнатами, спальнями и между другими детскими комнатами	47
Стены и перегородки, отделяющие групповые комнаты, спальни от кухонь	52

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1 Звукоизоляция однослойных ограждающих конструкций	4
1.1 Прохождение звука через ограждающие конструкции неограниченной протяженности	5
1.1.1 Нормальное падение звука	5
1.1.2 Наклонное падение звука. Теория Л. Кремера. Волновое совпадение	6
1.1.3 Диффузное падение звуковых волн. Закон масс	11
2 Звукоизоляция однослойных ограждающих конструкций ограниченных размеров	12
3 Расчет звукоизоляции однослойных ограждающих конструкций по стандартной методике графоаналитическим способом	20
3.1 Расчет изоляции воздушного шума однослойными ограждающими конструкциями сплошного сечения	22
4 Расчет звукоизоляции однослойных ограждающих конструкций конечных размеров по теории самосогласования волновых полей	33
4.1 Определение физико-механических характеристик однослойного ограждения	33
4.2 Определение граничных частот областей резонансного прохождения звука для ограждения	34
4.3 Расчет звукоизоляции однослойной ограждающей конструкции	35
4.4 Пример расчета звукоизоляции однослойной ограждающей конструкции конечных размеров	40
5 Инженерный метод расчета звукоизоляции ограждающих конструкций с ослабленным поперечным сечением	45
5.1 Определение физико-механических характеристик ограждений с ОПС	47
5.2 Определение граничных частот областей резонансного прохождения звука для ограждений ОПС	50
5.3 Расчет звукоизоляции ограждающих конструкций с ОПС	51
5.4 Определение эффективности применения ограждающих конструкций с ОПС	54
5.5 Пример расчета звукоизоляции ограждающей конструкции с ОПС	55
Библиографический список	63
Приложение. Требуемые нормативные индексы изоляции воздушного шума ограждающих конструкций жилых и общественных зданий по СП [1]	65

Бобылев Владимир Николаевич
Тишков Владимир Александрович
Монич Дмитрий Викторович

ИЗОЛЯЦИЯ ВОЗДУШНОГО ШУМА
ОДНОСЛОЙНЫМИ ОГРАЖДАЮЩИМИ КОНСТРУКЦИЯМИ

Учебное пособие

Редактор
Н.А. Воронова

Подписано в печать 24.12.2014 г. Формат 60 × 90 1/16.

Бумага типографская. Печать трафаретная.

Уч. изд. л. 3,7. Усл. печ. л. 4,2. Тираж 300 экз.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования «Нижегородский государственный
архитектурно-строительный университет»

603950, г. Нижний Новгород, ул. Ильинская, д. 65. Полиграфический
центр ННГАСУ, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Ильинская, д. 65.