

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

В.Н. БОБЫЛЕВ, Д.В. МОНИЧ,
В.А. ТИШКОВ, П.А. ГРЕБНЕВ

РЕЗЕРВЫ ПОВЫШЕНИЯ
ЗВУКОИЗОЛЯЦИИ ОДНОСЛОЙНЫХ
ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

Нижний Новгород

2014

ББК 38.113

Р 34

Рецензенты:

Овсянников С. Н. – д-р техн. наук, профессор,
заведующий кафедрой архитектуры гражданских и промышленных
зданий ФГБОУ ВПО «Томский государственный
архитектурно-строительный университет» (г. Томск)

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)

Бобылев, В.Н. Резервы повышения звукоизоляции однослойных ограждающих конструкций [Текст]: Монография / В.Н. Бобылев, Д.В. Мониц, В.А. Тишков, П.А. Гребнев. – Нижегород. гос. архит.-строит. ун-т. – Н. Новгород: ННГАСУ, 2014. – 118 с.
ISBN 978-5-87941-998-6

Рассмотрены вопросы повышения звукоизоляции однослойных ограждающих конструкций зданий конечных размеров при диффузном падении звуковых волн. Исследованы внутренние резервы повышения звукоизоляции ограждений с учетом двойственной природы прохождения звука. Разработан метод расчета оптимальных физико-механических параметров однослойных ограждающих конструкций конечных размеров.

Монография предназначена для специалистов в области строительной акустики – научных работников, преподавателей вузов, а также для аспирантов и студентов профильных направлений подготовки.

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

Ил. 72; табл. 3; библиограф. назв. 70

ББК 38.113

ISBN 978-5-87941-998-6

© Коллектив авторов, 2014

© ННГАСУ, 2014

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. Развитие исследований механизма прохождения звука через однослойные ограждающие конструкции	6
1.1. Прохождение звука через ограждающие конструкции бесконечной длины	6
1.2. Прохождение звука через ограждающие конструкции конечных размеров	10
1.3. Влияние цилиндрической жесткости на звукоизоляцию однослойных ограждающих конструкций	14
2. Теоретические исследования звукоизоляции однослойных ограждающих конструкций конечных размеров с ослабленным поперечным сечением	17
2.1. Форма звукового давления в плоскости ограждения	17
2.2. Образование форм собственных колебаний ограждения	20
2.3. Самосогласование волновых полей	22
2.4. Резонансное прохождение звука через ограждение	23
2.5. Излучение звука ограждением в режиме собственных колебаний	31
2.6. Коэффициент резонансного прохождения звука	33
2.7. Поле инерционных волн в ограждении	35
2.8. Инерционное прохождение звука через ограждение	37
2.9. Излучение звука ограждением в режиме инерционных колебаний	38
2.10. Коэффициент инерционного прохождения звука	39
2.11. Звукоизоляция ограждений конечных размеров с ослабленным поперечным сечением с учетом двойственной природы прохождения звука	40

2.12.	Предельная звукоизоляция однослойных ограждающих конструкций конечных размеров	46
3.	Резервы повышения звукоизоляции однослойных ограждающих конструкций конечных размеров	50
3.1.	Введение	50
3.2.	Повышение звукоизоляции однослойных ограждающих конструкций путем использования внутренних резервов	53
3.3.	Оптимальные параметры однослойных ограждающих конструкций конечных размеров	62
3.4.	Звукоизоляция однослойных ограждающих конструкций с ослабленным поперечным сечением	69
3.5.	Инженерный метод расчета звукоизоляции однослойных ограждающих конструкций конечных размеров с ослабленным поперечным сечением	92
4.	Экспериментальные исследования звукоизоляции однослойных ограждающих конструкций с ослабленным поперечным сечением	97
4.1.	Методика исследований	97
4.2.	О надежности и точности измерений звукоизоляции ограждающих конструкций	100
4.3.	Звукоизоляция однослойных легких ограждающих конструкций	102
4.4.	Звукоизоляция однослойных ограждающих конструкций со средней поверхностной плотностью	109
	БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	112

ВВЕДЕНИЕ

Шум окружает человека внутри зданий, на территории застройки, в местах массового отдыха. С каждым годом интенсивность данного негативного фактора возрастает из-за увеличения количества транспортных единиц, технологического и бытового оборудования, уплотнения городской застройки. Защита от шума признана одной из важнейших задач в мире, поскольку акустический комфорт в среде обитания человека непосредственно влияет на его здоровье и в целом на качество жизни.

Одной из основных задач современного строительства является создание ограждающих конструкций с высокими звукоизоляционными свойствами, которые обеспечивают требуемую защиту от шума в помещениях гражданских и промышленных зданий. Для обеспечения экономической эффективности строительства необходимо учитывать требования по снижению массы и толщины ограждений. В связи с этим научное обоснование проектирования однослойных звукоизолирующих ограждающих конструкций с оптимальными параметрами является актуальным и значимым в настоящее время.

В работах С.П. Алексеева, И.И. Боголепова, Л.А. Борисова, В.И. Заборова, Н.И. Иванова, И.И. Клюкина, С.Д. Ковригина, В.Г. Крейтана, С.Н. Овсянникова, Г.Л. Осипова, М.С. Седова, Б.Д. Тартаковского, Э.В. Ретлинга, Е.Я. Юдина разработаны методы расчета и проектирования различных типов звукоизолирующих ограждений. Однако до сих пор остается малоизученным вопрос достижения предельных значений звукоизоляции однослойных ограждающих конструкций конечных размеров путем использования их внутренних резервов.

Теоретические исследования, представленные в данной монографии, проведены на базе теории самосогласования волновых полей, разработанной научной школой профессора М.С. Седова. Экспериментальные исследования проводились в реверберационных камерах лаборатории акустики ННГАСУ.

1. Развитие исследований механизма прохождения звука через однослойные ограждающие конструкции

1.1. Прохождение звука через ограждающие конструкции бесконечной длины

Прохождение звука через однослойную пластину неограниченной протяженности было впервые теоретически рассмотрено Лордом Рэлеем [1]. При этом предполагалось, что плоская звуковая волна падает нормально к плоскости ограждения. Ограждающая конструкция рассматривалась как однородная пластина, толщина которой намного меньше длины продольных волн в материале. Под действием падающей звуковой волны ограждение совершает поршневые колебания и излучает звук. Из этого следовало, что угол падения звуковых волн не имеет принципиального значения, а основное влияние на звукоизоляцию преграды оказывает ее механическое сопротивление, определяемое массой. На основании решений, полученных Лордом Рэлеем, был сформулирован «закон масс», согласно которому увеличение массы пластины в два раза приводит к повышению ее звукоизоляции на 6 дБ.

После проведения многочисленных экспериментальных исследований Р. Бергер [2] установил, что звукоизоляция реальных ограждающих конструкций определяется не только их поверхностной массой, но и другими физико-механическими характеристиками.

При дальнейших исследованиях А. Шох [3] представил пластину как совокупность элементарных частей, независимых друг от друга, каждая из которых представляет собой колебательную систему. Такое рассмотрение позволило установить зависимость собственной звукоизоляции однослойного ограждения от угла падения звуковых волн θ

$$R = 10 \lg \left[1 + \left(\frac{\mu \cdot \omega \cdot \cos \theta}{2 \cdot \rho_0 c_0} \right)^2 \right], \quad (1.1)$$

где μ – поверхностная плотность ограждения;

ω – круговая частота звука;

$\rho_0 c_0$ – характеристический импеданс среды.

Г. Рейснером была рассмотрена задача о звукоизоляции безграничной пластины с учетом сдвиговых и продольных волн [4]. Он установил, что существуют такие углы падения звуковых волн, при которых происходит полное прохождение звука через ограждение. Численные значения этих углов зависят от соотношения толщины пластины, длины сдвиговой и продольной волн в пластине. Однако из-за сложности полученных выражений теория Г. Рейснера не получила практического применения.

Исследователями отмечалось, что экспериментальные значения звукоизоляции реальных ограждающих конструкций значительно расходились с расчетными данными по формуле (1). В области высоких частот это расхождение составляло $10 \div 20$ дБ для различных ограждений. Таким образом, представление пластины в виде колеблющегося поршня или как совокупность несвязанных масс не позволило достоверно определить звукоизоляцию ограждающих конструкций.

В 1942 году Л. Кремер [5] разработал теорию звукоизоляции для бесконечных тонких пластин, в которой учитывались изгибные колебания ограждений. Данная теория основана на явлении волнового совпадения, которое ранее было обнаружено Ф. Сандерсом в области ультразвука [6].

Л. Кремер установил, что при определенных углах падения плоских звуковых волн их фазовая скорость вдоль пластины совпадает с фазовой скоростью изгибных волн в самой пластине. При этом происходит полное прохождение звука через ограждение, и его звукоизоляция резко снижается. На основе эффекта волнового совпадения Дж. Гетцем были объяснены результаты работ Г. Рейснера. Он показал, что полное прохождение звука происходит в случае, если фазовая скорость падающей звуковой волны совпадает с фазовыми скоростями сдвиговых и продольных волн, распространяющихся вдоль пластины [7].

Согласно теории Л. Кремера, весь диапазон частот делится на две области с различными механизмами прохождения звука. Это разделение происходит на граничной частоте волнового совпадения f_T (см. рис. 1.1).

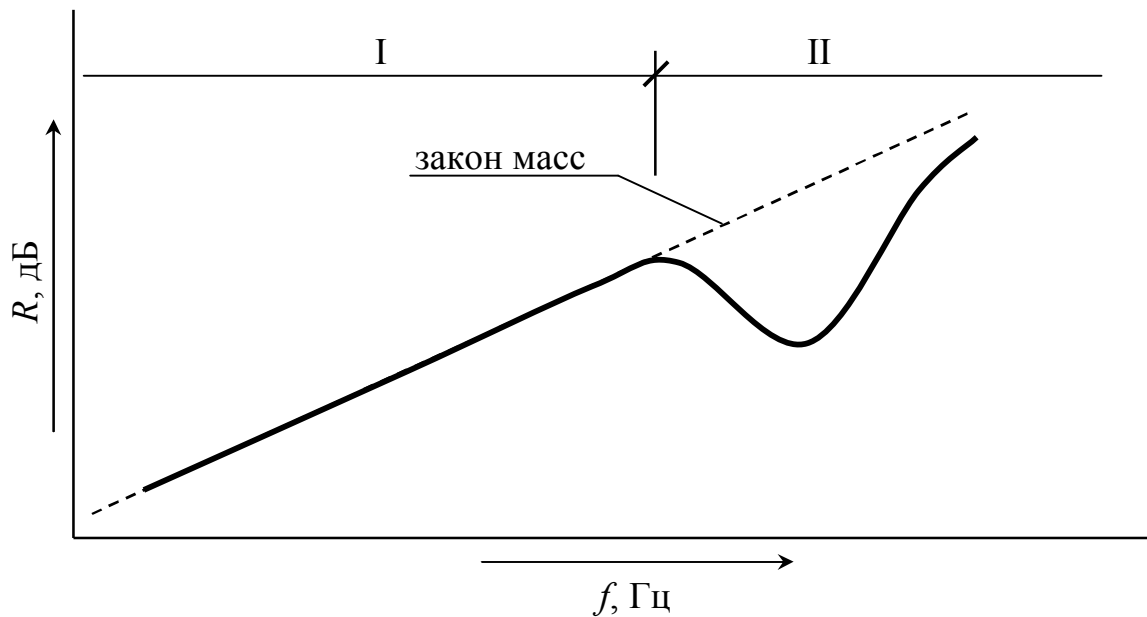


Рис. 1.1. Обобщенная частотная характеристика звукоизоляции однослойного ограждения по Л. Кремеру

В области I (ниже граничной частоты), где эффект волнового совпадения отсутствует, звукоизоляция описывается законом масс

$$R = 20 \lg \left(\frac{\mu \cdot \omega}{2 \cdot \rho_0 \cdot c_0} \right) - 5 \text{ дБ} = 20 \lg(f \cdot \mu) - 47,5 \text{ дБ} . \quad (1.2)$$

Данная формула является преобразованием формулы (1.1) для диффузного падения звука. Кремер рассматривал область вероятных углов падения звуковых волн в пределах $0^\circ \leq \theta \leq 80^\circ$. На частотах выше граничной частоты волнового совпадения (область II) звукоизоляция определяется массой пластины, частотой звука и коэффициентом потерь материала η [5]

$$R = 20 \lg \left(\frac{\pi \cdot f_\Gamma \cdot \mu}{\rho_0 \cdot c_0} \right) + 30 \lg \left(\frac{f}{f_\Gamma} \right) + 10 \lg \eta - 3 \text{ дБ} . \quad (1.3)$$

Л. Беранек предложил разделять частотную шкалу на три области (см. рис. 1.2). Согласно его предположению, в области I звукоизоляция ограждения управляется его жесткостью и резонансными явлениями, в зоне II действует закон масс, а в зоне III преобладающее влияние на звукоизоляцию оказывают волновое совпадение и коэффициент потерь [8].

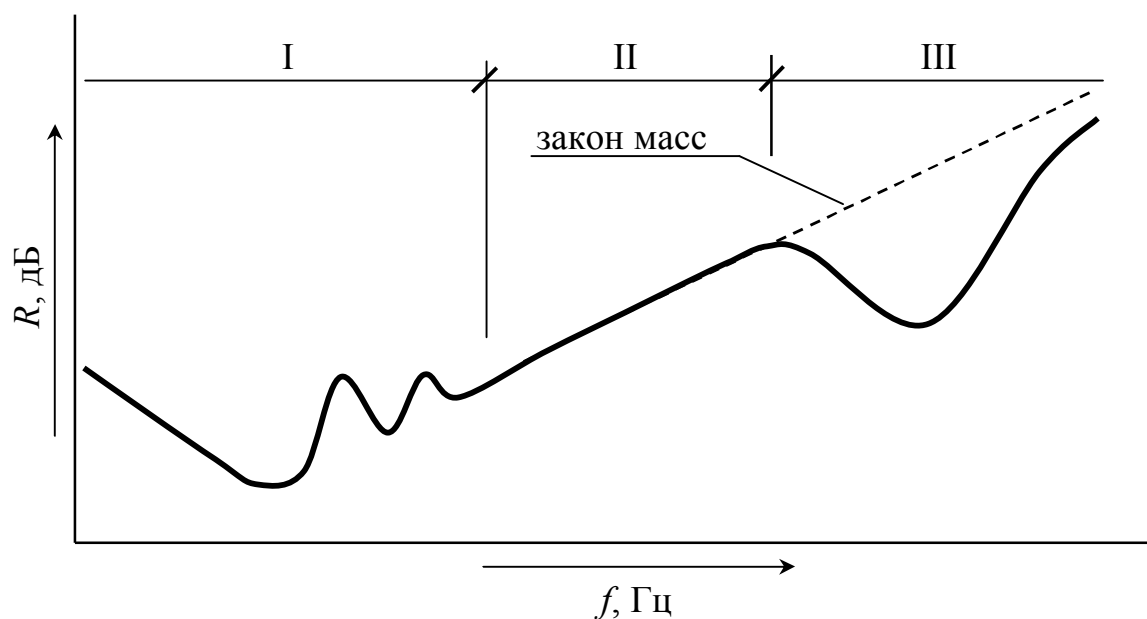


Рис. 1.2. Обобщенная частотная характеристика звукоизоляции однослойного ограждения по Л. Беранеку

Дальнейшие теоретические исследования А. Шоха [9], [10] подтвердили результаты работ Г. Рейснера, Л. Кремера и Дж. Гетца относительно условий полного прохождения звука через пластину неограниченных размеров.

Л.М. Лямшев установил, что на отражение и прохождение звука через бесконечную тонкую пластину оказывают влияние не только изгибные, но и продольные колебания ограждения [11].

В.И. Заборов в своих исследованиях получил формулу звукоизоляции Кремера в области волнового совпадения при подробном рассмотрении прохождения звука через слой неограниченных размеров [12].

Наряду с теоретическим изучением звукоизоляции ограждающих конструкций, различные ученые проводили многочисленные экспериментальные исследования. Было обнаружено, что расчетные значения звукоизоляции (по Л. 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 [13]. В выражение импеданса безграничной пластины при

изгибных колебаниях он предложил ввести дополнительное слагаемое, учитывающее диссипативные потери энергии.

Г.Л. Осипов установил, что полученное А. Лондоном выражение может быть использовано для расчета частотной характеристики звукоизоляции ограждающих конструкций. При этом дополнительное слагаемое, учитывающее рассеяние энергии при прохождении звука, определяется из данных экспериментальной частотной зависимости [14], [15].

Многочисленные экспериментальные данные по звукоизоляции реальных ограждающих конструкций значительно расходились со значениями, рассчитанными по существующим теориям. В частности, А. Лондон [13], Ф. Флеминг [16], Г. Бобран [17], В. Пьютц [18] обнаружили, что на низких частотах звукоизоляция однослойных ограждений значительно превышает расчетные величины для идеализированного случая бесконечной пластины.

1.2. Прохождение звука через ограждающие конструкции конечных размеров

Для точного и полного представления механизма прохождения звука через ограждающие конструкции необходимо учитывать конечность их размеров. Такие исследования были проведены А. Шохом и К. Фейером [19], В. Пьютцем [20], М. Хеклем [21], [22], а также другими учеными [23], [24], [25 ÷ 28], [29]. Однако точных выводов и расчетных выражений звукоизоляции, позволяющих учесть реальные размеры ограждений, получено не было.

Р. Жос и К. Лямюр [30] при рассмотрении прохождения звука через прямоугольную шарнирно опертую пластину установили некоторую зависимость звукоизоляции от размеров ограждения и коэффициента потерь

$$R = 10 \lg \frac{\pi^2 \cdot \mu^2 \cdot f^2}{\rho_0^2 \cdot c_0^2} - 10 \lg \left[\left(\frac{3}{4} + \frac{1}{2} \lg \frac{2f}{\Delta f} \right) + \frac{2c_0^2}{\pi^2 \eta \cdot f_\Gamma} \cdot \frac{1}{\sqrt{f \cdot f_\Gamma}} \times \right. \\ \left. \times \frac{a^2 + b^2}{a^2 \cdot b^2} \cdot \left(1 + \frac{2f}{f_\Gamma} + \frac{3f^2}{f_\Gamma^2} \right) \right], \quad (1.4)$$

где f_Γ – граничная частота волнового совпадения;

f – текущая частота звука;

η – коэффициент потерь материала;

a, b – геометрические размеры пластины в плане.

Однако численные значения звукоизоляции ограждений, рассчитанные по формуле (1.4), имеют расхождения с экспериментальными данными, особенно в области низких частот.

Для расчета прохождения акустической и механической энергии через реальные строительные ограждающие конструкции Р. Лион и Г. Майданик применили метод статистического энергетического анализа (СЭА) [31]. Затем этот метод подробно разрабатывали М. Крокер, М. Баттачария и А. Прайс [32]. При этом воздушные пространства и элементы конструкции рассматриваются как резонансные системы, а поток энергии между любыми двумя системами пропорционален разности средних энергий колебаний этих двух систем.

В работе [32] коэффициент звукоизоляции определяется как

$$K3 = CШ + 10 \lg \left(\frac{A_p \cdot c_0 \cdot T_{ип}}{24 \cdot V_{ип} \cdot \ln 10} \right), \quad (1.5)$$

где СШ – снижение шума перегородкой, определяемое как

$$CШ = 10 \lg \left(\frac{E_{пшш}}{E_{ип}} \right) - 10 \lg \left(\frac{V_{пшш}}{V_{ип}} \right),$$

где A_p – площадь поверхности ограждающей конструкции;

$T_{ип}$ и $V_{ип}$ – соответственно время реверберации и объем изолируемого от шума помещения;

$E_{пшш}$ – полная энергия системы «помещение с источником шума»;

$E_{ип}$ – полная энергия системы «изолируемое помещение»;

$V_{пшш}$ – объем помещения с источником шума.

Полная энергия каждой системы определяется как алгебраическая сумма энергии, поступающей от источника шума, энергии внутренних потерь и потерь на границах, обусловленных утечкой в смежные системы.

При проведении расчета по данному методу характеристикой нерезонансного прохождения звука в качестве предельного значения звукоизоляции

принят закон масс. Однако данные экспериментов показывают, что звукоизоляция реальных ограждений превышает закон масс в области низких частот. Сами авторы метода СЭА отмечают, что имеет место некоторое несоответствие расчетных и экспериментальных данных на частотах ниже граничной частоты волнового совпадения.

Теоретические и экспериментальные исследования звукоизоляции однослойных ограждающих конструкций зданий с использованием метода СЭА проведены С.Н. Овсянниковым [33], [34].

Физические основы механизма прохождения звука через ограждающие конструкции конечных размеров объяснены исследованиями М. С. Седова. Разработанная его научной школой теория самосогласования волновых полей (СВП) устанавливает двойственный характер прохождения звука через преграду – резонансное и инерционное прохождение [35] ÷ [38]. В основе данной теории лежит явление самосогласования звуковых полей с обеих сторон ограждения (со стороны «шумного» и «тихого» помещений) и волновых полей собственных и инерционных колебаний самого ограждения. С помощью теории СВП можно аналитически рассчитывать звукоизоляцию реальных ограждающих конструкций зданий и сооружений с учетом их физико-механических параметров: геометрических размеров, цилиндрической жесткости, коэффициента потерь и текущей частоты звука.

Согласно теории СВП, практически важный диапазон частот разделяется на пять областей резонансного прохождения: дорезонансная область, область простых резонансов, область простых пространственных резонансов (ПрПР), неполных пространственных резонансов (НПР) и полных пространственных резонансов (ППР). Каждая из этих областей находится между граничными частотами: основная резонансная частота f_0 , граничный простой ПР $f_{\Gamma m_0 n_0}$, граничный неполный ПР $f_{\Gamma m n_0}$ и граничный полный ПР $f_{\Gamma m n}$ соответственно [37].

На рис. 1.3 приведена обобщенная частотная характеристика звукоизоляции однослойного ограждения, построенная по теории самосогласования вол-

новых полей. Можно видеть, что она существенно отличается от разделения Л. Кремера (две области) и Л. Беранека (три области).

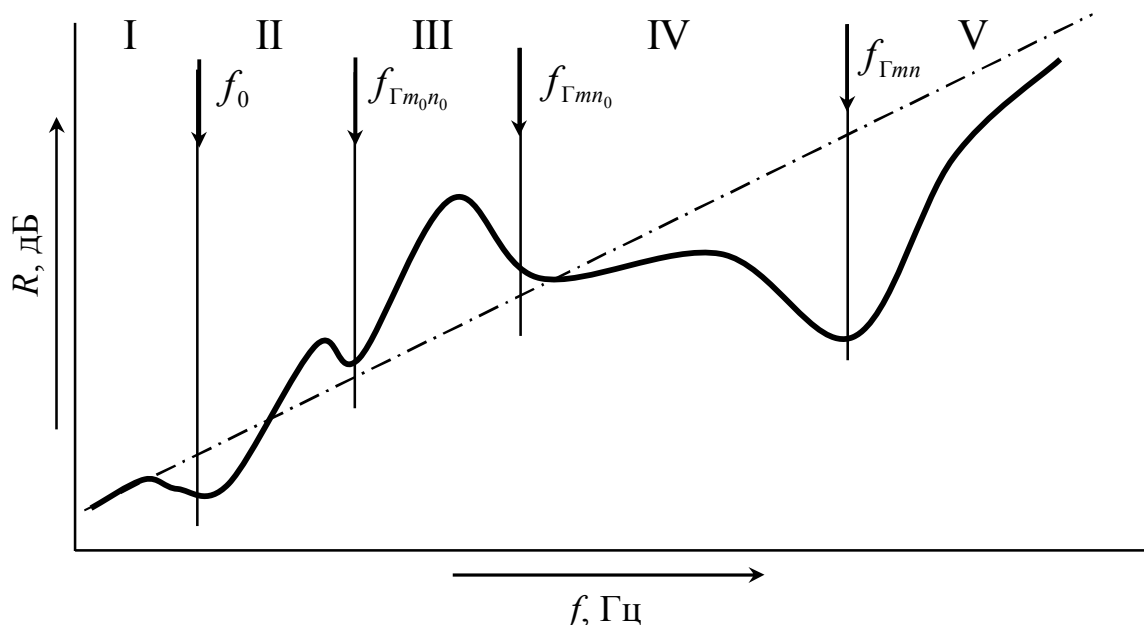


Рис. 1.3. Обобщенная частотная характеристика звукоизоляции однослойного ограждения конечных размеров, построенная по теории самосогласования волновых полей

В каждой из областей прохождение звука через ограждение различно и определяется соотношением резонансной и инерционной составляющих. Инерционное прохождение звука зависит от поверхностной массы ограждения и его размеров, а резонансное — от степени самосогласования звуковых полей и волнового поля собственных колебаний ограждающей конструкции, а также от потерь энергии на рассеяние. Таким образом, с учетом двойственной природы прохождения звука, выражение звуковой мощности, излучаемой ограждающей конструкцией, запишется как [36]

$$W_2 = W_{2c} + W_{2и}, \quad (1.6)$$

где W_{2c} — мощность, излучаемая в режиме собственных колебаний, $W_{2и}$ — мощность, излучаемая в режиме инерционных колебаний.

Теорией СВП установлено, что ограждающие конструкции конечных размеров имеют предельные значения звукоизоляции, определяемые инерционным прохождением звука. Предельная звукоизоляция реального ограждения зависит от его поверхностной плотности и геометрических размеров.

Повышение звукоизоляции реальных ограждений над законом масс на низких частотах, наблюдаемое экспериментально, объясняется снижением инерционного прохождения звука в этом диапазоне благодаря конечности их геометрических размеров. Теоретически и экспериментально доказано, что путем изменения размеров ограждающих конструкций можно смещать эту область повышения по частотной шкале, управляя тем самым их звукоизоляцией.

На базе теории самосогласования волновых полей проведены многочисленные исследования звукоизоляции различных типов строительных ограждений. В.Н. Бобылевым изучены вопросы прохождения звука через ограждающие конструкции на низких частотах (ниже граничной частоты полного пространственного резонанса). Теоретические выводы и инженерный метод расчета звукоизоляции реальных ограждений подтверждены многочисленными экспериментальными данными [39] ÷ [41]. В.А. Тишков провел исследования звукоизоляции и разработал инженерный метод расчета ограждающих конструкций при наклонном падении звука (при различных углах падения звука) [42]. А.А. Кочкиным теоретически и экспериментально изучена звукоизоляция слоистых ограждений конечных размеров с вибродемпфирующими слоями, а также двойных ограждающих конструкций с воздушным промежутком, состоящих из однослойных слоистых элементов [43], [44]. Другими исследователями изучены вопросы звукоизоляции ограждений с ребрами жесткости и вибродемпфирующими покрытиями [45], двойных ограждений с воздушным промежутком [46], трехслойных ограждений типа «сэндвич» с жестким средним слоем [47], пространственных конструкций [48], неразрезных конструкций [49] и др.

1.3. Влияние цилиндрической жесткости на звукоизоляцию однослойных ограждающих конструкций

Вопросы повышения звукоизоляции реальных ограждающих конструкций зданий всегда интересовали исследователей. С практической точки зрения наиболее интересным и экономически целесообразным является способ, который позволяет улучшить звукоизолирующие свойства ограждения без значи-

тельного увеличения поверхностной плотности. Для ограждающей конструкции с заданной поверхностной плотностью этого можно достигнуть путем изменения цилиндрической жесткости за счет ослабления ее поперечного сечения. Это достигается путем нанесения на поверхность панели несквозных пропилов с определенным шагом на определенную глубину. Эффект изменения звукоизоляции при этом впервые был отмечен Л. Кремером и А. Айзенбергом для листов фанеры [50] и затем изучался многими учеными.

Ю.М. Ильяшук провел измерения звукоизоляции деревянного дощатого щита толщиной 22 мм [51]. Автор отмечает, что изменение жесткости панели позволило повысить ее звукоизоляцию как на средних, так и на низких частотах. Причем отмечается, что «природа этого явления еще не изучена».

Л.Н. Клячко и В.И. Заборовым проведены исследования звукоизоляции ограждений с измененной цилиндрической жесткостью на примере фанерных плит толщиной 22 мм и деревянных плит различной толщины [12], [52]. Отмеченное при этом повышение звукоизоляции объясняется смещением граничной частоты волнового совпадения на более высокие частоты.

И.И. Боголепов пришел к выводу, что звукоизоляция однослойных пластин определяется соотношением ее толщины, поверхностной плотности, цилиндрической жесткости и коэффициента потерь. Влияние жесткости на звукоизоляцию исследовано на панелях из оргстекла толщиной 100 мм [53], [54].

Из проведенного анализа можно видеть, что перечисленные исследования не дают полного представления о степени влияния цилиндрической жесткости однослойных ограждающих конструкций на их звукоизолирующие свойства. Большинство выводов сделано на основании экспериментальных данных, которые носят количественный характер. Остаются невыясненными причины повышения звукоизоляции на средних и низких частотах (кроме как за счет смещения частоты волнового совпадения). Также не объяснено влияние жесткости ограждений на их звукоизоляцию в различных частотных диапазонах.

Экспериментальные исследования влияния жесткости однослойных ограждающих конструкций на их звукоизоляцию проведены в лаборатории аку-

стики ННГАСУ на образцах из различных материалов [55] ÷ [58]. Установлено, что повышение звукоизоляции ограждений, которое наблюдается при снижении их цилиндрической жесткости (при прочих равных параметрах), происходит за счет уплотнения спектра частот собственных колебаний и снижения коэффициента звукоизлучения при этом [55]. Полученные экспериментальные значения звукоизоляции имеют хорошую сходимость с теоретическими данными, полученными по теории самосогласования волновых полей с учетом двойственной природы прохождения звука через ограждения.

2. Теоретические исследования звукоизоляции однослойных ограждающих конструкций конечных размеров с ослабленным поперечным сечением

Механизм прохождения звука через ограждающую конструкцию заключается в том, что под действием падающей звуковой волны в ограждении возникают колебательные процессы, и оно само начинает излучать звук в изолируемое («тихое») помещение. В качестве объекта исследования будем рассматривать прямоугольную плоскую строительную панель конечных размеров из однородного материала с шарнирным опиранием по контуру в проеме акустически жесткого бесконечного экрана. Рассматриваются панели, для которых преобладающий вклад в излучаемую звуковую мощность вносят изгибные волны.

С целью определения оптимальных параметров однослойных звукоизолирующих ограждений будем рассматривать панели с конструктивным изменением, позволяющим регулировать цилиндрическую жесткость без значительного изменения поверхностной плотности – с ослабленным поперечным сечением (ОПС). Принципиальная схема данного типа ограждения показана на рис. 2.1.

В основе теоретических исследований прохождения звука через ограждающие конструкции с ОПС лежит теория самосогласования волновых полей [35] ÷ [42].

2.1. Форма звукового давления в плоскости ограждения

Рассмотрим прямоугольную строительную панель (пластину) с размерами в плане $a \times b$ и приведенной толщиной h_{Π} . Приведенная толщина ограждения определяется степенью ОПС

$$h_{\Pi} = h - \delta, \quad (2.1)$$

где h – исходная толщина панели до ОПС; δ – глубина ОПС (глубина прорезей).

Начало координат примем в левом нижнем углу пластины, при этом ось Ox направлена вдоль стороны a , ось Oy – вдоль стороны b , а ось Oz – перпенди-

кулярна плоскости xOy , которая совмещена со срединной плоскостью ограждения.

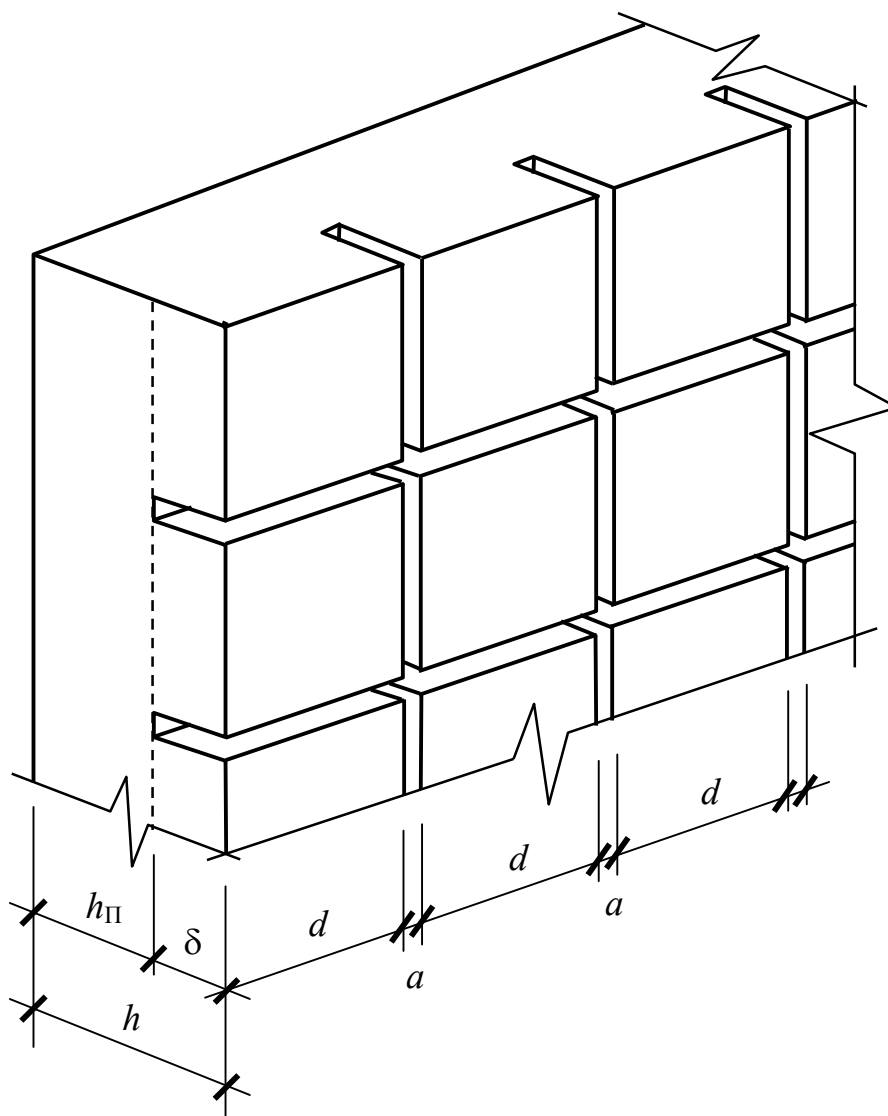


Рис. 2.1. Фрагмент ограждающей конструкции с ОПС

Пусть на данное ограждение в направлении отрицательных z падают плоские звуковые волны, которые можно представить четырьмя волнами. При этом две волны бегут вдоль пластины в направлении положительных x под углами $\pm\alpha_0$, а две другие волны бегут под теми же углами в противоположном направлении. Тогда выражения звукового давления в плоскости рассматриваемого ограждения запишутся соответственно как [36]

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= P_0 \cdot e^{i[\omega t + k_{01}(x \sin \alpha_0 + y \cos \alpha_0) + \psi_1]} \\ P_2 &= P_0 \cdot e^{i[\omega t + k_{01}(x \sin \alpha_0 - y \cos \alpha_0) + \psi_2]} \\ P_3 &= P_0 \cdot e^{i[\omega t - k_{01}(x \sin \alpha_0 + y \cos \alpha_0) + \psi_3]} \\ P_4 &= P_0 \cdot e^{i[\omega t - k_{01}(x \sin \alpha_0 - y \cos \alpha_0) + \psi_4]} \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

где P_0 – амплитуда звукового давления; ω – угловая частота звука; t – время; $k_{01} = k_0 \sin \theta$; $k_0 = \omega/c_0$ – волновое число; c_0 – скорость звука в воздухе; θ – угол падения звуковых волн; ψ – начальная фаза движения.

Рассмотрим два варианта начальных фаз колебаний звукового давления:

а) $\psi_1 = \psi_2 = \pi$ и $\psi_3 = \psi_4 = 0$ и б) $\psi_1 = \psi_2 = \psi_3 = \psi_4 = 0$. После преобразований (2.2) получаем выражение суммарное давление в каждой точке поверхности пластины для случая а):

$$P = 4P_0 e^{i\omega t} \sin\left(\frac{2\pi \cdot x}{\lambda_0} \cdot \sin \theta \sin \alpha_0\right) \cdot \left(\frac{2\pi \cdot y}{\lambda_0} \cdot \sin \theta \cos \alpha_0\right) \quad (2.3)$$

и для случая б):

$$P' = 4P_0 e^{i\omega t} \cos\left(\frac{2\pi \cdot x}{\lambda_0} \cdot \sin \theta \sin \alpha_0\right) \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot y}{\lambda_0} \cdot \sin \theta \cos \alpha_0\right). \quad (2.4)$$

В случае распределения звукового давления в форме (2.3) на краях пластины будут узлы, а при распределении в форме (2.4) – пучности звукового давления. Согласно свойствам периодичных функций условия (2.3) и (2.4) выполняются при наличии соотношений [36]:

$$\left. \begin{aligned} m_0 &= \frac{2a}{\lambda_0} \cdot \sin \theta \sin \alpha_0 \\ n_0 &= \frac{2b}{\lambda_0} \cdot \sin \theta \cos \alpha_0 \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

где m_0 , n_0 – числа длин проекций звуковых полуволен по сторонам a и b соответственно, имеющие непрерывные численные значения; λ_0 – длина звуковой волны.

Подставляя выражения (2.5) в формулы (2.3) и (2.4) получаем формы распределения звукового давления в следующем виде [36]:

$$P_{m_0 n_0} = e^{i\omega t} P_{0m_0 n_0} \sin \frac{m_0 \pi x}{a} \sin \frac{n_0 \pi y}{b}, \quad (2.6)$$

$$P'_{m_0 n_0} = e^{i\omega t} P_{0m_0 n_0} \cos \frac{m_0 \pi x}{a} \cos \frac{n_0 \pi y}{b}, \quad (2.7)$$

где $P_{0m_0 n_0}$ – амплитудное значение результирующего звукового давления. Оно в четыре раза меньше амплитудного значения для случая диффузного падения звука.

Рассмотрим далее случай, отвечающий первому из указанных выше наборов начальных фаз колебаний звукового давления – случай а) $\psi_1 = \psi_2 = \pi$ и $\psi_3 = \psi_4 = 0$. Другие варианты наборов начальных фаз, в том числе отвечающий случаю б) $\psi_1 = \psi_2 = \psi_3 = \psi_4 = 0$, приводят лишь к формальным изменениям проводимых в дальнейшем преобразований, не изменяющих их математического смысла.

При воздействии на ограждающую конструкцию диффузного звукового поля, представляющего собой совокупность плоских звуковых волн, падающих под всевозможными углами, форма распределения звукового давления запишется в виде бесконечного ряда, в который входят слагаемые со всеми возможными значениями m_0 и n_0 [36]

$$P = e^{i\omega t} \sum_{\substack{m_0=0 \\ n_0=0}}^{\infty} P_{0m_0 n_0} \sin \frac{m_0 \pi x}{a} \sin \frac{n_0 \pi y}{b}. \quad (2.8)$$

2.2. Образование форм собственных колебаний ограждения

Теория самосогласования волновых полей устанавливает принцип наименьшего волнового движения (минимизации энергии) в исходной бегущей волне, который гласит, что собственные колебания упругих тел – это колебания, при которых свободное волновое движение в них становится замкнутым с наи-

меньшей затратой энергии на образование новых распространяющихся волн [36].

Рассмотрим более подробно процесс образования собственных колебаний строительных панелей с ОПС. Под воздействием падающих звуковых волн в шарнирно опертом ограждении возникает свободная упругая волна

$$\xi_{01} = \xi_{001} e^{i[\omega t + k(x \sin \alpha + y \cos \alpha) + \beta + \varphi]}, \quad (2.9)$$

где α – угол падения свободных волн на край панели; β , φ – составляющие начального фазового угла; $k = \omega/c$ – волновое число.

Скорость распространения свободной изгибной волны в пластине

$$c = \sqrt{\omega} \sqrt[4]{\frac{D}{\mu}}, \quad (2.10)$$

где $D = \frac{E \cdot h_{\Pi}^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)}$ – цилиндрическая жесткость ограждения с ОПС; E – модуль упругости материала ограждения; h_{Π} – приведенная толщина панели; ν – коэффициент Пуассона; $\mu = \rho h$ – поверхностная плотность панели; ρ – объемная плотность материала панели.

Отраженная бегущая изгибная волна имеет вид

$$\xi_{02} = \xi_{002} e^{i[\omega t + k(x \sin \alpha - y \cos \alpha)]}. \quad (2.11)$$

Суммарное смещение в упругих волнах для разности фаз π и одинаковых амплитуд свободной и отраженной волн, получим путем преобразований, аналогичных проведенным для формул (2.2). В результате получим [36]

$$\xi(x, y, t) = \xi_0 e^{i\omega t} \sin(kx \sin \alpha) \sin(ky \cos \alpha), \quad (2.12)$$

где $\xi_0 = 4\xi_{001}$.

Условия получения узлов на границах ограждающей конструкции будут обеспечены при наличии соотношений [37]:

$$\left. \begin{aligned} m &= \frac{2a}{\lambda} \cdot \sin \alpha \\ n &= \frac{2b}{\lambda} \cdot \cos \alpha \end{aligned} \right\}, \quad (2.13)$$

где m, n – числа длин проекций свободных полуволн по сторонам a и b пластины соответственно; λ – длина изгибной волны в ограждении.

С учетом этих граничных условий выражение (2.12) можно представить в следующем виде

$$\xi(x, y, t) = e^{i\omega t} \xi_0 \cdot \sin \frac{m\pi x}{a} \cdot \sin \frac{n\pi y}{b}. \quad (2.14)$$

При воздействии диффузного звукового поля смещения прямоугольной ограждающей конструкции в направлении оси z будут описываться бесконечным рядом по числам m и n [36]:

$$\xi(x, y, t) = e^{i\omega t} \sum_{m,n=1}^{\infty} \xi_{0mn} \cdot \sin \frac{m\pi x}{a} \cdot \sin \frac{n\pi y}{b}, \quad (2.15)$$

или

$$\xi(x, y, t) = e^{i\omega t} \xi(x, y), \quad (2.16)$$

где $\xi(x, y) = \sum_{m,n=1}^{\infty} \xi_{0mn} \cdot \sin \frac{m\pi x}{a} \cdot \sin \frac{n\pi y}{b}$.

2.3. Самосогласование волновых полей

В предыдущем разделе были рассмотрены волновые явления, возникающие в ограждении конечных размеров с ОПС при воздействии на него звуковых волн. При этом в каждый момент времени существуют определенные условия самосогласования (соотношения) характеристик звуковых полей с обеих сторон панели и характеристик собственного волнового поля ограждения [36]. Эти условия можно обеспечить при совместном выполнении соотношений (2.5) и (2.13), что обеспечит согласованную картину образования узлов на краях пластины. Действительно, можно видеть, что из соотношений (2.5) и (2.13) следуют равенства [36]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{2a}{\lambda} \cdot \sin \alpha &= M \cdot \left(\frac{2a}{\lambda_0} \cdot \sin \theta \sin \alpha_0 \right) \\ \frac{2b}{\lambda} \cdot \cos \alpha &= N \cdot \left(\frac{2b}{\lambda_0} \cdot \sin \theta \cos \alpha_0 \right), \end{aligned} \right\} \quad (2.15)$$

где a, b – размеры ограждения в плане; θ – угол падения (излучения) звуковых волн; α, α_0 – углы падения свободной изгибной волны и звуковой волны в плоскости пластины соответственно; $M = \frac{m}{m_0}$, $N = \frac{n}{n_0}$ – коэффициенты самосогласования длин проекций свободных и звуковых полуволн по сторонам a и b панели соответственно.

В левой части выражений (2.15) записаны условия замкнутого движения собственных волн в ограждающей конструкции, а в правой части – условия образования форм звукового давления в плоскости ограждения.

2.4. Резонансное прохождение звука через ограждение

Из рассмотрения системы уравнений (2.15) можно видеть, что самосогласование звуковых полей и волнового поля собственных колебаний ограждения зависит от частоты падающих звуковых волн. Для дальнейшего исследования резонансного прохождения звука через ограждающие конструкции с ОПС необходимо установить влияние самосогласования на излучение звука ограждением в различных частотных диапазонах. Это, в свою очередь, требует анализа выражения для амплитуды собственных поперечных колебаний прямоугольной панели. Решение данной задачи возможно выполнить либо путем решения дифференциального уравнения относительно функции поперечного смещения пластины $\xi(x,y)$, либо в рамках энергетического подхода. Распространяющаяся в пластине изгибная волна малой амплитуды описывается известным уравнением [59], [60]

$$\Delta^2 \xi + \frac{12 \cdot \rho \cdot (1 - \nu^2)}{E \cdot h^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = 0, \quad (2.16)$$

где Δ – оператор Лапласа ($\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$); ρ – плотность материала огражде-

ния; ν – коэффициент Пуассона; E – модуль упругости материала; h – толщина ограждающей конструкции.

Первый вариант связан с решением уравнения (2.16) с учетом граничных условий, определяемых способом закрепления пластины (например, шарнирно опертый край, свободный край, заделанный край). В реальных условиях необходимо также учитывать влияние сил внутреннего трения. Все это затрудняет получение общего аналитического решения задачи.

Второй вариант основан на использовании принципа наименьшего действия. Он устанавливает, что среди всех кинематически возможных перемещений механической системы из одной конфигурации в другую, совершаемых за один и тот же промежуток времени $t_1 - t_0$, действительным является то, для которого физическая величина S (действие) является минимальной. В форме Остроградского-Гаусса под действием за промежуток времени $t_1 - t_0$ понимают величину [36]

$$S = \int_{t_0}^{t_1} L dt, \quad (2.17)$$

где L – функция Лагранжа, которая при наличии внешних возмущающих сил и диссипативных потерь энергии определяется выражением

$$L = T(q_i, \dot{q}_i, t) - P(q_i) + W(q_i, \dot{q}_i, t) - R(q_i, \dot{q}_i, t), \quad (2.18)$$

где T и P – кинетическая и потенциальная энергии системы соответственно; W – работа возмущающих сил; R – работа диссипативных сил; q_i – набор обобщенных координат; \dot{q}_i – набор обобщенных скоростей.

Условие минимальности действия S обеспечивается равенством нулю ее вариации: $\delta S = 0$ или

$$\delta \int_{t_0}^{t_1} (T - P + W - R) dt = 0.$$

Математически данное условие обеспечивается уравнениями Лагранжа-Эйлера вида [61]

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0.$$

Решая задачу минимальности действия относительно амплитуд колебаний получим уравнение Лагранжа-Эйлера в следующем виде

$$\frac{\partial}{\partial \xi_{0mn}} \int_{t_0}^{t_1} (T - V + W - R) dt = 0. \quad (2.19)$$

Выражения слагаемых подынтегральной части уравнения (2.19) раскрываем с использованием уравнения поперечных смещений пластин (2.16). При этом вычисление интегралов производится стандартными методами с использованием таблиц [62]. Кинетическая энергия колебаний ограждения определяется как

$$T = \frac{\mu}{2} \int_0^a \int_0^b \left(\frac{\partial \xi(x, y, t)}{\partial t} \right)^2 dx dy.$$

После подстановки выражения (2.16) и взятия частной производной по времени получаем следующее выражение [36]

$$T = e^{i2\omega t} \frac{\mu \omega^2}{2} \sum_{m,n=1}^{\infty} \xi_{0mn}^2 B_{mn}, \quad (2.20)$$

где $B_{mn} = \int_0^a \int_0^b \sin^2 \frac{m\pi x}{a} \sin^2 \frac{n\pi y}{b} dx dy$.

Отметим, что при получении выражения (2.20) были учтены свойства ортогональности функций $\sin \frac{m\pi x}{a}$ и $\sin \frac{n\pi y}{b}$, которые состоят в том, что интегралы

вида $\int_0^a \sin \frac{m\pi x}{a} \cdot \sin \frac{m'\pi x}{a} dx$ и $\int_0^b \sin \frac{n\pi y}{b} \cdot \sin \frac{n'\pi y}{b} dy$ равны нулю, если

$m \neq m'$ и $n \neq n'$ (при $m = m'$ и $n = n'$ эти интегралы равны $a/2$ и $b/2$ соответственно).

Выполняя аналогичные математические действия и учитывая, что

$$\int_0^a \int_0^b \left[\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2} \right]^2 dx dy = \sum_{m,n=1}^{\infty} \left[\left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b} \right)^2 \right]^2 \xi_{0mn}^2 B_{mn},$$

получаем выражение для потенциальной энергии ограждающей конструкции [36]

$$V = e^{i\omega t} \frac{D \cdot \pi^4}{2} \sum_{m,n=1}^{\infty} \left[\left(\frac{m}{a} \right)^2 + \left(\frac{n}{b} \right)^2 \right]^2 \xi_{0mn}^2 B_{mn}, \quad (2.21)$$

где D – цилиндрическая жесткость ограждения с учетом ОПС.

В соответствии с намеченной выше схемой работа диссипативных сил трения определяется из следующего выражения

$$R = \frac{\varphi}{2} \cdot e^{i\omega t} \sum_{m,n=1}^{\infty} \xi_{0mn}^2 B_{mn}, \quad (2.22)$$

где $\varphi = i \cdot \frac{\mu}{2} \omega_{mn}^2 \cdot \eta$ – коэффициент, учитывающий диссипативные потери в ограждающей конструкции. Здесь η – коэффициент внутренних потерь ограждения; $\omega_{mn} = \pi^2 \sqrt{\frac{D}{\mu}} \cdot \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)$.

В формулу для работы внешних сил входит суммирование по составляющим звукового давления и по смещениям пластины [36]

$$W = e^{i\omega t} \sum_{m,n=1}^{\infty} \sum_{m_0,n_0=0}^{\infty} \xi_{0mn} P_{0m_0n_0} B, \quad (2.23)$$

$$\text{где } B = \int_0^a \int_0^b \sin \frac{m\pi x}{a} \cdot \sin \frac{n\pi y}{b} \cdot \sin \frac{m_0\pi x}{a} \cdot \sin \frac{n_0\pi y}{b} dx dy.$$

Результат интегрирования зависит от соотношения между наборами чисел m, n и m_0, n_0 , поэтому выражение (2.23) подставляем в уравнение Лагранжа-Эйлера без преобразований.

В соответствии с полученными выше формулами, уравнение (2.19) с учетом работы сил внутреннего трения приобретает вид [36]

$$\frac{\partial}{\partial \xi_{0mn}} \int_{t_0}^{t_1} \cos 2\omega t \left[\sum_{m,n=1}^{\infty} \frac{\mu}{2} (\omega^2 - \omega_{mn}^2 (1 + i\eta)) \cdot \xi_{0mn}^2 \cdot B_{mn} + \sum_{m,n=1}^{\infty} \sum_{m_0,n_0=0}^{\infty} \xi_{0mn} P_{0m_0n_0} B \right] dt = 0. \quad (2.24)$$

Произведя интегрирование по временному интервалу от $t_0 = 0$ до $t_1 = \pi/2\omega = T/4$, где T – период поперечных колебаний пластины найдем, что

$$\frac{\partial}{\partial \xi_{0mn}} \left\{ \sum_{m,n=1}^{\infty} \frac{\mu}{2} \cdot [\omega^2 - \omega_{mn}^2 (1 + i\eta)] \cdot \xi_{0mn}^2 B_{mn} + \sum_{m,n=1}^{\infty} \sum_{m_0,n_0=0}^{\infty} \xi_{0mn} P_{0m_0n_0} B \right\} = 0. \quad (2.25)$$

Дифференцируя выражение (2.25), находим выражение для амплитуд поперечных смещений ограждающей конструкции

$$\sum_{m,n=1}^{\infty} \sum_{m_0,n_0=0}^{\infty} \{ [\omega^2 - \omega_{mn}^2 (1 + i\eta)] \cdot \xi_{0mn} B_{mn} + P_{0m_0n_0} B \} = 0.$$

Отсюда для каждого набора m, n и m_0, n_0 получаем следующее [36]

$$\xi_{0mn} = \frac{P_{0m_0n_0} B}{\mu \cdot [\omega_{mn}^2 (1 + i\eta) - \omega^2] \cdot B_{mn}}. \quad (2.26)$$

Введем обозначение: величина $A = \frac{B}{B_{mn}}$ – характеристика самосогласования звукового поля и поля собственных колебаний панели [36], которая определяется по формуле

$$A = \frac{\int_0^a \int_0^b \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \sin \frac{m_0\pi x}{a} \sin \frac{n_0\pi y}{b} dx dy}{\int_0^a \int_0^b \sin^2 \frac{m_0\pi x}{a} \sin^2 \frac{n_0\pi y}{b} dx dy}, \quad (2.27)$$

где m, n – числа длин проекций собственных полуволн по сторонам a и b ограждения соответственно; m_0, n_0 – то же для звукового поля.

В соответствии с проведенным обозначением, амплитуда поперечных смещений рассматриваемой панели с ОПС определится из выражения [36]

$$\xi_{0mn} = \frac{P_{0m_0n_0} \cdot A}{\mu \cdot \omega_p^2}, \quad (2.28)$$

где μ – поверхностная плотность ограждения с ОПС; $\omega_p^2 = [\omega_{mn}^2 (1 + i\eta) - \omega^2]$, где $\omega_{mn} = 2\pi f_{mn}$, f_{mn} – частота собственных колебаний ограждения; η – коэффициент внутренних потерь ограждения.

Из выражения (2.28) следует, что численное значение амплитуды колебаний зависит от соотношения чисел m и m_0 , n и n_0 и наибольший отклик пластины в резонансном режиме на воздействие звуковых волн будет в трех случаях самосогласования полей [37]:

$$m = m_0, n = n_0; \quad (2.29)$$

$$m = m_0, n \neq n_0; \quad (2.30a)$$

$$m \neq m_0, n = n_0; \quad (2.30б)$$

$$m \neq m_0, n \neq n_0. \quad (2.31)$$

1) Условие (2.29) соответствует случаю полного самосогласования характеристик свободных упругих волн с аналогичными характеристиками звуковых волн. При этом полностью совпадают узловые линии $m_0 n_0$ -ой формы распределения звукового давления в плоскости ограждения с узловыми линиями mn -ой формы собственных колебаний ограждения.

Такой случай самосогласования называется *полным пространственным резонансом* (ППР) [37]. При этом уравнения самосогласования (2.15) преобразуются в известное условие волнового совпадения [5]

$$k = k_0 \sin\theta \quad \text{или} \quad c = c_0 / \sin\theta, \quad (2.32)$$

где c – скорость распространения свободных изгибных волн в пластине; $c_0 / \sin\theta$ – скорость распространения звуковых волн, вдоль поверхности пластины; θ – угол падения звуковых волн на поверхность пластины.

В условиях ППР коэффициенты $M = 1$, $N = 1$, $\alpha = \alpha_0$, а выражение смещений ограждения (2.28) переписывается как [36]

$$\xi_{0mn} = \frac{P_{0m_0 n_0} A_{mn}}{\mu \cdot \omega_p^2}, \quad (2.33)$$

где характеристика самосогласования $A_{mn} = 1$.

Наименьшая частота, при которой начинают выполняться условия (2.29) называется граничной частотой области ППР и определяется из совместного решения уравнений (2.15) [37]

$$f_{\Gamma mn} = \frac{c_0^2}{2\pi \sin^2 \theta} \sqrt{\frac{\mu}{D}}, \quad (2.34)$$

где θ – наибольший угол падения звуковых волн на поверхность ограждающей конструкции, при котором выполняются условия (2.29).

2) При выполнении условий (2.30) характеристики собственных изгибных волн в рассматриваемом ограждении и характеристики звуковых волн совпадают не полностью, а только по одной из сторон панели. При этом скорости следов свободной и звуковой волн по одной стороне пластины равны между собой, а по другой стороне не совпадают, но находятся в таком соотношении, при котором отклик пластины максимальный. Такой случай самосогласования волновых полей называется *неполным пространственным резонансом* (НПР) [37].

а) Условие (2.30а) соответствует случаю, когда совпадение волновых характеристик происходит по стороне a панели. При этом амплитуда поперечных колебаний ограждения определяется как [36]

$$\xi_{0mn_0} = \frac{P_{0m_0n_0} A_{mn_0}}{\mu \cdot \omega_p^2}, \quad (2.35)$$

где характеристика самосогласования A_{mn_0} определяется из выражения (2.27)

$$A_{mn_0} = \frac{2 \cdot n \cdot \sin n_0 \pi}{\pi \cdot (n^2 - n_0^2)}. \quad (2.36)$$

б) Условие (2.30б) соответствует случаю, когда совпадение волновых характеристик происходит по стороне b панели. При этом амплитуда поперечных колебаний ограждения определяется как [36]

$$\xi_{0m_0n} = \frac{P_{0m_0n_0} A_{m_0n}}{\mu \cdot \omega_p^2}, \quad (2.37)$$

где характеристика самосогласования A_{m_0n} определяется из выражения (2.27)

$$A_{m_0 n} = \frac{2 \cdot m \cdot \sin m_0 \pi}{\pi \cdot (m^2 - m_0^2)}. \quad (2.38)$$

Выражения (2.35) и (2.37) включают в себя множители $\sin n_0 \pi$ и $\sin m_0 \pi$ соответственно. Следовательно, максимальная амплитуда колебаний ограждающих конструкций будет обеспечена при следующих наборах чисел m и n [37]:

$$\begin{aligned} m &= m_0, n_0 = 1/2, 3/2, 5/2, \dots \\ \text{и } n &= n_0, m_0 = 1/2, 3/2, 5/2, \dots, \text{ то есть при} \\ M &= 1; N = 2n, 2n/3, 2n/5, \dots; \\ \text{и } N &= 1; M = 2m, 2m/3, 2m/5, \dots \end{aligned}$$

Граничную частоту области НПР можно определить из уравнений (2.15) следующим образом [36]:

$$\begin{aligned} f_{\Gamma m_0} &= \frac{c_0^2}{2\pi \sin^2 \theta (\sin^2 \alpha + N^2 \cos^2 \alpha)} \sqrt{\frac{\mu}{D}} \\ \text{или} \quad f_{\Gamma m_0 n} &= \frac{c_0^2}{2\pi \sin^2 \theta (M^2 \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha)} \sqrt{\frac{\mu}{D}}. \end{aligned} \quad (2.39)$$

3) Случай самосогласования волновых полей (2.20) называется *простым пространственным резонансом* (ПрПР) [37]. При этом формы распределения звукового давления и формы собственных колебаний ограждения не совпадают друг с другом ни по одной из сторон пластины, но находятся в таком соотношении, что излучаемая звуковая мощность еще отличается повышенной интенсивностью. Амплитуда поперечных колебаний ограждения при этом определяется как [36]

$$\xi_{0m_0 n_0} = \frac{P_{0m_0 n_0} A_{m_0 n_0}}{\mu \cdot \omega_p^2}, \quad (2.40)$$

где характеристика самосогласования $A_{m_0 n_0}$ определяется из (2.27)

$$A_{m_0 n_0} = \frac{4 \cdot mn \cdot \sin m_0 \pi \cdot \sin n_0 \pi}{\pi^2 \cdot (m^2 - m_0^2) \cdot (n^2 - n_0^2)}. \quad (2.41)$$

Для простых ПР амплитуда колебаний панели будет наибольшей в следующем случае [37]:

$$m_0 = 1/2, 3/2, 5/2, \dots; n_0 = 1/2, 3/2, 5/2, \dots, \text{ то есть при} \\ M = 2m, 2m/3, 2m/5, \dots \text{ и } N = 2, 2n/3, 2n/5, \dots$$

Граничная частота области ПрПП определяется путем совместного решения уравнений (2.15) [36]

$$f_{\Gamma m_0 n_0} = \frac{c_0^2}{2\pi \sin^2 \theta (M^2 \sin^2 \alpha + N^2 \cos^2 \alpha)} \sqrt{\frac{\mu}{D}} \cdot$$

(2.42)

Анализируя представленные выражения для амплитуд изгибных колебаний прямоугольной панели (2.33), (2.35), (2.37), (2.40), можно сделать вывод, что резонансное прохождение звука через ограждение с ОПС различно в областях полных, неполных и простых пространственных резонансов и определяется степенью самосогласования звуковых полей и его собственного волнового поля.

2.5. Излучение звука ограждением в режиме собственных колебаний

При исследовании резонансного прохождения звука через ограждающие конструкции конечных размеров с ОПС рассматривается взаимодействие звукового поля перед ограждением (помещение с источником шума), волновое поле собственных колебаний ограждения и звуковое поле за ограждением (со стороны изолируемого от шума помещения).

Необходимо установить зависимость звуковой мощности, излучаемой панелью с измененной цилиндрической жесткостью в резонансном режиме от степени самосогласования волновых полей, определяемой выражением (2.15).

Акустическую мощность, излученную ограждающей конструкцией в изолируемое помещение (в направлении отрицательных z), можно определить из выражения [36]

$$W_2 = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left(\int_0^a \int_0^b P_{2C} \cdot \mathcal{G}_C^* dx dy \right), \quad (2.43)$$

где P_{2C} – амплитуда звукового давления в плоскости ограждения;

\mathcal{G}_C^* – комплексно сопряженная амплитуда колебательной скорости ограждения.

Здесь и далее индексы «1» и «2» означают принадлежность величины к звуковому полю перед и за ограждением соответственно, а индексы «С» и «И» относятся к полям собственных и инерционных волн соответственно.

Звуковое давление в волне, излученной исследуемой панелью, принимаем распределенным по ее площади в соответствии с выражением (2.6)

$$P_{2C} = P_{0m_0n_0} \sin \frac{m_0 \pi x}{a} \sin \frac{n_0 \pi y}{b} e^{ik_{02} \cos \theta_2}, \quad (2.44)$$

где k_{02} – составляющая волнового числа среды вдоль оси z ; θ_2 – угол излучения.

Тогда, привлекая граничные условия на поверхности панели [36]

$$\left[\frac{\partial P_{2C}}{\partial z} \right]_{z=0} = i\omega \rho_0 \mathcal{G}_{mn}, \quad (2.45)$$

где ρ_0 – плотность воздуха, \mathcal{G}_{mn} – колебательная скорость в направлении, перпендикулярном к плоскости панели на mn -ом резонансе.

С учетом выражения распределения смещений ограждения в собственных волнах (2.14) запишем, что

$$\mathcal{G}_{mn} = \mathcal{G}_{0mn} \cdot \sin \frac{m_2 \pi x}{a} \cdot \sin \frac{n_2 \pi y}{b}, \quad (2.46)$$

где $\mathcal{G}_{0mn} = i\omega \xi_{0mn}$.

В соответствии с зависимостью (2.43) запишем выражение звуковой мощности, излучаемой панелью на каждом резонансе как [36]

$$W_{2C} = \frac{\rho_0 c_0}{8} \frac{\overline{\mathcal{G}_{0mn}^2}}{\cos \theta} \frac{A_2^2}{\cos \theta_{2C}} \cdot ab, \quad (2.47)$$

где $\rho_0 c_0$ – характеристический импеданс среды за ограждением (воздух);

A_2 – характеристика самосогласования звукового поля за ограждением с его собственным волновым полем, определяемая по (2.27) [36]

$$A_2 = \frac{\int_0^a \int_0^b \sin \frac{m_2 \pi x}{a} \sin \frac{n_2 \pi y}{b} \sin \frac{m_{02} \pi x}{a} \sin \frac{n_{02} \pi y}{b} dx dy}{\int_0^a \int_0^b \sin^2 \frac{m_{02} \pi x}{a} \sin^2 \frac{n_{02} \pi y}{b} dx dy}; \quad (2.48)$$

$\bar{\mathcal{G}}_{0mn}$ – амплитуда колебательной скорости пластины, усредненная по полосе частот Δf [37]

$$\bar{\mathcal{G}}_{0mn}^2 = \frac{P_0^2 A_2^2}{8 \cdot \pi^2 \mu^2 \cdot \Delta f \cdot f \cdot \eta}. \quad (2.49)$$

Здесь $P_0^2 = k_p \cdot P_{0m_0n_0}^2 = P_{0m_0n_0}^2 \cdot 2 \int_{\theta_H}^{\theta_B} \cos \theta \cdot \sin \theta d\theta$, $P_{0m_0n_0}$ – звуковое давление при

диффузном падении звука в пределах от 0 до $\pi/2$; $\Delta f = f_B - f_H = k_f f$; ($k_f = 0,23$ для третьоктавной полосы пропускания звука); величина k_p принимает значение 0,2 при ширине полосы звука в третьоктаву; углы падения θ_H и θ_B соответствуют верхней и нижней частотам полосы пропускания Δf ; f – среднегеометрическая частота полосы пропускания звука.

Из выражения (2.47) следует, что излучаемая в режиме собственных колебаний ограждения с ОПС звуковая мощность зависит от углов падения и излучения, от степени самосогласования волновых полей и коэффициента потерь материала.

2.6. Коэффициент резонансного прохождения звука

Характеристикой звукоизоляции ограждающих конструкций является коэффициент прохождения (проницаемости) звука. Коэффициент резонансного прохождения звука определяется как отношение звуковых мощностей в волнах, прошедших через ограждение и в волнах, падающих на него [36]

$$\tau_C = W_{2C} / W_1, \quad (2.50)$$

где W_{2C} – мощность звуковых волн, излученных собственными волнами ограждения со стороны изолируемого от шума помещения (см. формулу (2.47));

W_1 – мощность падающих звуковых волн, которая при диффузном падении звука определяется как [63] $W = \frac{P_{\text{ОПАД}}^2 \cdot a \cdot b}{8 \cdot \rho_0 c_0}$. Учитывая звуковое давление как сумму давлений в падающих и отраженных волнах, получаем выражение суммарной звуковой мощности

$$W_1 = \frac{P_{\text{ОПАД}}^2 \cdot a \cdot b}{4 \cdot \rho_0 c_0}, \quad (2.51)$$

где $P_{\text{ОПАД}}$ – амплитудное звуковое давление со стороны помещения с источником шума; $\rho_0 c_0$ – характеристический импеданс среды (для воздуха $\rho_0 c_0 = 420 \text{ Па} \cdot \text{с/м}$).

Таким образом, используя выражения (2.47) и (2.51) получаем выражение коэффициента проницаемости ограждения при резонансном прохождении звука в области частот ниже граничной частоты полных ПР ($f < f_{\Gamma mn}$) [36]

$$\tau_c = \frac{1}{\frac{2,3 \cdot \pi}{\rho_0^2 c_0^2 \cdot A^4} \cdot \mu^2 f^2 \eta \cdot \cos \theta_{\text{cp}} \cos \theta_{2c} + 1}, \quad (2.52)$$

где μ – поверхностная плотность ограждающей конструкции с ОПС; η – коэффициент потерь ограждения; $\theta_{\text{cp.}} = 51,7575...^\circ$ – средний угол падения волн диффузного звукового поля [64]; θ_{2c} – угол излучения собственными волнами; A – характеристика самосогласования волнового поля панели и звуковых полей перед и за ограждением соответственно.

Для диапазона частот выше граничной частоты полного ПР ($f > f_{\Gamma mn}$) характеристика самосогласования волновых полей $A_{mn} = 1$ и акустическое излучение ограждением определяется величиной коэффициента излучения звука [36]. При этом выражение (2.52) записывается в виде [36]

$$\tau_{c_{mn}} = \frac{1}{\frac{8\pi}{\rho_0^2 c_0^2} \cdot \frac{f^3}{f_{\Gamma mn}} \cdot \mu^2 \eta \cdot \cos \theta_{\text{cp}} \cos \theta_{2c} + 1}, \quad (2.53)$$

где $f_{\Gamma mn}$ – граничная частота области ППР.

Из выражений (2.52) и (2.53) следует, что звукопроницаемость ограждения с ОПС в резонансном режиме в диапазоне низких и средних частот ($f < f_{\Gamma mn}$) зависит от потерь энергии на рассеивание (η) и от степени самосогласования собственного волнового поля пластины и звуковых полей перед и за пластиной. В области ППР ($f > f_{\Gamma mn}$) резонансное прохождение звука зависит также и от величины граничной частоты ППР. Таким образом, прохождение звука с собственными волнами различно при простых, неполных и полных пространственных резонансах.

2.7. Поле инерционных волн в ограждении

Теория самосогласования волновых полей устанавливает двойственную природу прохождения звука через ограждающие конструкции – резонансное и инерционное прохождение [36]. Это обусловлено тем, что при воздействии звуковых волн в начальный момент времени в ограждении возникают вынужденные (инерционные) волны [64].

Характеристикой начального состояния ограждения можно считать смещение при таких вынужденных колебаниях, которые формируются однородной вынужденной волной, являющейся следом падающей звуковой волны, и краевыми неоднородными вынужденными волнами [64]. Краевые неоднородные вынужденные волны отличаются от краевых неоднородных свободных волн скоростью распространения. Распространение инерционных волн происходит со скоростью следа падающей звуковой волны $c_0/\sin\theta$ и не зависит от упругих характеристик материала, а определяется только массой ограждения, поэтому такие волны названы инерционными [64].

Уравнение смещений в инерционной волне записывается как [36]

$$\xi_{\text{И}} = \xi_{\text{ОИ}} e^{i[k_{01}(x \sin \alpha_0 + y \cos \alpha_0) + \psi]} . \quad (2.54)$$

Отсутствие смещений краев панели приводит к образованию неоднородных краевых волн [36]:

$$\left. \begin{aligned} \xi_{\text{Ia}} &= \xi_{0\text{Ia}} e^{k_0(x-a)\sqrt{1+\sin^2\alpha_x}}; \\ \xi_{\text{IIa}} &= \xi_{0\text{IIa}} e^{-k_0x\sqrt{1+\sin^2\alpha_x}}; \\ \xi_{\text{Ib}} &= \xi_{0\text{Ib}} e^{k_0(y-b)\sqrt{1+\sin^2\alpha_y}}; \\ \xi_{\text{IIb}} &= \xi_{0\text{IIb}} e^{-k_0y\sqrt{1+\sin^2\alpha_y}} \end{aligned} \right\} \quad (2.55)$$

где α_x, α_y – углы скольжения звуковой бегущей волны соответственно вдоль осей x и y .

Таким образом, под действием падающих звуковых волн в начальный момент времени в ограждении конечных размеров с ОПС возникает поле инерционных волн. Это волновое поле формируется инерционной бегущей волной и краевыми неоднородными инерционными волнами [64].

Суммарное смещение панели в инерционных волнах (2.54) и (2.55) определяется из следующего выражения [36]

$$\xi_{\text{И}} = \xi_{0\text{И}} \cdot X_{\text{И}} \cdot Y_{\text{И}}. \quad (2.56)$$

Здесь

$$X_{\text{И}} = \cos(k_0 \cdot x \cdot \sin \theta) - \left[1 + \gamma_a e^{-k_0 a \sqrt{1+\sin^2\alpha_x}} \right] e^{-k_0 x \sqrt{1+\sin^2\alpha_x}} + \gamma_a e^{k_0(x-a)\sqrt{1+\sin^2\alpha_x}};$$

$$Y_{\text{И}} = \cos(k_0 \cdot y \cdot \sin \theta) - \left[1 + \gamma_b e^{-k_0 b \sqrt{1+\sin^2\alpha_y}} \right] e^{-k_0 y \sqrt{1+\sin^2\alpha_y}} + \gamma_b e^{k_0(y-b)\sqrt{1+\sin^2\alpha_y}};$$

где $\gamma_a = \left[e^{-k_0 a \sqrt{1+\sin^2\alpha_x}} - \cos(k_0 a \cdot \sin \theta) \right] / \left[1 - e^{-2k_0 a \sqrt{1+\sin^2\alpha_x}} \right];$

$$\gamma_b = \left[e^{-k_0 b \sqrt{1+\sin^2\alpha_y}} - \cos(k_0 b \cdot \sin \theta) \right] / \left[1 - e^{-2k_0 b \sqrt{1+\sin^2\alpha_y}} \right].$$

2.8. Инерционное прохождение звука через ограждение

Амплитуда поперечных колебаний ограждения с ОПС в инерционных волнах определяется при совместном рассмотрении выражений (2.6) и (2.56) с учетом принципа наименьшего волнового движения [36]

$$\xi_{\text{ОИ}} = F_{\text{И}} \cdot \frac{P_{0m_0n_0} A_{\text{И}}}{\mu \cdot \omega^2}, \quad (2.57)$$

где $P_{0m_0n_0} = P_{\text{ОПАД.}} + P_{\text{ООТР.}} - P_{\text{ОПР.}}$; μ – поверхностная плотность ограждения с ОПС; $A_{\text{И}}$ – характеристика самосогласования звуковых полей с полем инерционных волн панели [36]

$$A_{\text{И}} = \frac{\int_0^a \int_0^b \sin \frac{m_0 \pi x}{a} \sin \frac{n_0 \pi y}{b} \sin \frac{m_{\text{И}} \pi x}{a} \sin \frac{n_{\text{И}} \pi y}{b} dx dy}{\int_0^a \int_0^b \sin^2 \frac{m_{\text{И}} \pi x}{a} \sin^2 \frac{n_{\text{И}} \pi y}{b} dx dy},$$

(2.58)

где $m_{\text{И}}$, $n_{\text{И}}$ – числа длин проекций инерционных полуволн по сторонам a и b соответственно.

Величина $F_{\text{И}}$ называется функцией отклика ограждения [64] и определяется по выражению [36]

$$F_{\text{И}} = G_{mn} / Q_{mn}. \quad (2.59)$$

Здесь

$$G_{mn} = \left\{ Q_m - \frac{\sin m\pi}{\pi(m^2 + m_1^2)} \cdot [m_1 \sin m\pi + m e^{-m_1\pi} + m\beta_a (1 + e^{-2m_1\pi})] \right\} \times \\ \times \left\{ Q_n - \frac{\sin n\pi}{\pi(n^2 + n_1^2)} \cdot [n_1 \sin n\pi + n e^{-n_1\pi} + n\beta_b (1 + e^{-2n_1\pi})] \right\},$$

$$\text{где } \beta_a = \frac{e^{-m_1\pi} - \cos m\pi}{1 - e^{-2m_1\pi}}; \beta_b = \frac{e^{-n_1\pi} - \cos n\pi}{1 - e^{-2n_1\pi}};$$

$$m = \frac{k_0 a}{\pi} \cdot \cos \alpha_x; \quad n = \frac{k_0 b}{\pi} \cdot \cos \alpha_y; \quad k_0 = 2\pi \cdot f / c_0;$$

$$m_1 = \frac{k_0 a}{\pi} \cdot \sqrt{1 + \sin^2 \alpha_x}; \quad n_1 = \frac{k_0 b}{\pi} \cdot \sqrt{1 + \sin^2 \alpha_y};$$

при этом $\cos^2 \alpha_x + \cos^2 \alpha_y + \cos^2 \theta_{cp} = 1$,

где α_x, α_y – углы скольжения звуковых волн вдоль сторон панели a и b соответ-

ственно: $\alpha_x = \arccos\left(b \cdot \sin \theta_{cp} / \sqrt{a^2 + b^2}\right)$, $\alpha_y = \arccos\left(a \cdot \sin \theta_{cp} / \sqrt{a^2 + b^2}\right)$;

θ_{cp} – средний угол падения волн диффузного звукового поля [64];

$$Q_{mn} = Q_m Q_n, \text{ где } Q_m = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\sin^2 m\pi}{2m\pi}\right); \quad Q_n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\sin^2 n\pi}{2n\pi}\right).$$

2.9. Излучение звука ограждением в режиме инерционных колебаний

Рассмотрим излучение звука ограждением в инерционном режиме в соответствии с теорией инерционного прохождения звука через ограждающие конструкции [64]. Звуковое давление, излученное инерционными волнами со стороны изолируемого от шума помещения, определится из выражения [36]

$$P_{2И} = P_{0И} \cos \frac{m_{02} \pi x}{a} \cos \frac{n_{02} \pi y}{b} e^{ik_{02} \cos \theta_2}. \quad (2.60)$$

Здесь

$$P_{0И} = \rho_0 c_0 \frac{\mathcal{G}_{0И} \cdot A_{2И}}{\cos \theta_{2И}}, \text{ где } \mathcal{G}_{0И} = \frac{\mathcal{G}_{0m_0 n_0}}{\cos \theta}; \quad \mathcal{G}_{0m_0 n_0} = i\omega \xi_{0m_0 n_0};$$

$A_{2И}$ – характеристика самосогласования волновых полей, определяемая по формуле (2.58).

Звуковая мощность, излучаемая инерционными волнами, определяется в соответствии с выражением (2.43) [36]

$$W_{2И} = \frac{\rho_0 c_0}{8} \frac{\mathcal{G}_{0m_0 n_0}^2}{\cos \theta} \frac{A_{2И}^2}{\cos \theta_{2И}} \cdot ab, \quad (2.61)$$

где $A_{2И} = 1$, так как инерционные волны являются следами падающих звуковых волн и для них $m_{И} \equiv m_0$, $n_{И} \equiv n_0$;

$\mathcal{G}_{0m_0n_0}$ – амплитуда колебательной скорости панели в инерционных волнах, определяемая из выражения $\mathcal{G}_{0m_0n_0}^2 = F_{\text{И}}^2 \frac{P_{0m_0n_0}^2}{\mu^2 \cdot \omega^2}$.

Из анализа выражения (2.61) следует, что акустическое излучение ограждающей конструкцией с ОПС в инерционных волнах определяется ее поверхностной плотностью, величиной функции отклика ограждения, углом падения звуковых волн и текущей частотой звука [36].

Для ограждения конечных размеров функция отклика изменяется в зависимости от соотношения длины проекции падающей звуковой волны и размеров пластины a, b , то есть определяется величиной чисел m, n и m_1, n_1 (см. формулу (2.59)).

При нецелочисленных m, n отклик ограждения в режиме инерционного прохождения звука снижается. Особенно значительно это снижение при $0 < m < 1; 0 < n < 1$, что для реальных строительных панелей соответствует области низких частот. На средних и высоких частотах отклик ограждения стабилизируется и $F_{\text{И}} \rightarrow 1$ [36].

2.10. Коэффициент инерционного прохождения звука

Определяем коэффициент звукопроницаемости при инерционном прохождении звука по аналогии с коэффициентом резонансного прохождения (см. п.2.6). Используя формулы (2.51) и (2.61), получаем выражение для коэффициента инерционного прохождения звука [36]

$$\tau_{\text{И}} = \frac{1}{\frac{\pi^2}{\rho_0^2 c_0^2 \cdot F_{\text{И}}^2} \cdot \mu^2 f^2 \cos \theta \cdot \cos \theta_{2\text{И}} + 1}, \quad (2.62)$$

где $\theta_{2\text{И}}$ – угол излучения инерционными волнами; $F_{\text{И}}$ – функция отклика ограждающей конструкции.

Из выражения (2.62) следует, что звукопроницаемость строительной панели с ОПС определяется ее поверхностной плотностью, размерами, а также углом падения звуковых волн и текущей частотой звука.

2.11. Звукоизоляция ограждений конечных размеров с ослабленным поперечным сечением с учетом двойственной природы прохождения звука

В разделах 2.1 ÷ 2.10 на базе теории самосогласования волновых полей были рассмотрены волновые процессы, возникающие в ограждающей конструкции с ОПС при воздействии на нее диффузного звукового поля. При этом отдельно рассмотрено прохождение звука с собственными и инерционными волнами. На данном этапе необходимо исследовать собственную звукоизоляцию ограждающей конструкции с ОПС с учетом двойственной природы прохождения звука.

В соответствии с рассмотренным выше механизмом прохождения звука, в волновом движении строительной панели, при воздействии на нее звуковых волн, участвуют собственные и инерционные волны. Согласно теории [64] инерционные волны существуют на каждой частоте, а на частотах собственных колебаний ограждения инерционная и свободная волны отличаются начальной фазой движения. Следовательно, можно говорить о независимости этих волн и справедливости принципа суперпозиции [36]

$$\tau = \tau_c + \tau_i, \quad (2.63)$$

где τ – суммарный коэффициент прохождения звука через ограждение;

τ_c – коэффициент резонансного прохождения звука через ограждение;

τ_i – коэффициент инерционного прохождения звука через ограждение.

Выражение (2.63) отражает двойственную природу прохождения звука – акустическая мощность в изолируемое помещение излучается как свободными упругими, так и инерционными волнами [36].

Звукоизоляция ограждающей конструкции – это величина, обратно пропорциональная коэффициенту прохождения звука τ . Следовательно, выражение для звукоизоляции запишется следующим образом:

$$R = 10 \lg \frac{1}{\tau} \quad \text{или} \quad R = 10 \lg \frac{1}{\tau_c + \tau_{\text{и}}}. \quad (2.64)$$

Для получения частотной зависимости звукоизоляции ограждающих конструкций с ОПС необходимо рассмотреть прохождение звука в различных диапазонах частот. Согласно теории самосогласования волновых полей вся частотная шкала делится на пять областей [37] – см. рис. 1.3: дорезонансная область, область простых резонансов, область простых пространственных резонансов (ПрПР), неполных пространственных резонансов (НПР) и полных пространственных резонансов (ППР). Для реальных строительных ограждений две первые области находятся в диапазоне низких частот ($f < 10 \div 40$ Гц) и не попадают в нормируемый диапазон частот $100 \div 3150$ Гц.

В дальнейшем будем рассматривать звукоизоляцию ограждающих конструкций с ОПС в областях простых, неполных и полных пространственных резонансов с учетом резонансного и инерционного прохождения звука.

2.11.1. Область простых пространственных резонансов

Область ПрПР ($f_{\Gamma m_0 n_0} < f < f_{\Gamma m_0}$) находится в диапазоне низких частот между граничной частотой ПрПР и граничной частотой НПР. Для рассматриваемой области частот выполняются условия самосогласования (2.31), необходимые для существования простых пространственных резонансов.

Граничная частота области ПрПР является наименьшей частотой, для которой выполняются условия (2.31). Ее величину можно определить по формуле (2.42), принимая наименьшие возможные условия падения звуковой волны:

$$\theta = \pi/2; m_0 = 1/2, \alpha_{m_0 n_0} = \pi/2 \quad [37]:$$

$$f_{\Gamma m_0 n_0} = \frac{c_0}{4a} + \Delta f_{\Gamma m_0 n_0}, \quad (2.65)$$

где c_0 – скорость звука в воздухе; a – длина строительной панели; $\Delta f_{\Gamma m_0 n_0}$ – положительная по знаку поправка до ближайшей большей частоты собственных колебаний ограждения с ОПС [65], [66].

Поправка $\Delta f_{\Gamma m_0 n_0}$ учитывает дискретность частот собственных колебаний строительных панелей ограниченных размеров.

Частоту собственных колебаний шарнирно-опертой прямоугольной панели можно определить по формуле [67]

$$f = \frac{\pi}{2} \cdot \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right) \sqrt{\frac{D}{\mu}}, \quad (2.66)$$

где m, n – числа длин проекций свободных полуволн по сторонам a и b соответственно; D – цилиндрическая жесткость ограждения с ОПС.

После определения граничной частоты ПрПП найдем значения звукоизоляции ограждения с ОПС в этой области частот. Подставляя в формулу (2.64) значения коэффициентов резонансного и инерционного прохождения звука (формулы (2.52) и (2.62) соответственно), получаем выражение звукоизоляции однослойного ограждения [36]

$$R = 10 \lg \frac{\pi^2 \cdot \mu^2 \cdot f^2 \cdot \cos^2 \theta_{\text{ср}}}{\rho_0^2 c_0^2 \cdot \left(F_{\text{И}}^2 + \frac{128 \cdot A_{0m_0 n_0}^4}{1,15 \cdot \pi^7 \cdot \eta} \right)}. \quad (2.67)$$

Характеристика самосогласования $A_{0m_0 n_0}$ определяется из выражения (2.41). После преобразований оно принимает вид [36]

$$A_{0m_0 n_0}^2 = \frac{\Delta N_P \cdot m_{\text{ср}}^4}{(m_{\text{ср}}^2 - m_{0\text{ср}}^2)^4}. \quad (2.68)$$

Здесь величины $m_{\text{ср}}, m_{0\text{ср}}$ определяются в соответствии с [66] по следующим выражениям:

$$m_{\text{ср}} = n_{\text{ср}} = \frac{7,981 \cdot a}{\sqrt[4]{\frac{D}{\mu}} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{a}{b}\right)^2}}; \quad m_{0\text{ср}} = 0,00411 \cdot f \cdot a; \quad \Delta N_P = \Delta f \cdot ab / 2\sqrt{D/\mu} - \text{число}$$

резонансов в полосе частот пропускания звука Δf [21].

2.11.2. Область неполных пространственных резонансов

Область НПР ($f_{\Gamma mn_0} < f < f_{\Gamma mn}$) находится в диапазоне средних и высоких частот между граничной частотой НПР и граничной частотой ППР. В этой области частот выполняются условия самосогласования (2.30) для существования неполных пространственных резонансов.

Граничная частота области НПР является наименьшей частотой, для которой выполняются условия (2.30). Ее величину можно определить по формуле (2.39), принимая наименьшие возможные условия падения звуковой волны:

$\theta = \pi/2; m_0 = m = 1$ (при $a \geq b$) [37]:

$$f_{\Gamma mn_0} = \frac{c_0}{2a \cdot \sin \alpha_{mn_0}} + \Delta f_{\Gamma mn_0} = \frac{c_0 \cdot \sqrt{a^2 + 4b^2}}{4 \cdot ab} + \Delta f_{\Gamma mn_0}, \quad (2.69)$$

где a, b – размеры строительной панели; $\Delta f_{\Gamma mn_0}$ – положительная по знаку поправка до ближайшей большей частоты собственных колебаний ограждения с ОПС, определяемая по формуле [37]

$$\Delta f_{\Gamma mn_0} = \frac{\pi \cdot O_{mn}}{b^2} \sqrt{\frac{D}{\mu}} \left(n_H + \frac{O_{mn}}{2} \right),$$

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

$O_{mn} = n - n_H$ – нерегулярная ступенчатая функция со значениями от 0 до 1.

Здесь n – целое число, ближайшее большее к n_H ; D – цилиндрическая жесткость ограждения с ОПС.

В области частот неполных ПР звукоизоляция ограждающей конструкции с ОПС определяется по схеме, аналогичной случаю простых ПР [36]

$$R = 10 \lg \frac{\pi^2 \cdot \mu^2 \cdot f^2 \cdot \cos^2 \theta_{cp}}{\rho_0^2 c_0^2 \cdot \left(F_H^2 + \frac{8 \cdot A_0^4}{1,15 \cdot \pi^3 \cdot \eta} \right)}. \quad (2.70)$$

Здесь характеристика самосогласования A_0 определяется из выражений (2.36), (2.38). После преобразований они принимают вид [36]

$$A_0^2 = \frac{m_{0\max} \cdot n^2}{(n^2 - n_{0\text{cp}}^2)^2} + \frac{n_{0\max} \cdot m^2}{(m^2 - m_{0\text{cp}}^2)^2}, \quad (2.71)$$

где $m_{0\max} = a \sqrt{\frac{4f^2}{c_0^2} - \frac{1}{b^2}}$; $n_{0\max} = b \sqrt{\frac{4f^2}{c_0^2} - \frac{1}{a^2}}$;

$$n_{0\text{cp}}^2 = \left(\frac{n_{0\max}}{2} \right)^2 ; \quad m_{0\text{cp}}^2 = \left(\frac{m_{0\max}}{2} \right)^2 ;$$

$$n^2 = b^2 \left(\frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{\mu}{D}} \cdot f - \frac{m_{0\text{cp}}^2}{a^2} \right) ; \quad m^2 = a^2 \left(\frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{\mu}{D}} \cdot f - \frac{n_{0\text{cp}}^2}{b^2} \right). \quad (2.72)$$

В выражениях (2.68), (2.71) величины $m_{0\text{cp}}$, $n_{0\text{cp}}$, $m_{0\max}$, $n_{0\max}$, являются характеристиками звуковых полей в плоскости ограждающей конструкции, а величины m , n относятся к собственному волновому полю ограждения.

2.11.3. Область полных пространственных резонансов

В зависимости от величины поверхностной плотности однослойного ограждения область ППР ($f > f_{\Gamma mn}$) может находиться в диапазоне средних или высоких частот. В области ППР выполняются условия полного самосогласования звуковых полей перед и за ограждением и волнового поля собственных колебаний самого ограждения (2.29).

Граничная частота области ППР является наименьшей частотой, для которой выполняются условия (2.29). Ее величину можно определить по формуле (2.34), принимая наиболее неблагоприятные условия падения звуковой волны: $\theta = \pi/2$ [37]:

$$f_{\Gamma mn} = \frac{c_0^2}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu}{D}} + \Delta f_{\Gamma mn}, \quad (2.73)$$

где D – цилиндрическая жесткость ограждающей конструкции с ОПС; $\Delta f_{\Gamma mn}$ – положительная по знаку поправка до ближайшей большей частоты собственных колебаний ограждения с ОПС.

Первое слагаемое в формуле (2.73) является выражением граничной частоты волнового совпадения f_{Γ} [5]. Для реальных строительных ограждений спектр частот собственных колебаний на высоких частотах достаточно плотный и различие между граничной частотой волнового совпадения и граничным ППР незначительное ($\Delta f_{\Gamma mn} \rightarrow 0$).

Определяем звукоизоляцию ограждающей конструкции с ОПС в области ППР ($f > f_{\Gamma mn}$) путем подстановки в формулу (2.64) значений коэффициентов резонансного и инерционного прохождения звука (формулы (2.53) и (2.62) соответственно) [36]

$$R = 10 \lg \frac{\pi^2 \cdot \mu^2 \cdot f^2 \cdot \cos^2 \theta_{cp}}{\rho_0^2 c_0^2 \cdot \left(F_{\text{и}}^2 + \frac{\pi \cdot f_{\Gamma mn} \cdot \bar{s}_{mn}}{8 \cdot f \cdot \eta} \right)}. \quad (2.74)$$

Здесь $f_{\Gamma mn}$ – граничная частота области ППР; \bar{s}_{mn} – усредненный по полосе частот коэффициент излучения звука, определяемый по формуле [36]

$$\bar{s}_{mn} = \frac{1}{\Delta f} \left(f_{\text{в}} \sqrt{1 - \frac{f_{\Gamma mn}}{f_{\text{в}}}} - f_{\text{н}} \sqrt{1 - \frac{f_{\Gamma mn}}{f_{\text{н}}}} \right), \quad (2.75)$$

где Δf – ширина полосы пропускания звука; $f_{\text{в}}$ и $f_{\text{н}}$ – верхняя и нижняя частоты полосы пропускания соответственно.

Таким образом, на базе теории самосогласования волновых полей проведено теоретическое исследование звукоизоляции однослойных ограждений конечных размеров с учетом ослабления их поперечного сечения. В разделах 2.11.1 ÷ 2.11.3 представлены расчетные формулы звукоизоляции в нормируемом диапазоне частот с учетом вклада в прохождение звука собственных и инерционных колебаний ограждения. На рис. 2.2 приведена теоретическая частотная характеристика звукоизоляции гипсобетонной панели с ОПС в сравне-

нии с экспериментальными данными, полученными в больших реверберационных камерах лаборатории акустики ННГАСУ. Расчет проведен по формулам (2.67), (2.70), (2.74) для областей ПрПП, НПП, ППП соответственно.

Можно видеть, что теоретическая и экспериментальная кривые имеют хорошую сходимость в нормируемом диапазоне частот. При этом провалы звукоизоляции на средних и высоких частотах соответствуют значениям граничных частот неполных и полных ПР, определенных по расчету.

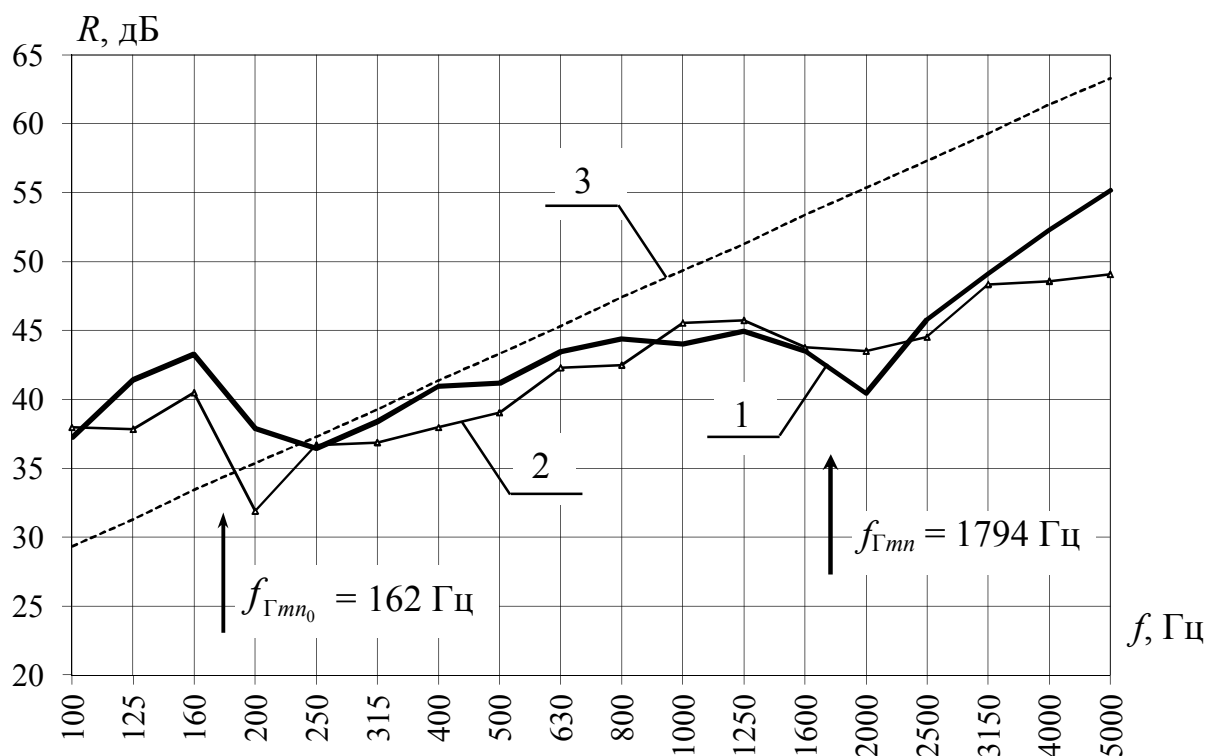


Рис. 2.2. Частотные характеристики звукоизоляции гипсобетонной панели с ОПС ($a \times b = 1,8 \times 1,0$ м; $h_{\text{П}} = 40$ мм; $\delta = 40$ мм; $\mu = 69,5$ кг/м², $D = 7704$ Па м³): 1 – теоретическая кривая; 2 – экспериментальная кривая; 3 – закон масс

2.12. Предельная звукоизоляция однослойных ограждающих конструкций конечных размеров

Анализируя выражения звукоизоляции ограждающих конструкций (2.67), (2.70), (2.74), можно видеть, что инерционное прохождение звука через строительную панель характеризуется левым слагаемым в знаменателе, а резонансное прохождение – правым слагаемым. Таким образом, звукоизоляция ограж-

дающих конструкций определяется соотношением резонансного и инерционного вкладов в прохождение звука [36].

Рассмотрим случай, когда основной вклад в излучение звука ограждением вносят инерционные волны, т. е. когда выполняется условие

$$\tau_{\text{и}} \gg \tau_{\text{с}}. \quad (2.76)$$

Здесь левая часть выражения характеризует инерционное прохождение звука (см. формулу (2.62)), а правая часть – резонансное прохождение (см. формулы (2.52) и (2.53)). Таким образом, в знаменателе выражений (2.67), (2.70) и (2.74) можно пренебречь правыми слагаемыми, отвечающими за резонансное прохождение звука через ограждение. После алгебраических преобразований выражение звукоизоляции ограждения принимает следующий вид [64]

$$R = 10 \lg \left(\frac{\mu \cdot f}{F_{\text{и}}} \right)^2 - 46,7. \quad (2.77)$$

В этом случае излучение звука в изолируемое помещение будет происходить только с инерционными волнами. Следовательно, звукоизоляция ограждения определяется только массой ограждающей конструкции, величиной функции отклика и текущей частотой звука и не зависит от самосогласования волновых полей и коэффициента потерь.

Таким образом, формула (2.77) является выражением предельной звукоизоляции однослойных ограждающих конструкций конечных размеров [36]. Значения звукоизоляции строительной панели с заданными поверхностной плотностью и размерами, рассчитанные по формуле (2.77), не смогут быть превышены за счет ослабления поперечного сечения или путем вибродемпфирования.

На рис. 2.3 приведены частотные характеристики звукоизоляции гипсобетонной панели с ОПС в сравнении с кривой предельной звукоизоляции, рассчитанной по формуле (2.77).



Рис. 2.3. Частотные характеристики звукоизоляции гипсобетонной панели с ОПС ($a \times b = 1,8 \times 1,0$ м; $h_{\text{П}} = 40$ мм; $\delta = 40$ мм; $\mu = 69,5$ кг/м², $D = 7704$ Па м³): 1 – теоретическая кривая; 2 – кривая предельной звукоизоляции панели; 3 – закон масс

Можно видеть, что на низких и средних частотах значения предельной звукоизоляции повышаются относительно закона масс в соответствии с изменением значений функции отклика. Для иллюстрации этого явления на рис. 2.4 приведена частотная характеристика функции отклика гипсобетонной панели, определенная в соответствии с выражением (2.59).

Из анализа рис. 2.4 следует, что излучение звука инерционными волнами значительно уменьшается на низких частотах, где $0 < m < 1$ (см. формулу (2.59)), т. е. при $f < f_{\text{Г.и}}$, где $f_{\text{Г.и}}$ – граничная частота инерционного прохождения звука, определяемая из следующего выражения [36]

$$f_{\text{Г.и}} = \frac{c_0 \sqrt{a^2 + 4b^2}}{4 \cdot ab \cdot \sin \theta_{\text{ср}}} \quad (2.78)$$

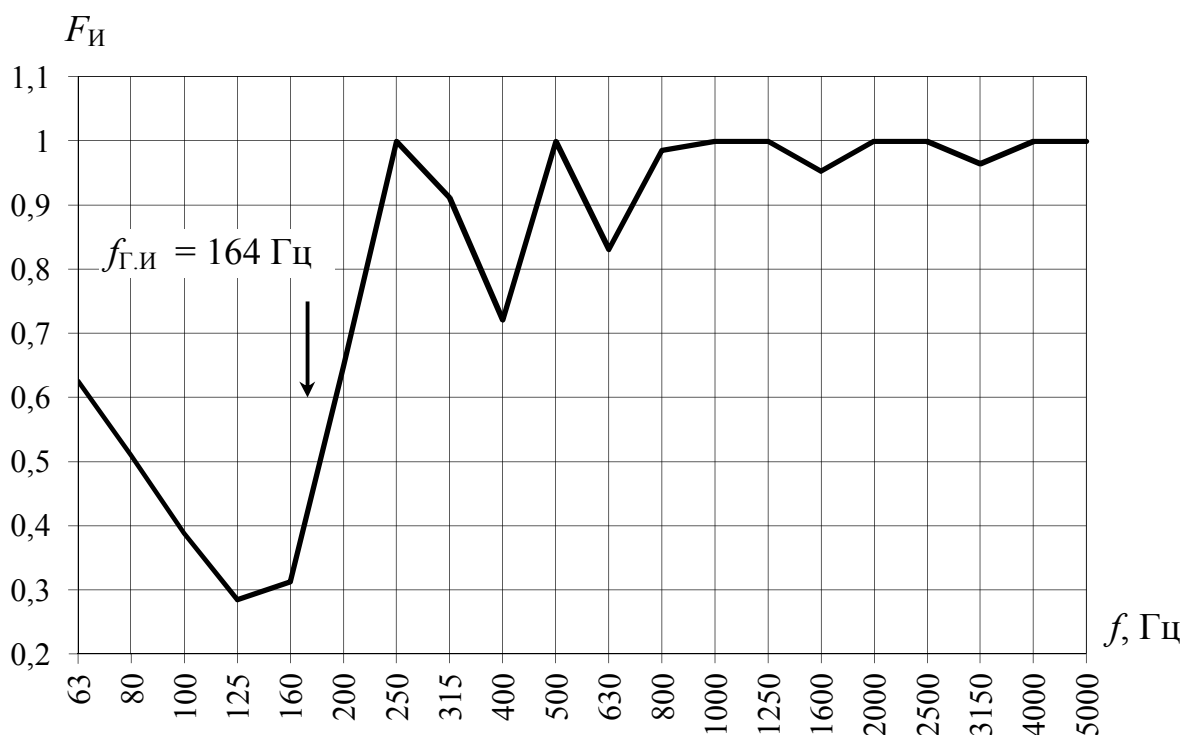


Рис. 2.4. Частотная характеристика функции отклика гипсобетонной панели размером $a \times b = 1,8 \times 1,0$ м

Расположение области пониженного инерционного прохождения звука зависит от размеров ограждающей конструкции в плане a и b . При увеличении размеров панели данная область смещается в диапазон более низких частот. Для ограждения бесконечных размеров $a \rightarrow \infty$, $b \rightarrow \infty$ повышения звукоизоляции не будет, т. к. $F_{И} \rightarrow 1$ во всем диапазоне частот. При этом формула (2.77) практически совпадает с известным выражением закона масс, т. е. закон масс является выражением предельной звукоизоляции для панелей неограниченных размеров [64].

3. Резервы повышения звукоизоляции однослойных ограждающих конструкций конечных размеров

3.1. Введение

Теорией самосогласования волновых полей установлено, что однослойные ограждающие конструкции конечных размеров во всех частотных диапазонах обладают предельными значениями звукоизоляции, которые определяются инерционным прохождением звука. Звукоизоляция реального ограждения всегда меньше своих предельных значений из-за наличия резонансной составляющей прохождения звука. Подавляющее большинство ограждающих конструкций зданий обладает резонансными свойствами, которые в большей или в меньшей степени снижают их звукоизоляцию. Исключение составляют материалы с повышенным внутренним демпфированием как, например, резина. Ее звукоизоляция определяется инерционным прохождением звука практически на всех частотах и приближается к своим предельным значениям – выполняется условие (2.76).

Из вышеизложенного следует, что однослойные ограждающие конструкции конечных размеров обладают резервами повышения звукоизоляции, которые можно определить как разницу между собственной звукоизоляцией ограждения и ее предельными значениями. Введем следующее выражение

$$\Delta r = R_{\text{ПРЕД}} - R, \quad (3.1)$$

где Δr , дБ – резервы повышения звукоизоляции однослойной ограждающей конструкции конечных размеров;

$R_{\text{ПРЕД}}$ – предельная звукоизоляция однослойной ограждающей конструкции конечных размеров, определяемая по формуле (2.77);

R – собственная звукоизоляция однослойной ограждающей конструкции конечных размеров, определяемая по формулам (2.67), (2.70), (2.74).

Величина Δr определяется во всем исследуемом диапазоне частот и зависит от соотношения резонансного и инерционного прохождения звука через ограждение. Данная величина характеризует снижение звукоизоляции ограж-

дающей конструкции относительно своих предельных значений за счет резонансного прохождения звука.

Рассмотрим резервы повышения звукоизоляции реальных ограждений, применяемых при проектировании зданий – перегородки из кирпичной кладки и гипсоволокнистого листа (ГВЛ), в качестве ограждения, обладающего меньшей поверхностной плотностью. На рис. 3.1 и 3.2. приведены частотные характеристики звукоизоляции данных панелей, определенные теоретически. Можно видеть, что для обоих ограждений существуют значительные резервы повышения звукоизоляции (заштрихованные области). Для кирпичной перегородки область наибольших резервов находится в диапазонах низких и средних частот, а для гипсоволокнистого листа – в диапазонах средних и высоких частот.

На рис. 3.3 представлены частотные зависимости резервов повышения звукоизоляции исследуемых ограждений.

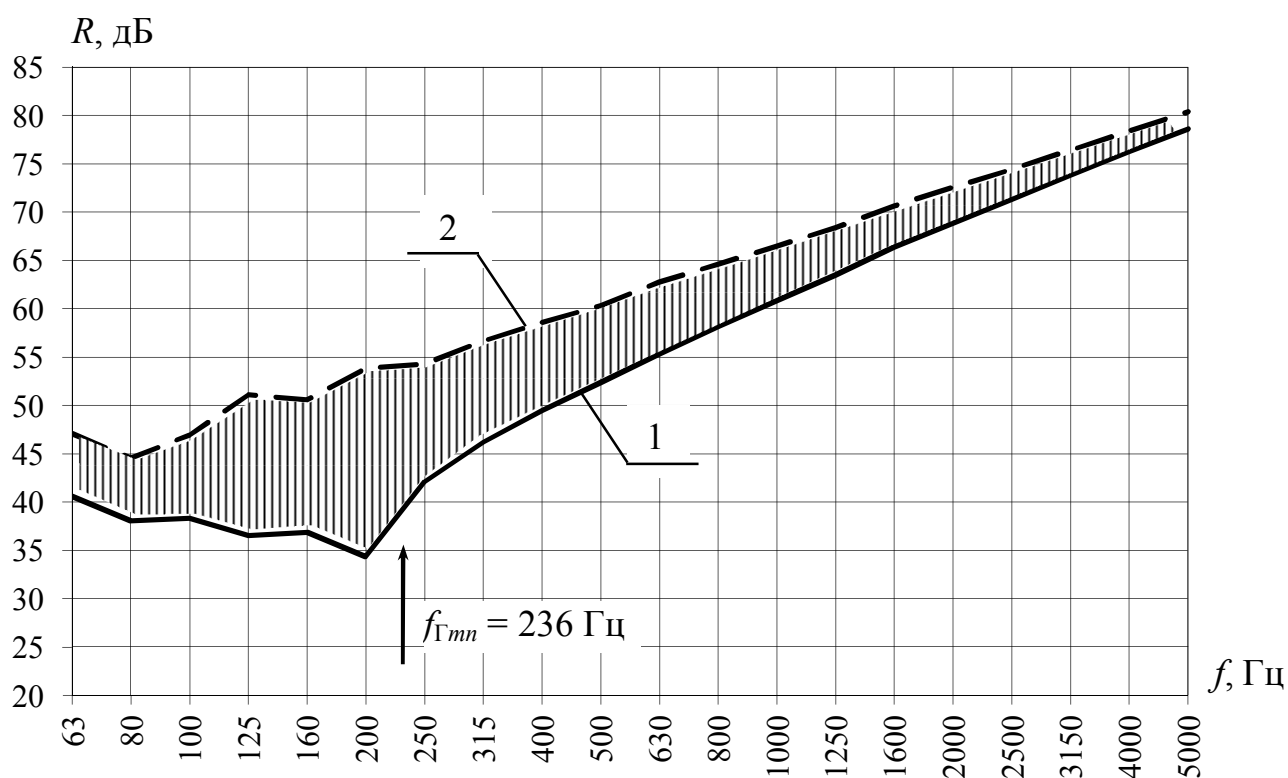


Рис. 3.1. Частотные характеристики звукоизоляции перегородки из кирпичной кладки ($a \times b = 6,0 \times 3,0$ м, $h = 250$ мм, $\mu = 450$ кг/м², $D = 3542$ кПа м³): 1 – теоретическая кривая; 2 – кривая предельной звукоизоляции

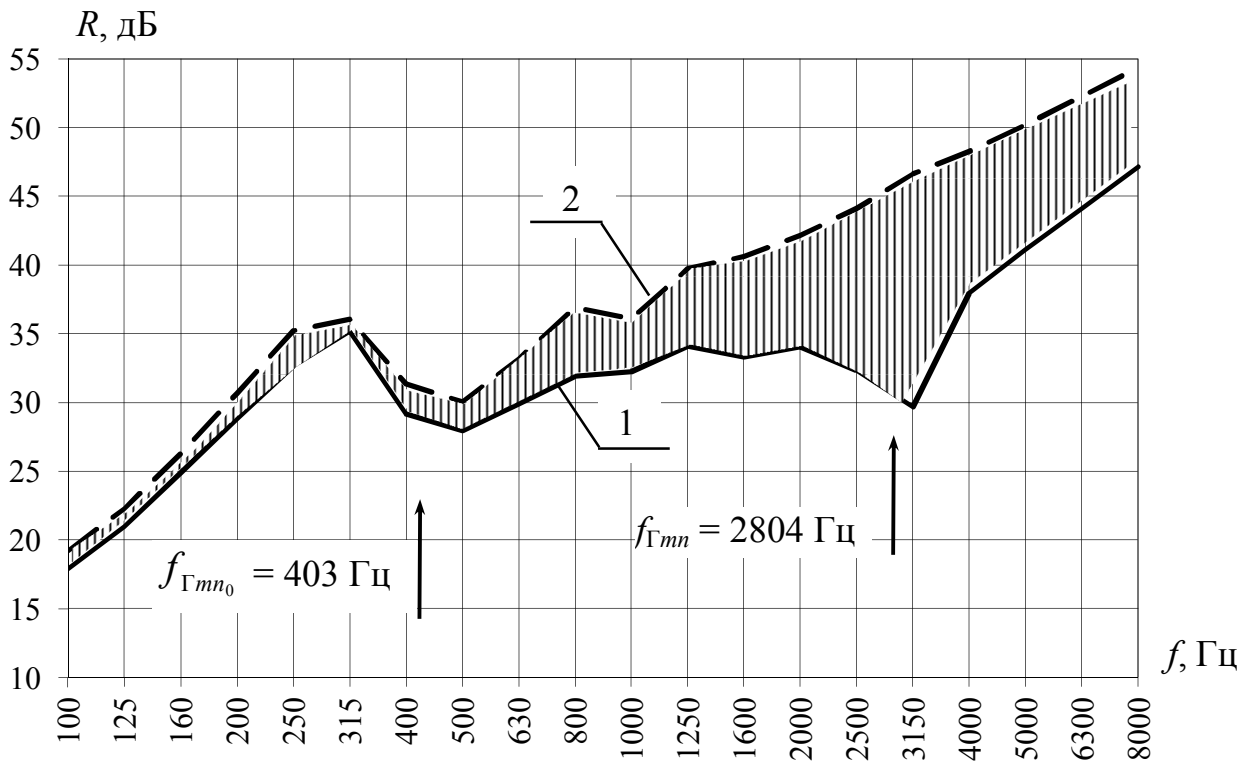


Рис. 3.2. Частотные характеристики звукоизоляции ГВЛ ($a \times b = 1,0 \times 0,5$ м, $h = 12,5$ мм, $\mu = 13,9$ кг/м², $D = 672$ Па м³): 1 – теоретическая кривая; 2 – кривая предельной звукоизоляции

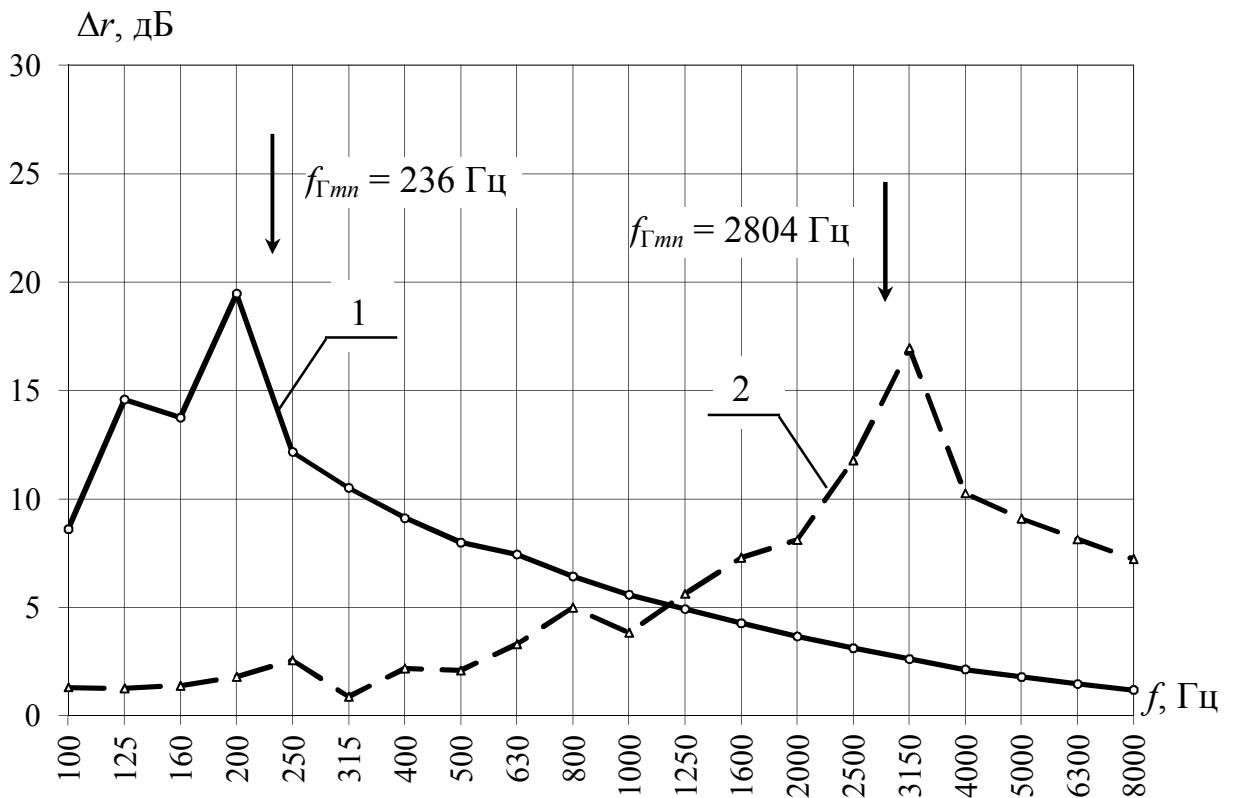


Рис. 3.3. Частотные характеристики резонансных отклонений: 1 – для перегородки из кирпичной кладки; 2 – для ГВЛ

Анализируя рис. 3.3 можно видеть, что наибольшие резонансные отклонения и, соответственно, области наибольших резервов повышения звукоизоляции расположены вблизи граничных частот полных ПР. В этой области частот происходит наибольшее снижение звукоизоляции ограждений, наблюдаемое также экспериментально.

Проведенные исследования показывают, что расположение области наибольших резервов повышения звукоизоляции (область с преобладающим влиянием резонансного прохождения звука, для которой $\tau_C > \tau_{II}$) зависит от соотношения поверхностной плотности и цилиндрической жесткости ограждающей конструкции μ/D . Кроме того, на величину резервов повышения звукоизоляции и их частотную зависимость оказывают влияние и другие параметры строительной панели (геометрические размеры, коэффициент потерь и др.), которые входят в выражения для τ_C и τ_{II} (см. формулы (2.52), (2.53), (2.62)).

3.2. Повышение звукоизоляции однослойных ограждающих конструкций путем использования внутренних резервов

По результатам выполненных теоретических исследований можно определить основную задачу при проектировании однослойных звукоизолирующих ограждающих конструкций конечных размеров: *необходимо максимально использовать внутренние резервы повышения звукоизоляции ограждающей конструкции, определяемые соотношением резонансного и инерционного прохождения звука.*

Для решения поставленной задачи необходимо определить основные способы, позволяющие повышать звукоизоляцию ограждающих конструкций и приближать ее к предельным значениям.

Из выражения (2.63) следует, что для снижения суммарного коэффициента прохождения звука через ограждение необходимо снижать резонансное или инерционное прохождение. Для этого необходимо установить степень влияния физико-механических параметров однослойных ограждений на прохождение звука в режиме собственных колебаний и режиме инерционных колебаний. На

рис. 3.4 представлены способы повышения звукоизоляции строительных панелей, которые разработаны по результатам проведенных теоретических исследований.

3.2.1. Снижение инерционного прохождения звука

Согласно выражению (2.62) звукопроницаемость ограждающей конструкции в инерционном режиме определяется следующими параметрами: поверхностной плотностью, величиной функции отклика, импедансом среды, и углом падения звуковых волн. Ниже рассмотрена возможность регулирования коэффициентом инерционного прохождения звука путем изменения каждого из этих параметров.

1) Коэффициент инерционного прохождения звука $\tau_{\text{и}}$ обратно пропорционален поверхностной плотности ограждающей конструкции μ . Возможность увеличения поверхностной плотности ограждения не рассматривается в данном исследовании, т. к. данный подход не позволяет рассмотреть внутренние резервы повышения звукоизоляции ограждения.

2) Коэффициент инерционного прохождения звука $\tau_{\text{и}}$ прямо пропорционален функции отклика ограждения $F_{\text{и}}$. Регулирование величиной $F_{\text{и}}$ возможно путем изменения размеров панели a и b , т. к. уменьшение размеров панели приводит к смещению области частот с пониженным излучением инерционными волнами на более высокие частоты. Однако при проектировании зданий геометрические размеры фиксированы и не могут значительно варьироваться. Поэтому принимаем $F_{\text{и}} = \text{const}$.

3) Импеданс среды с обеих сторон ограждающей конструкции принимаем постоянным – для воздуха $\rho_0 c_0 = 420 \text{ Па} \cdot \text{с/м}$.

4) В проводимом исследовании рассматривается воздействие диффузного звукового поля на строительную панель. При этом средний угол падения звуковой волны имеет постоянное значение: $\theta = \theta_{2\text{и}} = \theta_{\text{ср}} = 51,7575 \dots^\circ$ [64].

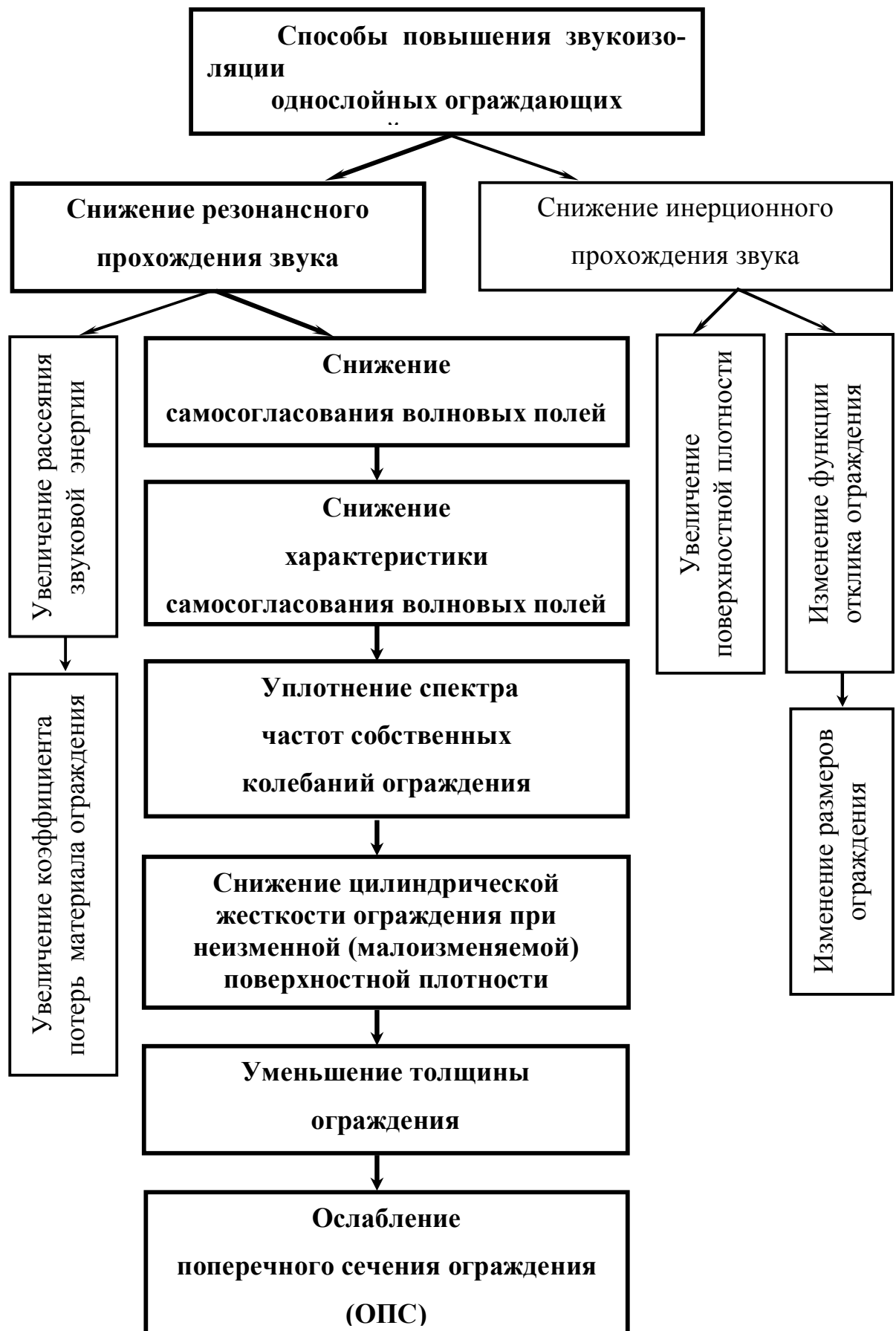


Рис. 3.4. Способы повышения звукоизоляции однослойных ограждающих конструкций конечных размеров

Из рассмотрения пунктов 1 ÷ 4 следует, что для однослойной ограждающей конструкции с неизменной (малоизменяемой) поверхностной плотностью и фиксированными геометрическими размерами коэффициент инерционного прохождения звука является малоизменяемой величиной.

3.2.2. Снижение резонансного прохождения звука

При постоянном значении инерционной составляющей прохождения звука через ограждение в качестве регулируемой величины остается резонансное прохождение. Как установлено выше, коэффициент резонансного прохождения звука различен для частот ниже и выше граничной частоты ППР.

В диапазоне $f < f_{\Gamma mn}$ звукопроницаемость строительной панели в режиме собственных колебаний определяется шестью параметрами: поверхностной плотностью, характеристикой самосогласования волновых полей, коэффициентом потерь материала, импедансом среды, а также углом падения звуковых волн и текущей частотой звука (см. формулу (2.52)). Величины импеданса среды, угла падения звуковых волн, и рассматриваемый диапазон частот постоянны. Возможность увеличения поверхностной плотности ограждения в данном исследовании также не рассматривается. В качестве параметров регулирования резонансным прохождением звука рассмотрим коэффициент потерь материала ограждающей конструкции и характеристику самосогласования волновых полей.

1) Коэффициент резонансного прохождения звука обратно пропорционален величине коэффициента потерь материала ограждения. Это означает, что для уменьшения излучения звука ограждением в режиме собственных колебаний необходимо увеличивать потери колебательной энергии. Повышение коэффициента потерь материала ограждающей конструкции достигается путем нанесения на ее поверхность вибродемпфирующих покрытий различных типов. Звукоизоляция таких ограждений подробно исследовалась многими учеными [68], [69].

Известно, что для эффективного использования вибродемпфирующих покрытий их толщина должна быть соизмерима с толщиной самого ограждения, либо превышать ее в $1,5 \div 2,5$ раза. Поэтому данный способ повышения звукоизоляции неприменим для реальных строительных панелей, обладающих сравнительно большими значениями толщины и поверхностной плотности.

Таким образом, в качестве единственного параметра эффективного регулирования резонансным прохождением звука через ограждающую конструкцию является характеристика самосогласования звуковых полей с обеих сторон ограждения и собственного волнового поля самого ограждения.

2) Звукопроницаемость ограждения в режиме собственных колебаний прямо пропорциональна характеристике самосогласования волновых полей. Поэтому наибольшее прохождение звука происходит на граничной частоте ППР, где выполняются условия (2.29). С целью уменьшения резонансного прохождения звука через строительную панель необходимо установить способы уменьшения самосогласования волновых полей.

Рассмотрим резонансное прохождение звука в области неполных пространственных резонансов – область IV на рис. 1.3. В данной области частот характеристика самосогласования принимает свои наибольшие значения (вблизи граничного ППР), и звукоизоляция ограждения значительно снижается благодаря интенсивному излучению звука в режиме собственных колебаний.

В области НПР характеристика самосогласования определяется выражением (2.71), из которого следует, что численные значения характеристики самосогласования волновых полей определяются соотношением чисел m , m_0 и n , n_0 . В соответствии с выражением (2.8) при постоянном звуковом давлении, действующем на ограждение, характеристики звукового поля в его плоскости будут постоянными – $m_{0\max}$, $n_{0\max}$, $m_{0\text{ср}}$, $n_{0\text{ср}} = \text{const}$. Следовательно, регулировать самосогласование волновых полей можно только путем изменения характеристик собственного волнового поля ограждения m и n .

Обозначим постоянные величины $m_{0\max}$ и $n_{0\text{cp}}^2$ как c_1 и c_2 , а переменную n как x , соответственно. Тогда выражение (2.71) можно представить как следующую зависимость

$$f(x) = \frac{c_1}{\left(x - \frac{c_2}{x}\right)^2}. \quad (3.2)$$

Отметим, что для упрощения данного представления было использовано только первое слагаемое из формулы (2.71). Аналогичное преобразование можно провести и для второго слагаемого (в этом случае в качестве переменной величины будет выступать число m).

Из выражения (3.2) следует, что характеристика самосогласования имеет гиперболическую зависимость от чисел m и n . При увеличении длин свободных полуволн в ограждении самосогласование волновых полей будет последовательно уменьшаться (при $x \rightarrow \infty$, $f(x) \rightarrow 0$). Данная зависимость проиллюстрирована на рис. 3.5.

Числа m и n являются характеристиками собственного волнового поля строительной панели и определяются ее поверхностной плотностью, цилиндрической жесткостью и геометрическими размерами (см. формулу (2.71)). Из всех данных параметров регулирование возможно проводить только для цилиндрической жесткости ограждающей конструкции (при неизменной (малоизменяемой) поверхностной плотности). Рассмотрим данную возможность более подробно.

Произведем следующее обозначение постоянных величин:

$$c_3 = \frac{a^2 2 \cdot f}{\pi} \cdot \sqrt{\mu}; \quad c_4 = \frac{n_{0\text{cp}}^2 \cdot a^2}{b^2}, \quad \text{тогда выражение для чисел } m \text{ из формулы (2.71)}$$

можно представить как зависимость

$$f(x) = \frac{c_3}{x} - c_4, \quad (3.3)$$

где x – переменная величина, которая характеризует цилиндрическую жесткость ограждающей конструкции.

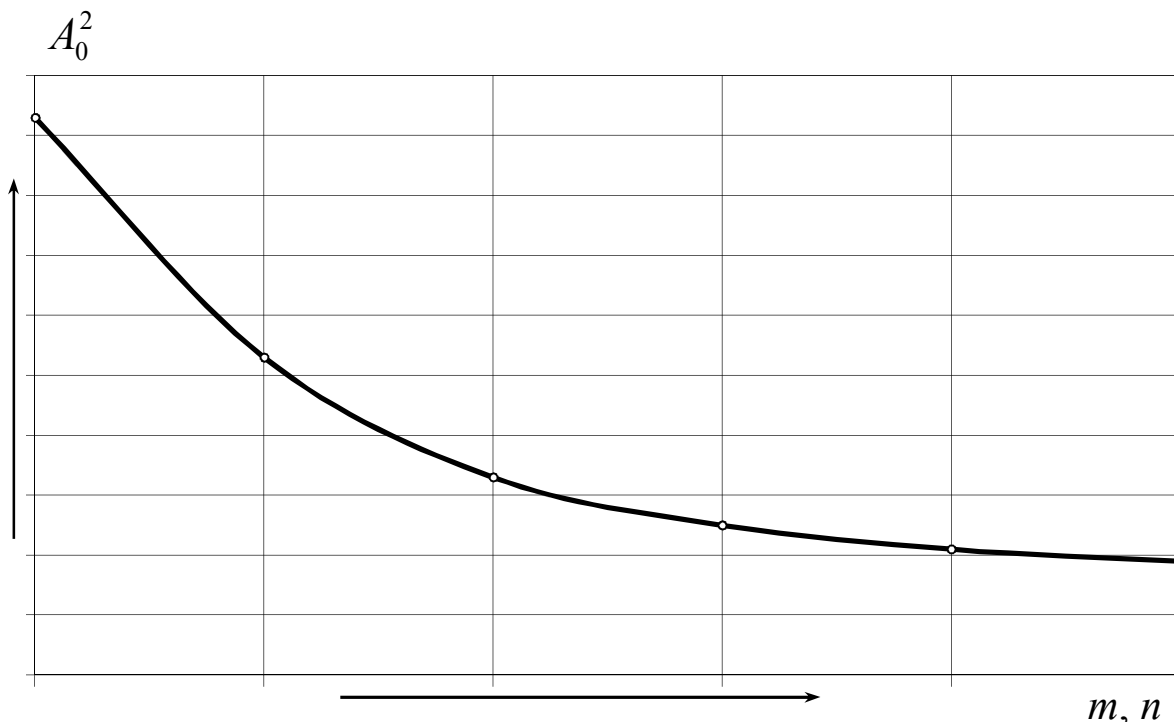


Рис. 3.5. Обобщенная зависимость характеристики самосогласования волновых полей от чисел m и n

Анализируя выражение (3.3) можно видеть, что числа длин свободных полуволн в ограждении имеют обратно пропорциональную зависимость от цилиндрической жесткости (при $x \rightarrow 0$, $f(x) \rightarrow \infty$). Это означает, что при уменьшении цилиндрической жесткости ограждающей конструкции (при неизменной (малоизменяемой) поверхностной плотности) ее собственное волновое поле будет уплотняться за счет увеличения чисел m и n . Данная зависимость показана на рис. 3.6.

Проведенное теоретическое рассмотрение позволяет установить следующую последовательность действий с целью снижения резонансного прохождения звука через однослойную ограждающую конструкцию конечных размеров: *снижение цилиндрической жесткости ограждения \rightarrow увеличение чисел m и n (уплотнение спектра частот собственных колебаний) \rightarrow уменьшение характеристики самосогласования волновых полей \rightarrow снижение резонансного прохождения звука через ограждение.*

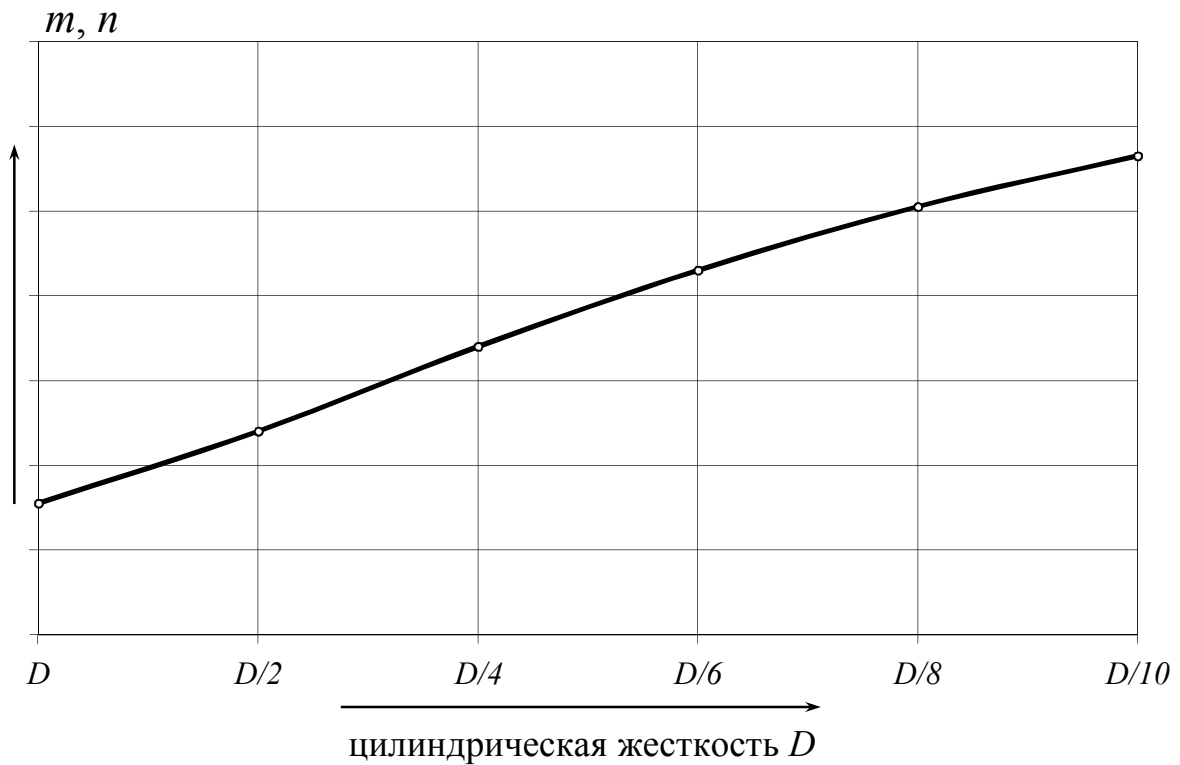


Рис. 3.6. Обобщенная зависимость чисел m и n от цилиндрической жесткости ограждающей конструкции

Данная последовательность показана на рис. 3.4 полужирным выделением текста.

Известно, что цилиндрическая жесткость однослойной ограждающей конструкции определяется выражением

$$D = \frac{E \cdot h^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)}, \quad (3.4)$$

где E – модуль упругости материала; ν – коэффициент Пуассона; h – толщина ограждения.

Для снижения цилиндрической жесткости ограждающей конструкции необходимо уменьшать либо ее толщину, либо модуль упругости. Причем, данные изменения должны проводиться без изменения поверхностной плотности ограждения. На рис. 3.7 показана зависимость цилиндрической жесткости ограждения от степени уменьшения его толщины.

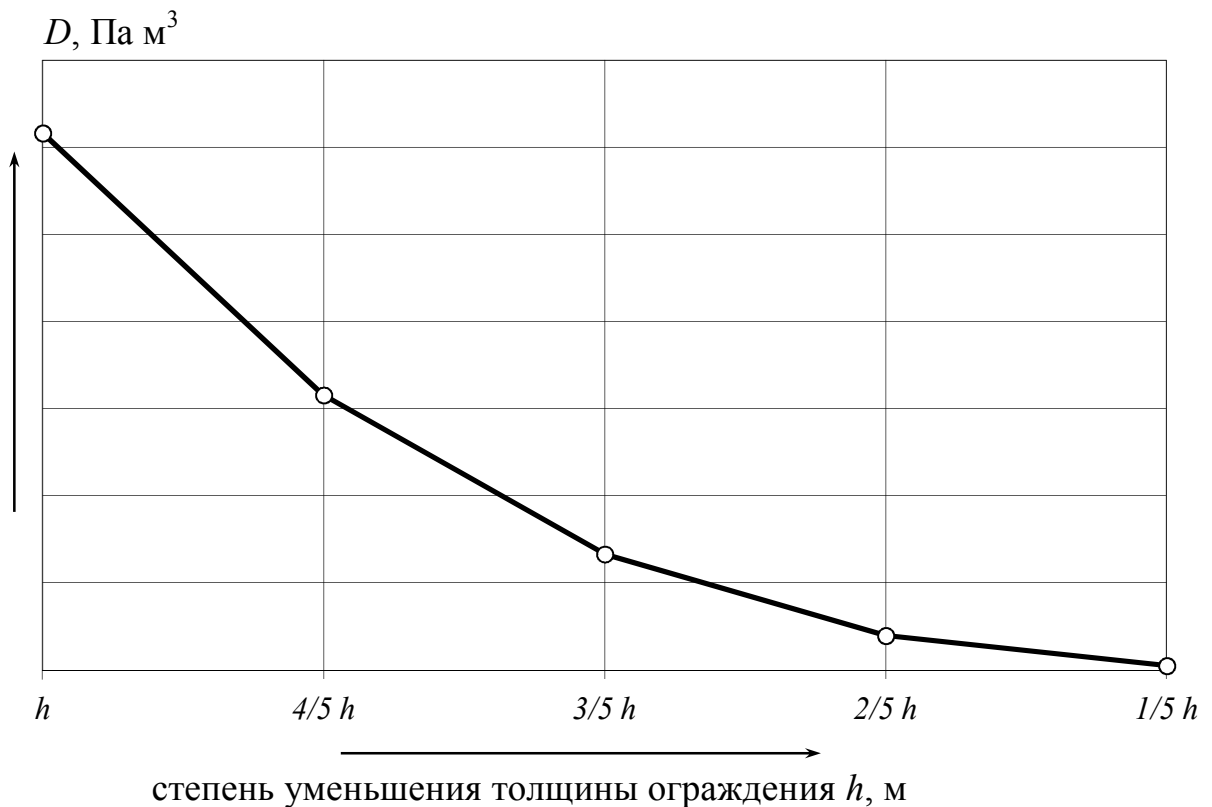


Рис. 3.7. Обобщенная зависимость цилиндрической жесткости ограждающей конструкции от степени уменьшения его толщины

Уменьшить толщину однослойной ограждающей конструкции при неизменной (малоизменяемой) поверхностной плотности можно путем ослабления поперечного сечения (ОПС) ограждения. При этом фактическая толщина панели уменьшается за счет нанесения продольных и поперечных прорезей на лицевую поверхность ограждения, а его поверхностная плотность практически не изменяется (незначительно уменьшается за счет объема прорезей).

Это позволяет значительно уменьшить отношение D/μ и снизить звукопроницаемость ограждения в резонансном режиме. Теоретические основы прохождения звука через однослойные ограждения конечных размеров с ОПС были рассмотрены в разделе 2.

По результатам проведенных теоретических исследований определен основной способ повышения звукоизоляции однослойных ограждающих конст-

рукций конечных размеров путем использования их внутренних резервов – способ ослабления поперечного сечения (ОПС) ограждения.

3.3. Оптимальные параметры однослойных ограждающих конструкций конечных размеров

Выше было установлено, что резонансное прохождение звука через однослойную ограждающую конструкцию конечных размеров определяется поверхностной плотностью, цилиндрической жесткостью, геометрическими размерами и коэффициентом потерь. Соответственно, каждая конкретная строительная панель обладает собственной резонансной звукопроницаемостью в зависимости от соотношения перечисленных параметров.

Рассмотрим подходы для определения оптимальных параметров ограждающих конструкций, при которых резервы повышения звукоизоляции будут использоваться наиболее эффективно.

Основные параметры строительной панели с ОПС – это глубина и шаг прорезей, которые наносятся на одну из лицевых поверхностей ограждения в процессе изготовления или монтажа. Фрагмент ограждения с ОПС показан на рис. 2.1.

Шаг прорезей должен быть таким, чтобы ограждение совершало изгибные колебания только в пределах толщины $h_{П}$. Данное условие выполняется, если шаг прорезей не превышает четверть длины изгибной волны [70]

$$d < \frac{\lambda_{и}}{4}, \quad (3.5)$$

где $\lambda_{и}$ – длина изгибной волны в ограждении, определяемая по известному выражению

$$\lambda_{и} = \sqrt[4]{\frac{4\pi^2 \cdot D}{\mu \cdot f^2}}. \quad (3.6)$$

Основная задача при проектировании ограждающих конструкций с ОПС – это повышение их звукоизоляции в области частот неполных ПР, особенно

вблизи провала на граничном пространственном резонансе. Поэтому условие (3.5) должно выполняться вплоть до граничной частоты полных ПР

$$d < \frac{1}{4} \sqrt[4]{\frac{4\pi^2 \cdot D}{\mu \cdot f_{\Gamma mn}^2}}, \quad (3.7)$$

где $f_{\Gamma mn}$ – граничная частота области ППР, определяемая по формуле (2.73).

При выполнении ОПС ограждающей конструкции необходимо стремиться к минимальной ширине прорезей a , чтобы они оказывали как можно меньшее влияние на изменение поверхностной плотности ограждения.

Основным параметром строительной панели с ОПС является глубина ослабления сечения, т. к. именно она определяет цилиндрическую жесткость ограждения. Поэтому необходимо получить аналитическую зависимость оптимальной толщины ограждения $h_{\text{ОПТ}}$ от физико-механических параметров ограждающей конструкции. Для упрощения расчета сначала определим оптимальную цилиндрическую жесткость ограждения $D_{\text{ОПТ}}$, откуда легко можно будет определить $h_{\text{ОПТ}}$.

Введем определение: *оптимальная цилиндрическая жесткость однослойной ограждающей конструкции конечных размеров* – это жесткость, при которой резонансное прохождение звука через ограждение минимальное, а его звукоизоляция максимально приближается к своим предельным значениям, которые определяются инерционным прохождением звука во всем рассматриваемом диапазоне частот

$$\tau_{\text{И}} \gg \tau_{\text{С}}; R \rightarrow R_{\text{ПРЕД}}. \quad (3.8)$$

В качестве критериев максимального повышения звукоизоляции могут выступать две зависимости:

- 1) предельная звукоизоляция ограждения, определяемая только инерционным прохождением звука: $\tau_{\text{С}} = 0; R = R_{\text{ПРЕД}}$. (см. формулу (2.77));
- 2) закон масс: $\tau_{\text{И}} \gg \tau_{\text{С}}; R = 20 \lg(\mu f) - 47,5$.

Предварительно, первая зависимость кажется более предпочтительной, т. к. она устанавливает способ достижения предельных значений звукоизоляции

ограждения. Однако для реальных строительных панелей, применяемых в зданиях и сооружениях, полное исключение резонансного прохождения звука ($\tau_c = 0$) с помощью ОПС невозможно. Это связано с тем, что ограждающая конструкция будет излучать звук с собственными волнами, обладая даже минимальной цилиндрической жесткостью.

Поэтому в качестве критерия оптимального повышения звукоизоляции реальных ограждающих конструкций принимаем известный «закон масс». Данный случай соответствует минимальной резонансной звукопроницаемости ограждения ($\tau_{и} \gg \tau_c$). В области средних и высоких частот звукоизоляция ограждающей конструкции по закону масс незначительно (от 0 до 1 дБ) отличается от предельной звукоизоляции, определенной по формуле (2.77).

Рассмотрим область неполных пространственных резонансов. На границе областей неполных и полных ПР находится основной провал звукоизоляции ограждающих конструкций – граничный полный ПР. Поэтому возможность повышения звукоизоляции ограждения в области НПР вплоть до предельных значений является наиболее предпочтительной.

Согласно теории самосогласования волновых полей звукоизоляция ограждений в области НПР определяется по формуле (2.70).

С учетом выражения (3.8) записываем выражение оптимальной звукоизоляции однослойных ограждающих конструкций конечных размеров

$$R_{\text{ОПТ.}} = R_{\text{з.м.}}, \quad (3.9)$$

где $R_{\text{з.м.}}$ – звукоизоляция ограждения по закону масс.

Введем следующее определение: *оптимальная звукоизоляция однослойной ограждающей конструкции конечных размеров – звукоизоляция, при которой максимально эффективно используются внутренние резервы ее повышения путем подбора оптимальных параметров ограждения.*

После подстановки в формулу (3.9) выражения звукоизоляции однослойного ограждения в области НПР, получаем

$$10 \lg \frac{\pi^2}{\rho_0^2 c_0^2} \cdot \frac{\mu^2 \cdot f^2}{2,61 \cdot F_{\text{И}}^2 + \frac{0,586 \cdot A_0^4}{\eta}} = 20 \lg \mu \cdot f - 47,5.$$

Проведем преобразование данного выражения, используя правила логарифмирования:

$$10 \lg(5,6 \cdot 10^{-5}) + 20 \lg(\mu \cdot f) - 10 \lg \left(2,61 \cdot F_{\text{И}}^2 + 0,586 \cdot \frac{A_0^4}{\eta} \right) = 20 \lg(\mu \cdot f) - 47,5 ;$$

$$\lg \left(2,61 \cdot F_{\text{И}}^2 + 0,586 \cdot \frac{A_0^4}{\eta} \right) = \frac{47,5 - 42,5}{10} ;$$

$$2,61 \cdot F_{\text{И}}^2 + 0,586 \cdot \frac{A_0^4}{\eta} = 10^{0,5} ; \rightarrow A_0^4 = 4,454 \cdot \eta \cdot (1,211 - F_{\text{И}}^2) ;$$

отсюда получаем выражение оптимальной характеристики самосогласования волновых полей

$$A_{0\text{опт}}^2 = \sqrt{4,454 \cdot \eta \cdot (1,211 - F_{\text{И}}^2)} . \quad (3.10)$$

Кроме того, характеристика самосогласования зависит от соотношения чисел длин проекций звуковых и свободных полуволен и для области НПР может быть определена по формуле (2.71).

Введем следующие обозначения:

$$\sqrt{\frac{4f^2}{c_0^2} - \frac{1}{b^2}} = Z_1 ; \sqrt{\frac{4f^2}{c_0^2} - \frac{1}{a^2}} = Z_2 ; \sqrt{\frac{\mu}{D}} = X ,$$

тогда $m_{0\text{max}} = a \cdot Z_1 ; n_{0\text{max}} = b \cdot Z_2 ; n_{0\text{cp}}^2 = \frac{b^2 \cdot Z_2^2}{4} ; m_{0\text{cp}}^2 = \frac{a^2 \cdot Z_1^2}{4} ;$

$$m^2 = a^2 \left(\frac{2}{\pi} \cdot f \cdot X - \frac{Z_2^2}{4} \right) , n^2 = b^2 \left(\frac{2}{\pi} \cdot f \cdot X - \frac{Z_1^2}{4} \right) .$$

С учетом этого, выражение (2.71) переписывается в следующем виде

$$\begin{aligned}
A_0^2 &= \frac{a \cdot Z_1 \cdot b^2 \cdot \left(\frac{2f \cdot X}{\pi} - \frac{Z_1^2}{4} \right) + b \cdot Z_2 \cdot a^2 \cdot \left(\frac{2f \cdot X}{\pi} - \frac{Z_2^2}{4} \right)}{\left(b^2 \cdot \left(\frac{2f \cdot X}{\pi} - \frac{Z_1^2}{4} \right) - \frac{b^2 \cdot Z_2^2}{4} \right)^2 + \left(a^2 \cdot \left(\frac{2f \cdot X}{\pi} - \frac{Z_2^2}{4} \right) - \frac{a^2 \cdot Z_1^2}{4} \right)^2} = \\
&= \frac{a \cdot Z_1 \cdot \left(\frac{2f \cdot X}{\pi} - \frac{Z_1^2}{4} \right) + b \cdot Z_2 \cdot \left(\frac{2f \cdot X}{\pi} - \frac{Z_2^2}{4} \right)}{b^2 \cdot \left(\frac{2f \cdot X}{\pi} - \frac{Z_1^2}{4} - \frac{Z_2^2}{4} \right)^2 + a^2 \cdot \left(\frac{2f \cdot X}{\pi} - \frac{Z_2^2}{4} - \frac{Z_1^2}{4} \right)^2}.
\end{aligned}$$

После дополнительных алгебраических преобразований выражение характеристики самосогласования приобретает вид

$$A_0^2 = \frac{\frac{2f \cdot X}{\pi} \cdot (a^3 Z_1 + b^3 Z_2) - \frac{1}{4} \cdot (a^3 Z_1^3 + b^3 Z_2^3)}{a^2 b^2 \cdot \left(\frac{4f^2 X^2}{\pi^2} - \frac{f \cdot X \cdot (Z_1^2 + Z_2^2)}{\pi} + \frac{(Z_1^2 + Z_2^2)^2}{16} \right)}. \quad (3.11)$$

Формулы (3.9) и (3.10) выражают одну и ту же величину A_0^2 , поэтому их можно приравнять:

$$\frac{\frac{2f \cdot X}{\pi} \cdot (a^3 Z_1 + b^3 Z_2) - \frac{1}{4} \cdot (a^3 Z_1^3 + b^3 Z_2^3)}{a^2 b^2 \cdot \left(\frac{4f^2 X^2}{\pi^2} - \frac{f \cdot X \cdot (Z_1^2 + Z_2^2)}{\pi} + \frac{(Z_1^2 + Z_2^2)^2}{16} \right)} = \sqrt{4,454 \cdot \eta \cdot (1,211 - F_{II}^2)}. \quad (3.12)$$

Принимаем условие, что ограждающая конструкция имеет постоянные геометрические размеры a, b . Тогда в уравнении (3.12) неизвестной является только одна величина – $\sqrt{\mu/D} = X$. Так как мы приравняли формулы (3.10) и (3.11), то $A_0^2 = A_{0\text{ОПТ}}^2$.

Это означает, что если выразить величину X из уравнения (3.12), то мы получим значение оптимального отношения $\sqrt{\mu/D_{\text{ОПТ}}}$.

Проведем преобразование уравнения (3.12)

$$\frac{2f \cdot X}{\pi} \cdot (a^3 Z_1 + b^3 Z_2) - \frac{1}{4} \cdot (a^3 Z_1^3 + b^3 Z_2^3) = \sqrt{4,454 \cdot \eta \cdot (1,211 - F_{II}^2)} \times$$

$$\times a^2 b^2 \cdot \left(\frac{4f^2 X^2}{\pi^2} - \frac{f \cdot X \cdot (Z_1^2 + Z_2^2)}{\pi} + \frac{(Z_1^2 + Z_2^2)^2}{16} \right).$$

Для упрощения преобразований введем следующее обозначение

$$\sqrt{4,454 \cdot \eta \cdot (1,211 - F_{\text{н}}^2)} = \varphi.$$

После дополнительных преобразований получаем квадратное уравнение

$$\alpha \cdot X^2 - \beta \cdot X + \gamma = 0, \quad (3.13)$$

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

$$\alpha = \frac{4f^2}{\pi^2} \cdot a^2 b^2 \varphi; \quad \beta = \frac{f}{\pi} \cdot [2 \cdot (a^3 z_1 + b^3 z_2) + a^2 b^2 \varphi (z_1^2 + z_2^2)];$$

$$\gamma = \frac{1}{4} (a^3 z_1^3 + b^3 z_2^3) + \frac{1}{16} a^2 b^2 \varphi (z_1^2 + z_2^2)^2.$$

Таким образом, выражение (3.12) преобразовалось в квадратное уравнение (3.13), решением которого являются два корня:

$$X_1 = \frac{\beta + \sqrt{\beta^2 - 4 \cdot \alpha \cdot \gamma}}{2 \cdot \alpha}, \quad X_2 = \frac{\beta - \sqrt{\beta^2 - 4 \cdot \alpha \cdot \gamma}}{2 \cdot \alpha}. \quad (3.14)$$

Для определения оптимальных параметров ограждения выбираем корень уравнения X_1 . Корень X_2 в данном случае отбрасываем, т. к. $X_2 < X_1$ и, соответственно, $D_2 > D_1$. При этом оптимизация параметров происходит за счет увеличения толщины ограждения, что невозможно без увеличения его поверхностной плотности.

Отметим, что коэффициенты в уравнении (3.13) зависят от текущей частоты звука. Поэтому для каждой среднегеометрической частоты рассматриваемого диапазона будет существовать свое решение. Нетрудно определить, что значения X_1 будут уменьшаться по мере приближения к граничной частоте области ППР. Выше было установлено, что для максимального снижения резонансного прохождения звука ограждение должно иметь минимальную цилиндрическую жесткость при неизменной (малоизменяемой) поверхностной плотности. Следовательно из полученного массива значений X_1 необходимо выбрать $X_{1\text{max}}$, которому соответствует D_{min} .

Таким образом, оптимальное соотношение поверхностной плотности и цилиндрической жесткости ограждающей конструкции запишется как

$$\sqrt{\frac{\mu}{D_{\text{опт.}}}} = X_1. \quad (3.15)$$

Отсюда определяем оптимальную цилиндрическую жесткость ограждения ($D_{\text{опт.}}$), Па м³, при заданной поверхностной плотности

$$D_{\text{опт.}} = \frac{\mu}{X_1^2}. \quad (3.16)$$

Используя формулу (3.4), получаем выражение оптимальной толщины однослойной ограждающей конструкции конечных размеров

$$h_{\text{опт.}} = \sqrt[3]{\frac{12 \cdot \mu \cdot (1 - \nu^2)}{E \cdot X_1^2}}, \quad (3.17)$$

где X_1 имеет минимальное значение из всего диапазона частот, участвующих в расчете (область НПР).

Выражение (3.17) имеет следующий физический смысл: *если ограждающая конструкция с заданными начальными параметрами (поверхностная плотность, геометрические размеры, упругие характеристики материала, коэффициент потерь материала) обладает толщиной $h_{\text{опт.}}$, то в области НПР звукоизоляция такого ограждения будет максимально приближена к своим предельным значениям (оптимальная звукоизоляция)*. При этом резонансное прохождение звука будет минимальное – выполнение условия (3.8).

Уменьшение исходной толщины ограждающей конструкции до оптимальной величины производится путем ослабления ее поперечного сечения. Необходимо отметить, что для реальных ограждений зданий должны выполняться требования прочности и устойчивости с учетом ОПС. Поэтому оптимальная толщина панели из условий повышения звукоизоляции не должна быть меньше предельно допустимой толщины из условий прочности и устойчивости ограждающей конструкции

$$h_{\text{ОПТ.}} \geq h_{\text{пред. доп.}}^{\text{min}} \quad (3.18)$$

Условие (3.18) определяет пределы применимости способа ОПС ограждений – это несущие ограждающие конструкции зданий и сооружений (внутренние стены и перегородки, обшивки по каркасу и т. п.). Повышение звукоизоляции перечисленных ограждений особенно важно, т. к. они не обладают достаточной поверхностной плотностью и в большинстве случаев не обеспечивают требуемую изоляцию воздушного шума.

3.4. Звукоизоляция однослойных ограждающих конструкций с ослабленным поперечным сечением

Используя теоретические выкладки, полученные выше, можно рассчитать собственную звукоизоляцию однослойной ограждающей конструкции конечных размеров, а также определить предельные значения звукоизоляции. Это позволяет установить резервы повышения звукоизоляции ограждения и определить его оптимальные параметры в соответствии с выражениями (3.17), (3.18).

Рассмотрим данный подход на примере реальных строительных панелей различных типов – легкие ограждения и ограждения со средней поверхностной плотностью. Данное разделение необходимо для исследования эффективности применения ОПС строительных панелей, для которых провал звукоизоляции находится в различных диапазонах частот.

3.4.1. Однослойные легкие ограждающие конструкции

Под легкими ограждающими конструкциями зданий и сооружений будем понимать тонкие листовые панели, применяемые в качестве обшивок по каркасу или выступающие как составные элементы многослойных ограждений. К данному типу ограждений относятся гипсоволокнистые листы (ГВЛ), асбоцементные плиты, цементностружечные плиты, древесностружечные плиты, листы из органического стекла, стали, дюралюминия и т. п. Поверхностная плот-

ность данного типа ограждений находится в пределах от 5 до 30 кг/м², а граничная частота ППР расположена в диапазоне 1250 Гц ÷ 5000 Гц.

В настоящее время в строительстве широко применяются системы сухой отделки с креплением ГВЛ по стальному или деревянному каркасу. Легкие листовые ограждения также используются в качестве звукоизолирующих кожухов и акустических экранов для снижения уровней шума на рабочих местах. Основным недостатком подобных ограждающих конструкций является их недостаточная звукоизоляция по сравнению с более массивными ограждениями. В связи с этим большое практическое значение имеет повышение их звукоизолирующих свойств за счет внутренних резервов.

Рассмотрим возможность повышения звукоизоляции легких строительных панелей с помощью ОПС на примере гипсоволокнистого листа. На рис. 3.8 представлена теоретическая частотная характеристика звукоизоляции ГВЛ, рассчитанная по формулам (2.67), (2.70), (2.74). Здесь также приведена кривая предельной звукоизоляции ограждения и кривая закона масс.

Граничные частоты областей неполных и полных ПР определены по формулам (2.69), (2.73) соответственно. Из рассмотрения рис. 3.8. можно видеть, что на частотах $f < 800$ Гц (области ПрПР и НПР) частотная характеристика звукоизоляции ГВЛ практически вплотную приближается к своим предельным значениям. Это означает, что в данном диапазоне звукопроницаемость ограждения определяется инерционным прохождением звука и резервов повышения звукоизоляции практически не существует.

Начиная с частоты $f = 1000$ Гц, можно наблюдать снижение звукоизоляции ГВЛ, которое заканчивается провалом на граничной частоте ППР. Можно видеть, что в областях неполных и полных ПР существуют значительные резервы повышения звукоизоляции (5 ÷ 15 дБ), которые можно использовать за счет снижения резонансного прохождения звука.

Определим оптимальные параметры ГВЛ, соответствующие минимальному излучению звука в режиме собственных колебаний.

Исходные данные для ГВЛ: $a \times b = 1,0 \times 0,5$ м; $h = 12,5$ мм; $\mu = 13,9$ кг/м²; $E = 4,5 \cdot 10^9$ Па; $\nu = 0,2$; $\eta = 0,02$. По формуле (3.14) определяем корень квадратного уравнения: $X_1 = 0,397$. Тогда по формуле (3.17) оптимальная толщина гипсоволокнистого листа после ОПС: $h_{\text{ОПТ.}} = 0,006$ м = 6 мм.

Таким образом, для эффективного повышения звукоизоляции ГВЛ необходимо ослабить его поперечное сечение на глубину $\delta = h/2$. При этом оптимальная цилиндрическая жесткость составит: $D_{\text{ОПТ.}} = 88,4$ Па \cdot м³, т. е. уменьшится в 8 раз по сравнению с исходным вариантом (до ОПС).

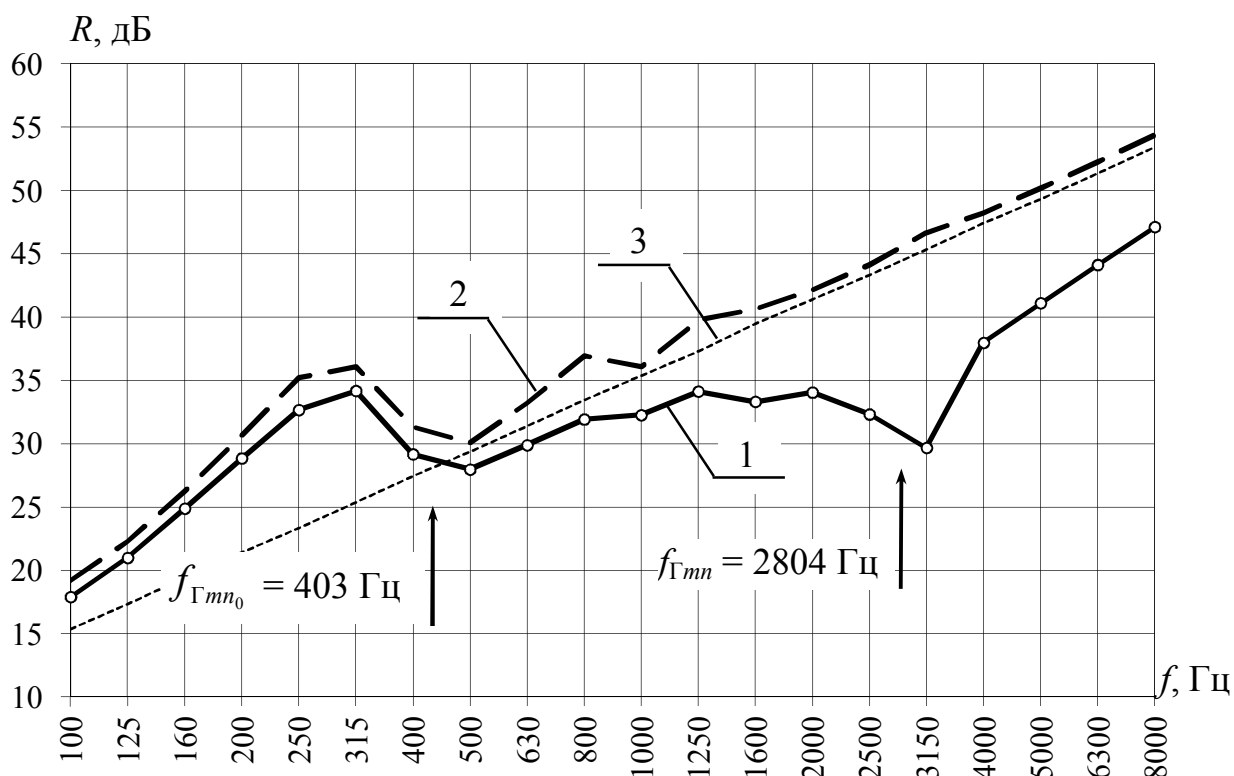


Рис. 3.8. Частотные характеристики звукоизоляции ГВЛ ($a \times b = 1,0 \times 0,5$ м, $h = 12,5$ мм, $\mu = 13,9$ кг/м², $D = 672$ Па м³): 1 — теоретическая кривая; 2 — кривая предельной звукоизоляции; 3 — закон масс

На рис. 3.9 показана частотная характеристика звукоизоляции ГВЛ с оптимальной толщиной в сравнении с первоначальной кривой. Данное сравнение показывает, что применение ОПС позволило использовать резервы повышения звукоизоляции ГВЛ в области средних и высоких частот практически полностью. При этом звукоизоляция ограждения дополнительно повысилась относительно первоначальной кривой также и в диапазоне низких частот.

Примечание: при исследовании влияния оптимального ОПС на прохождение звука через ограждение будем рассматривать идеализированный вариант, при котором поверхностная плотность ограждения после ОПС не изменяется. В действительности масса панели незначительно уменьшается за счет объема пропилов, однако это влияние незначительно (около 5%). Уменьшение поверхностной плотности ограждения учтено в инженерном методе расчета звукоизоляции ограждений с ОПС (см. п. 3.5).

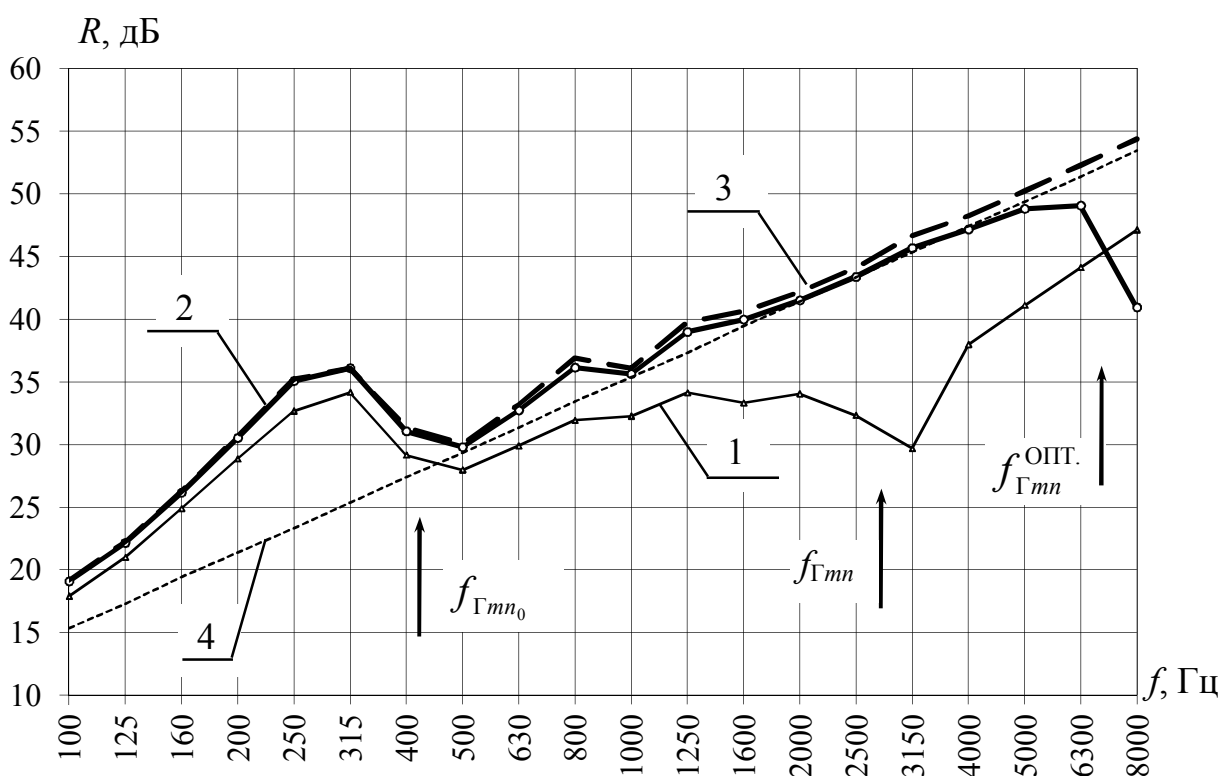


Рис. 3.9. Частотные характеристики звукоизоляции ГВЛ: 1 – теоретическая кривая до ОПС ($h = 12,5$ мм, $\mu = 13,9$ кг/м², $D = 672$ Па м³); 2 – теоретическая кривая после оптимального ОПС ($h_{\text{ОПТ.}} = 6$ мм, $\mu = 13,9$ кг/м², $D_{\text{ОПТ.}} = 88,4$ Па м³); 3 – кривая предельной звукоизоляции; 4 – закон масс

Рассмотрим более подробно процессы, происходящие в ограждающей конструкции при ослаблении ее поперечного сечения. Прежде всего, изменение цилиндрической жесткости панели оказывает влияние на величины граничных частот областей резонансного прохождения звука. Для большинства реальных ограждающих конструкций зданий в нормируемом диапазоне частот находятся только граничные частоты неполных и полных ПР. Граничная частота

простых ПР будет находиться вблизи 100 Гц только при длине панели $a < 1,0$ м (см. формулу (2.65)).

Величина граничной частоты области НПР зависит, в основном, от геометрических размеров строительной панели и определяется по формуле (2.69).

Для гипсоволокнистого листа до ОПС $f_{Гм_0} = 403$ Гц, что соответствует провалу звукоизоляции вблизи граничной частоты области НПР.

На рис. 3.10 приведена частотная характеристика функции отклика рассматриваемого ГВЛ. Можно видеть, что функция отклика принимает наименьшие значения в области частот $f < f_{Г.и} = 310$ Гц. Для ограждения больших размеров область пониженного прохождения звука будет находиться в диапазоне более низких частот. Например, для ГВЛ с размерами $a \times b = 2,0 \times 1,2$ м граничная частота инерционного прохождения звука $f_{Г.и} = 143$ Гц.

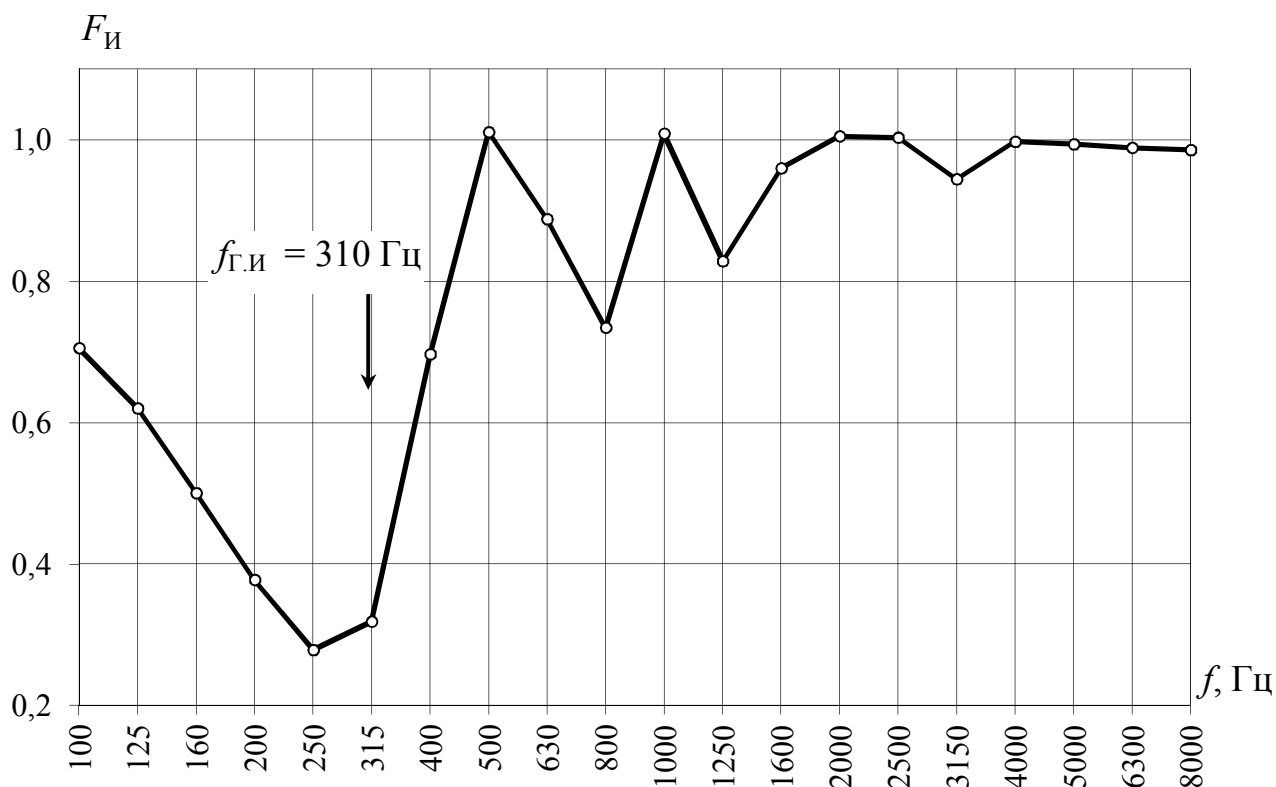


Рис. 3.10. Частотная характеристика функции отклика ГВЛ размером $a \times b = 1,0 \times 0,5$ м

Граничная частота области полных пространственных резонансов определяется соотношением поверхностной плотности ограждения и его цилиндри-

ческой жесткости (см. формулу (2.73)). Поэтому ослабление сечения приведет к изменению данного соотношения и, соответственно, к увеличению граничной частоты ППР. При этом изменится ширина области НПР – она увеличится по сравнению с исходным вариантом (до ОПС). Чем больше будет ОПС ограждения, тем шире будет область неполных пространственных резонансов. Для рассматриваемого случая граничная частота ППР ($f_{\Gamma mn} = 2804$ Гц) повысилась до $f_{\Gamma mn}^{\text{ОПТ.}} = 7673$ Гц, а область НПР расширилась при этом больше чем на 2 октавы. Таким образом, путем ослабления сечения ограждающей конструкции можно регулировать положение основного провала звукоизоляции на частотной шкале и ширину области НПР.

Рассмотрим процесс прохождения звука через ограждение с ОПС с учетом двойственной природы прохождения звука. При этом будем проводить сравнение параметров ограждения до и после оптимального ослабления сечения.

В соответствии с исследованным ранее механизмом прохождения звука, при воздействии на ограждение звуковых волн, в нем возникают волновые поля собственных и инерционных волн. Собственное волновое поле строительной панели характеризуется числами длин проекций свободных полуволн m и n на собственных частотах, а также количеством собственных частот ΔN_P в каждой полосе пропускания звука Δf рассматриваемого диапазона. Величины m , n и ΔN_P определяются соотношением поверхностной плотности панели, цилиндрической жесткости, а также ее геометрическими размерами (см. формулы (2.68), (2.72)). Уменьшение цилиндрической жесткости ограждающей конструкции после ОПС приведет к изменению характеристик ее собственного волнового поля. На рис. 3.11 представлены частотные зависимости чисел m для гипсоволокнистого листа до и после ОПС. На рис. 3.12 приведены те же зависимости для чисел n . Влияние ОПС панели на число резонансов ΔN_P в каждой третьоктавной полосе частот рассматриваемого диапазона показано на рис. 3.13.

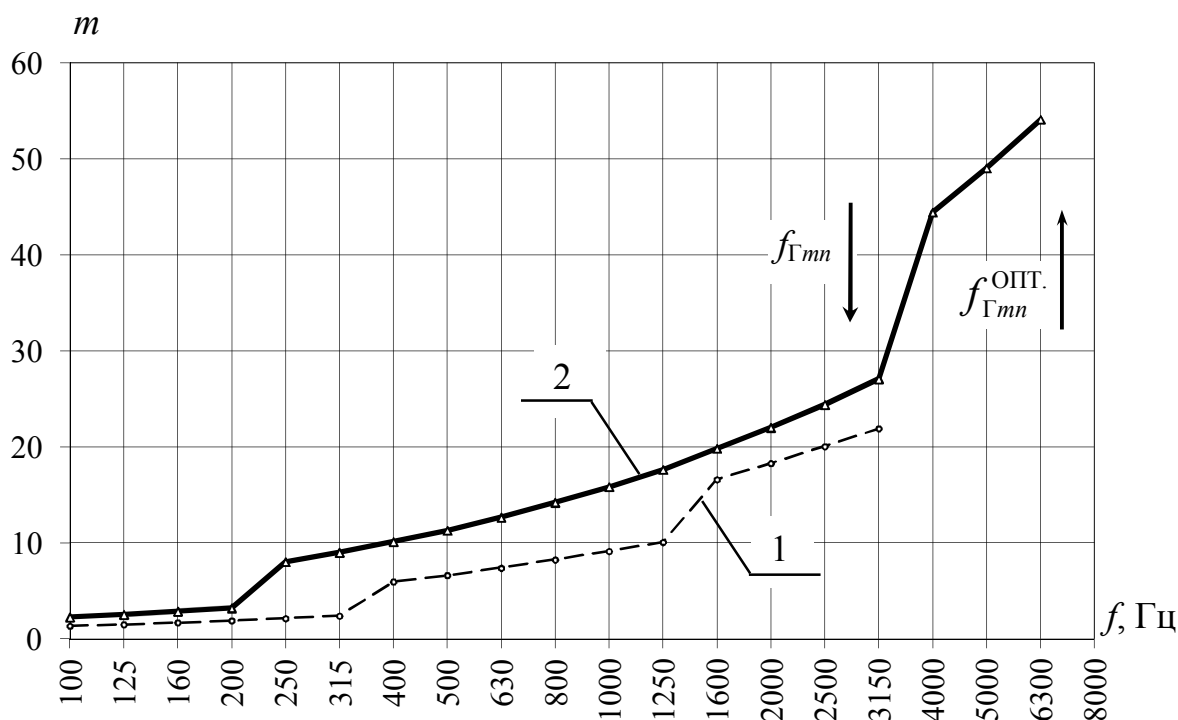


Рис. 3.11. Частотная зависимость чисел m по стороне $a = 1,0$ м для ГВЛ: 1 – до ОПС ($h = 12,5$ мм; $D/\mu = 48,3$ м⁴/с²); 2 – после оптимального ОПС ($h_{\text{ОПТ.}} = 6$ мм; $D_{\text{ОПТ.}}/\mu = 6,0$ м⁴/с²)

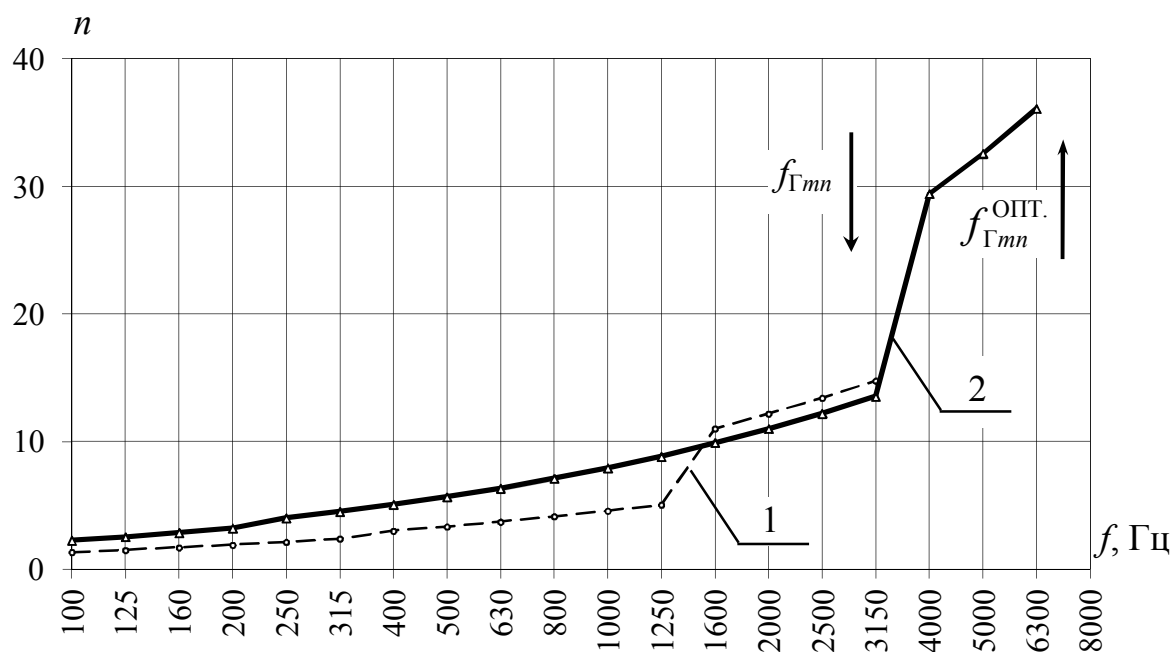


Рис. 3.12. Частотная зависимость чисел n по стороне $b = 0,5$ м для ГВЛ: 1 – до ОПС ($h = 12,5$ мм; $D/\mu = 48,3$ м⁴/с²); 2 – после оптимального ОПС ($h_{\text{ОПТ.}} = 6$ мм; $D_{\text{ОПТ.}}/\mu = 6,0$ м⁴/с²)

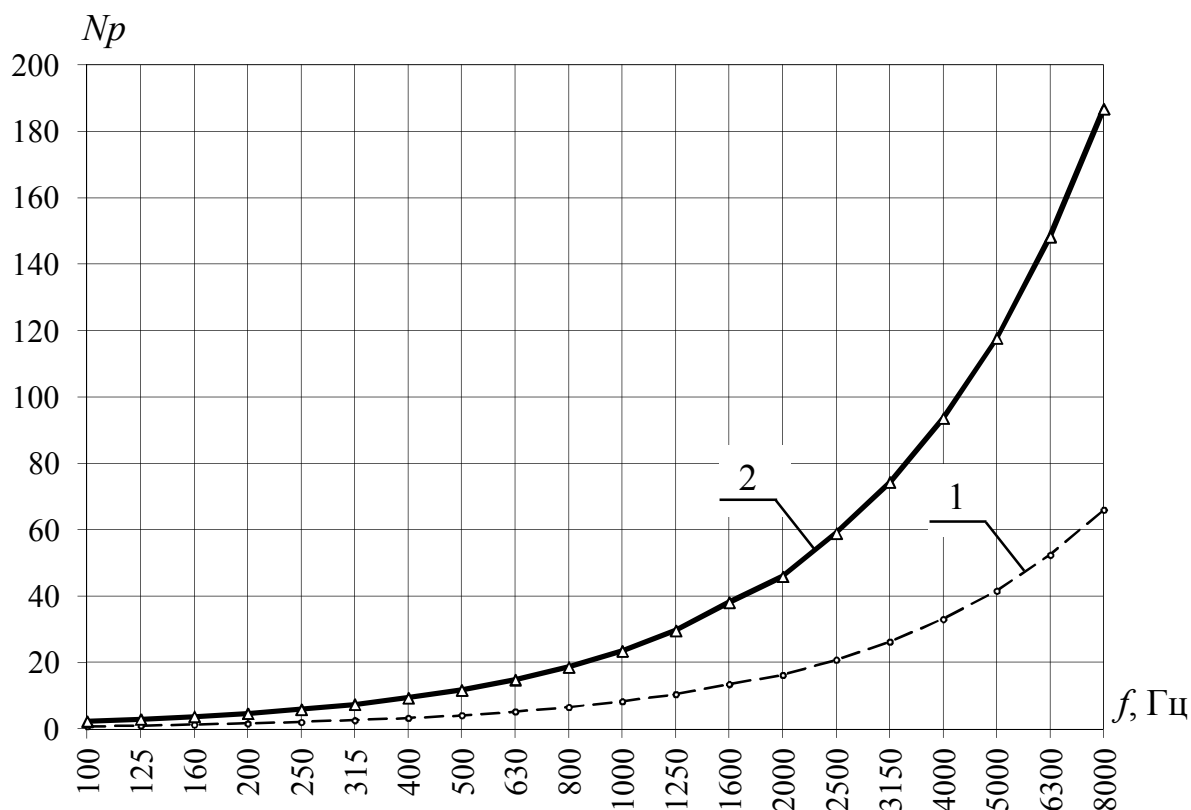


Рис. 3.13. Частотная зависимость числа резонансов для ГВЛ: 1 – до ОПС ($h = 12,5$ мм; $D/\mu = 48,3$ м⁴/с²); 2 – после оптимального ОПС ($h_{\text{опт.}} = 6$ мм; $D_{\text{опт.}}/\mu = 6,0$ м⁴/с²)

Анализируя зависимости, представленные на рис. 3.11 – 3.13 для ГВЛ, можно сделать следующие выводы:

- ослабление поперечного сечения однослойной легкой ограждающей конструкции приводит к увеличению чисел длин свободных полуволн по сторонам a и b . Это вызвано изменением физико-механических свойств ограждения при уменьшении отношения D/μ (см. формулы (2.68), (2.72));

- относительное увеличение чисел длин свободных полуволн происходит больше по стороне a , чем по стороне b . Это вызвано тем, что ограждение имеет прямоугольную форму ($a > b$);

- незначительное уменьшение чисел n на частотах $f = 1600$ Гц ÷ 3150 Гц после ОПС вызвано расширением области НПП с пониженным прохождением звука;

– ОПС строительной панели приводит к увеличению числа резонансов во всех третьоктавных полосах рассматриваемого диапазона частот. Это вызвано уменьшением отношения D/μ (см. формулу (2.68)).

Таким образом, однослойная ограждающая конструкция после ОПС приобретает новые параметры собственного волнового поля, которые отличаются от исходных параметров – спектр частот собственных колебаний ограждения уплотняется. Из этого следует, что после ОПС изменяются условия самосогласования звуковых полей с обеих сторон ограждения и волнового поля его собственных колебаний.

На рис. 3.14 представлены частотные характеристики самосогласования до и после ОПС гипсоволокнистого листа. Расчеты проведены по формулам (2.68), (2.71). Из рассмотрения данного рисунка можно видеть, что для исходной панели характеристика самосогласования имеет наибольшие значения в области НПР, которые резко возрастают по мере приближения к граничной частоте ППР.

После уменьшения фактической толщины пластины на глубину ОПС, характеристика самосогласования волновых полей уменьшилась во всем рассматриваемом диапазоне частот. Наибольшие изменения произошли в диапазонах частот с преобладающим влиянием резонансного прохождения звука (область неполных ПР). Здесь частотная зависимость характеристики самосогласования A после оптимального ОПС стала практически пологой, приближающейся к нулевым значениям. В области простых ПР инерционное прохождение звука через ограждение преобладает над резонансным и здесь количественное изменение характеристики самосогласования относительно невелико.

Таким образом, на примере ГВЛ аналитически установлено, что для однослойных легких ограждающих конструкций ослабление поперечного сечения при неизменной (малоизменяемой) поверхностной плотности приводит к снижению самосогласования звуковых полей и собственного волнового поля ограждения. Далее необходимо установить, как это влияет на прохождение звука через ограждение.

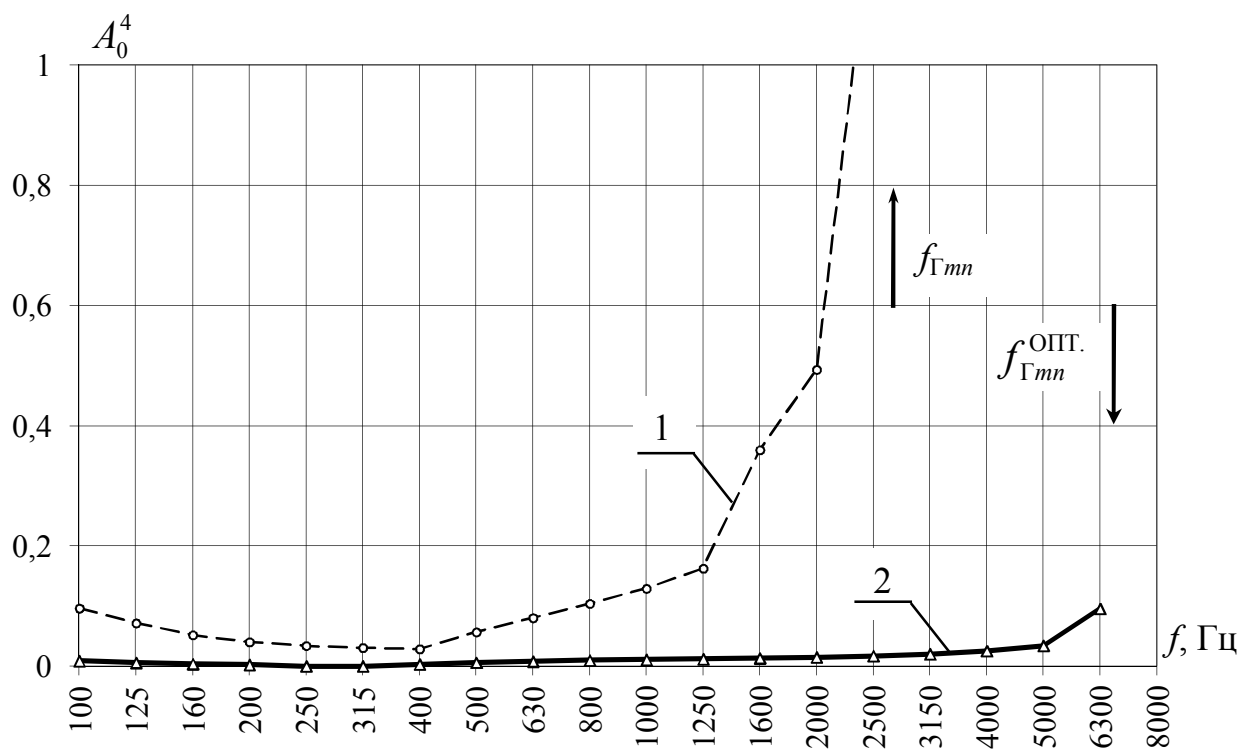


Рис. 3.14. Частотные характеристики самосогласования для ГВЛ: 1 – до ОПС ($h = 12,5$ мм; $D/\mu = 48,3$ м⁴/с²); 2 – после оптимального ОПС ($h_{\text{ОПТ.}} = 6$ мм; $D_{\text{ОПТ.}}/\mu = 6,0$ м⁴/с²)

Коэффициент резонансной звукопроницаемости τ_c характеризует прохождение звука через ограждающую конструкцию в режиме ее собственных колебаний (см. п. 2.6). На рис. 3.15 приведены частотные зависимости коэффициента τ_c для листа ГВЛ до и после оптимального ОПС. Вычисления проведены по формулам (2.52), (2.53).

Анализируя зависимости, представленные на рис. 3.15, можно сделать вывод о том, что цилиндрическая жесткость однослойного легкого ограждения оказывает значительное влияние на резонансное прохождение звука в широком диапазоне частот. Оптимальное ослабление сечения ГВЛ на 1/2 толщины листа позволили снизить значения коэффициента τ_c во всем рассматриваемом диапазоне частот. Наибольшие изменения отмечены в области частот вблизи граничного пространственного резонанса и на частотах $f < f_{\Gamma mn}$.

Изменение значений коэффициента τ_c происходит в соответствии с изменениями характеристики самосогласования A_0 , которая характеризует величину резонансного прохождения звука через ограждение.



Рис. 3.15. Частотные характеристики коэффициента резонансного прохождения звука для ГВЛ: 1 – до ОПС ($h = 12,5$ мм; $D/\mu = 48,3$ м⁴/с²); 2 – после оптимального ОПС ($h_{OPT.} = 6$ мм; $D_{OPT.}/\mu = 6,0$ м⁴/с²)

Из рассмотрения рис. 3.15 можно видеть, что после оптимального ОПС гипсоволокнистого листа коэффициент резонансного прохождения звука в области неполных ПР изменился не только количественно, но и качественно. В исходном состоянии (до ОПС) в диапазоне частот от 1250 Гц до 3150 Гц значения τ_c увеличивались с ростом частоты, а после ослабления сечения панели они стали равномерно снижаться благодаря увеличению граничного ППР и расширению области неполных ПР.

На рис. 3.16 представлены частотные зависимости коэффициентов резонансного и инерционного прохождения звука для исходного состояния ГВЛ (до ОПС). Здесь также приведена частотная зависимость общего коэффициента

прохождения звука через ограждение, определенная в соответствии с выражением (2.63): $\tau = \tau_C + \tau_{и}$.

На рис. 3.17 приведены частотные зависимости коэффициентов τ , τ_C и $\tau_{и}$ для случая ослабленного сечения ГВЛ.

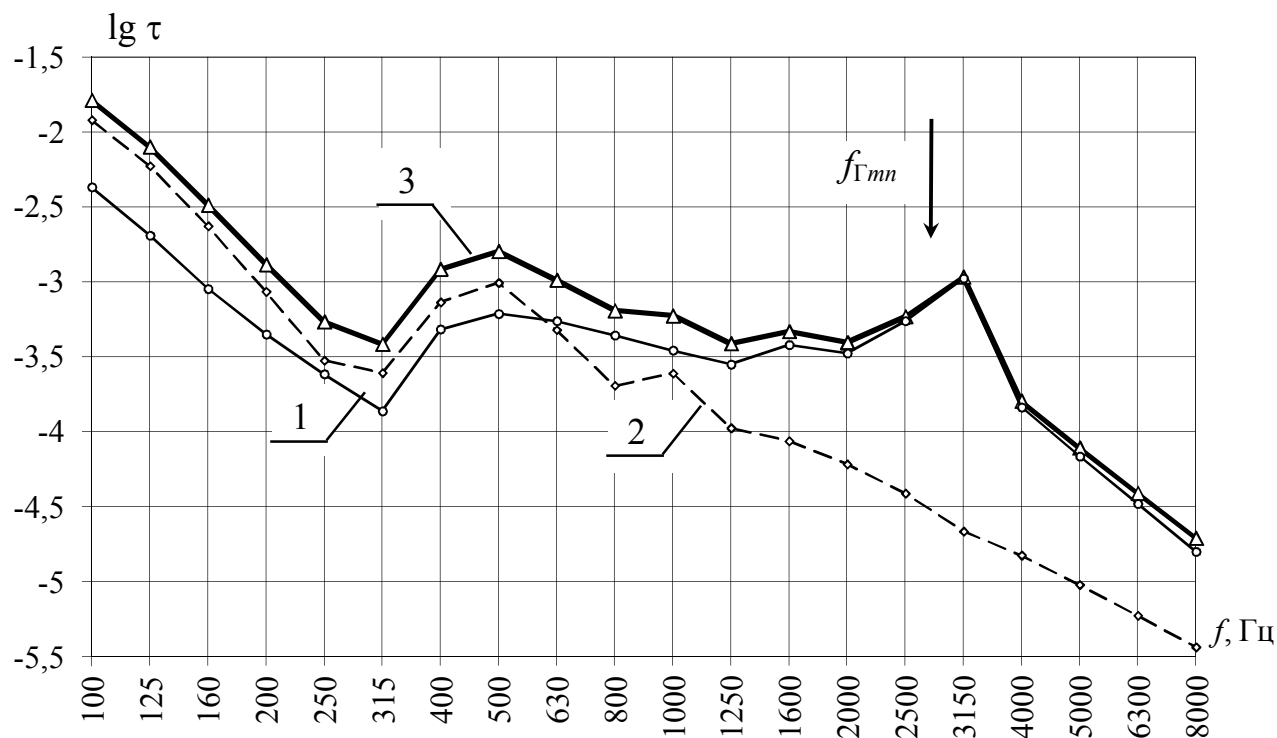


Рис. 3.16. Частотные характеристики коэффициентов прохождения звука через ГВЛ до ОПС ($h = 12,5$ мм; $D/\mu = 48,3$ м⁴/с²): 1 – коэффициент резонансного прохождения звука τ_C ; 2 – коэффициент инерционного прохождения звука $\tau_{и}$; 3 – общий коэффициент прохождения звука τ

Сравнивая соответствующие графики на рис. 3.16 и 3.17, можно видеть, что для ГВЛ в исходном состоянии (до ОПС) значения общего коэффициента прохождения звука τ определяются инерционной составляющей в диапазоне частот $f < 630$ Гц (область ПрПР и начало области НПР). В области неполных ПР ($f_{Гmn0} < f < f_{Гmn}$) резонансное прохождение звука через ГВЛ значительно преобладает над инерционным. Особенно это заметно в диапазоне $\frac{1}{2} f_{Гmn} < f < f_{Гmn}$, где значения коэффициента резонансного прохождения звука τ_C увеличиваются с ростом частоты. В области полных ПР звукопроницаемость

рассматриваемого легкого ограждения также определяется вкладом собственных волн.

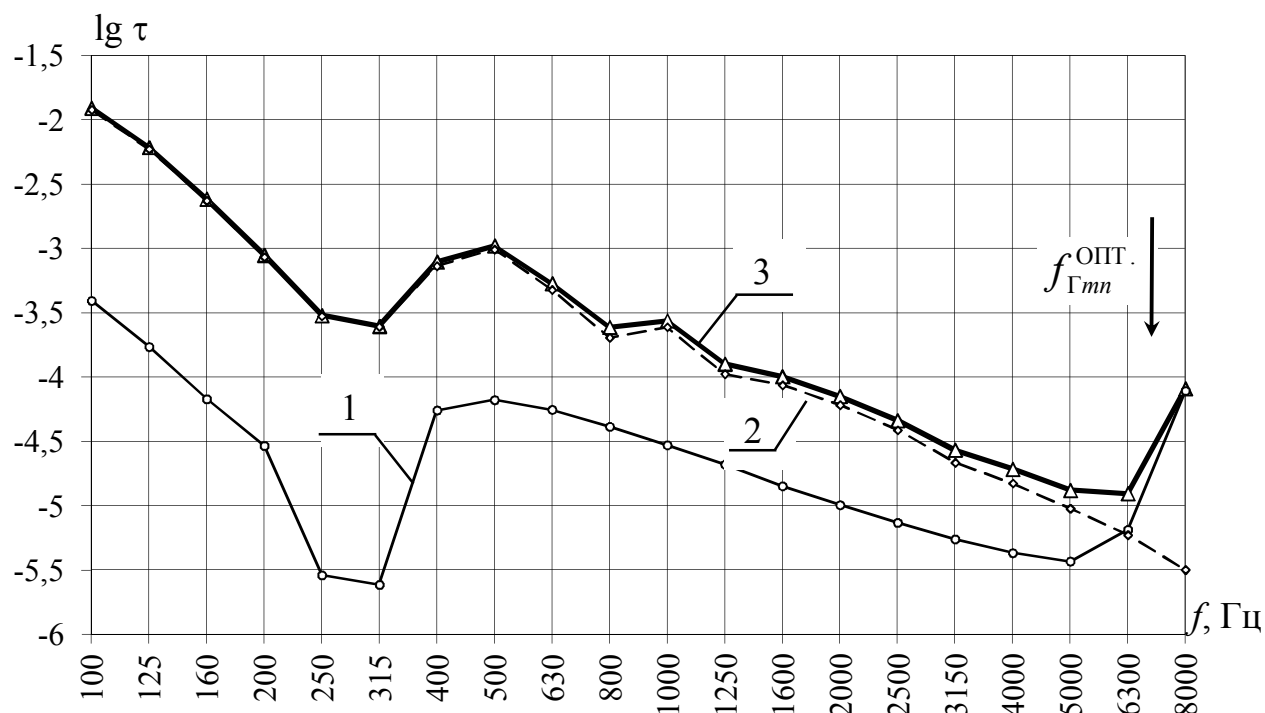


Рис. 3.17. Частотные характеристики коэффициентов прохождения звука для ГВЛ после оптимального ОПС ($h_{\text{ОПТ.}} = 6$ мм; $D_{\text{ОПТ.}}/\mu = 6,0$ м⁴/с²): 1 – коэффициент резонансного прохождения звука $\tau_{\text{с}}$; 2 – коэффициент инерционного прохождения звука $\tau_{\text{и}}$; 3 – общий коэффициент прохождения звука τ

После выполнения оптимального ОПС ограждающей конструкции ($h_{\text{ОПТ.}} = h/2$) произошло перераспределение степени влияния собственных и инерционных волн на процесс прохождения звука. Из рассмотрения рис. 3.17 можно видеть, что значения коэффициента резонансного прохождения звука $\tau_{\text{с}}$ значительно снизились относительно исходного варианта во всем рассматриваемом диапазоне частот (кроме частот $f = 6300, 8000$ Гц, непосредственно прилегающих к граничной частоте ППР $f_{\text{Гmn}}^{\text{ОПТ.}}$). При этом во всем нормируемом диапазоне частот ($f = 100$ Гц ÷ 3150 Гц) основной вклад в прохождение звука через ограждение вносят инерционные волны и график коэффициента инерционного прохождения звука $\tau_{\text{и}}$ практически полностью совпадает с графиком общего коэффициента прохождения звука τ . Это означает, что для одно-

слоистой легкой ограждающей конструкции резонансное прохождение звука достигло своих минимальных значений – выполняется условие (3.8).

Снижение резонансного вклада в прохождение звука позволило уменьшить общую звукопроницаемость ограждения с оптимальным ОПС во всем нормируемом диапазоне частот. Этот эффект показан на рис. 3.18.



Рис. 3.18. Частотные характеристики общего коэффициента прохода звука для ГВЛ: 1 – до ОПС ($h = 12,5$ мм; $D/\mu = 48,3$ м⁴/с²); 2 – после оптимального ОПС ($h_{\text{ОПТ.}} = 6$ мм; $D_{\text{ОПТ.}}/\mu = 6,0$ м⁴/с²)

Проведенное аналитическое исследование позволило установить степень влияния параметров собственного волнового поля ограждения на повышение его звукоизоляции в различных диапазонах частот. Установлено, что наибольшее снижение звукопроницаемости однослойного легкого ограждения с оптимальным ОПС происходит вблизи граничной частоты полных пространственных резонансов, а также в областях неполных и полных ПР. Это происходит в соответствии с закономерностью уменьшения самосогласования волновых полей из-за уплотнения спектра собственных колебаний ограждающей конструкции.

С помощью оптимального ОПС можно эффективно использовать внутренние резервы повышения звукоизоляции однослойных легких ограждений в областях частот, где резонансное прохождение преобладает над инерционным (области НПР и ППР) – диапазоны средних и высоких частот. В диапазоне низких частот эффект от применения ОПС меньше и зависит от геометрических размеров ограждения. Повышение звукоизоляции ГВЛ с оптимальным ОПС показано на рис. 3.9. Для большей наглядности наблюдаемого эффекта на рис. 3.19 представлены частотные зависимости резонансных отклонений до и после ослабления сечения, определенные по формуле (3.1).

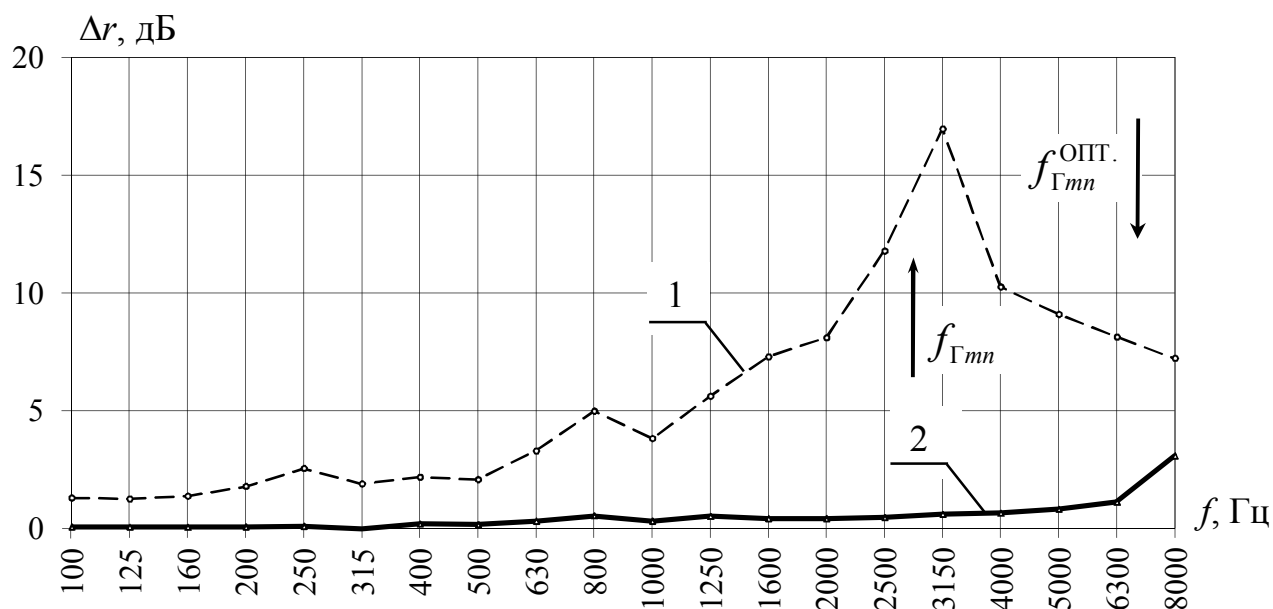


Рис. 3.19. Частотные характеристики резонансных отклонений для ГВЛ: 1 – до ОПС ($h = 12,5$ мм; $D/\mu = 48,3$ м⁴/с²); 2 – после оптимального ОПС ($h_{\text{Опт.}} = 6$ мм; $D_{\text{Опт.}}/\mu = 6,0$ м⁴/с²)

3.4.2. Однослойные ограждающие конструкции со средней поверхностной плотностью

Под ограждениями со средней поверхностной плотностью будем понимать строительные панели с поверхностной плотностью, находящейся в пределах от 30 до 150 кг/м². Граничная частота области ППР для данного типа ограждений расположена в средней части нормируемого диапазона частот (400 Гц ÷ 1250 Гц). В качестве примера подобных ограждений можно привести гипсобе-

тонные панели, перегородки из пазогребневых гипсовых плит, перегородки из пенобетонных и газосиликатных блоков толщиной $0,05 \div 0,2$ м.

Исследуем возможности использования внутренних резервов повышения звукоизоляции ограждений со средней поверхностной плотностью на примере гипсобетонной перегородки толщиной $h = 80$ мм, $\mu = 83,2$ кг/м². Рассмотрение будем проводить по схеме, использованной выше для однослойных легких ограждений.

Исходные данные для гипсобетонной (ГБ) панели: $a \times b = 1,8 \times 1,0$ м; $h = 80$ мм; $\mu = 83,2$ кг/м²; $E = 1,43 \times 10^9$ Па; $\nu = 0,2$; $\eta = 0,013$. По формуле (3.14) определяем корень квадратного уравнения: $X_1 = 0,0062$. Тогда по формуле (3.17) оптимальная толщина гипсобетонной панели после ОПС: $h_{\text{ОПТ.}} = 0,027$ м = 27 мм.

Таким образом, для эффективного повышения звукоизоляции данного ограждения необходимо уменьшить его фактическую толщину на глубину $\delta = 53$ мм. Однако такое сильное ослабление сечения недопустимо из условий прочности и устойчивости конструкции. Из условия (3.18) принимаем глубину ослабления сечения, равную половине толщины панели $h_{\text{ОПТ.}} = h/2 = 40$ мм. При этом оптимальная цилиндрическая жесткость составит $D_{\text{ОПТ.}} = 7704$ Па м³, т. е. уменьшится в 8 раз по сравнению с исходным вариантом (до ОПС) $D = 61635$ Па м³.

По формуле (2.69) определяем, что для гипсобетонной панели граничный НПР равен $f_{\Gamma mn_0} = 185$ Гц.

Снижение цилиндрической жесткости гипсобетонной панели после ОПС приводит к смещению граничной частоты ППР с $f_{\Gamma mn} = 697$ Гц до $f_{\Gamma mn}^{\text{ОПТ.}} = 1958$ Гц. При этом область НПР расширяется более чем на 2 октавы. Рассмотрим изменение параметров собственного волнового поля ограждения.

На рис. 3.20 представлены частотные зависимости чисел длин проекций свободных полуволн m для ГБ панели до и после ОПС. Изменение чисел n здесь не представлено, т. к. оно происходит аналогично. На рис. 3.21 показано

влияние ОПС панели на число резонансов ΔN_p в каждой третьоктавной полосе рассматриваемого диапазона частот.

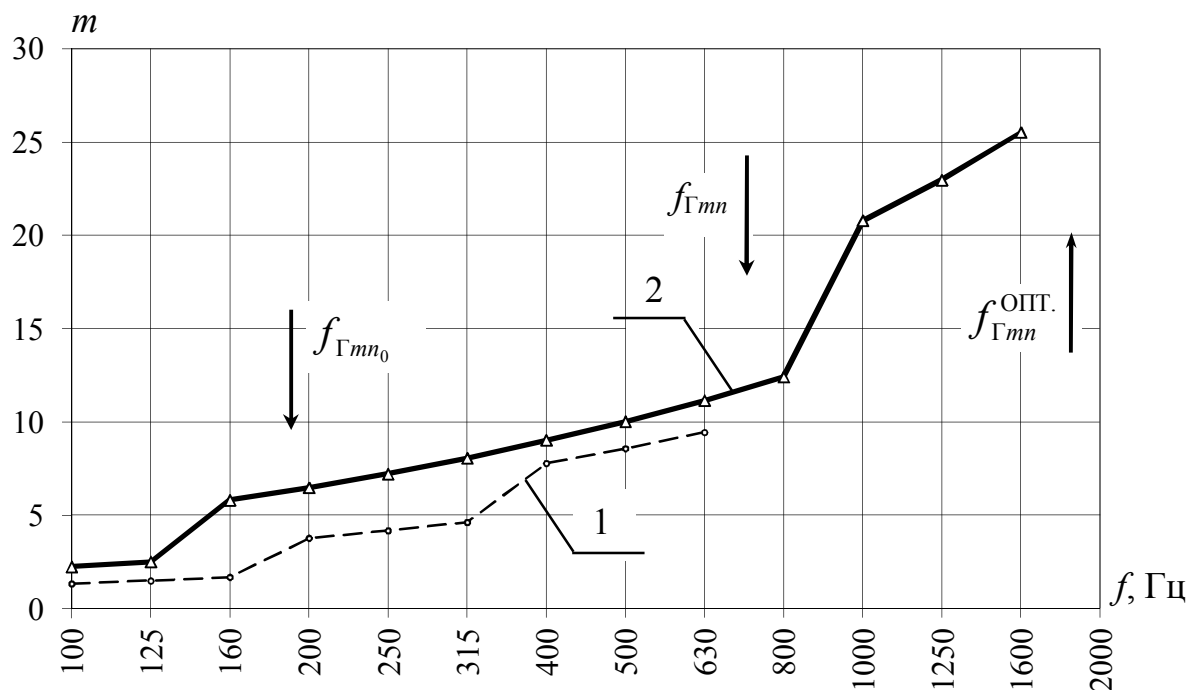


Рис. 3.20. Частотная зависимость чисел m по стороне $a = 1,8$ м для ГБ панели: 1 – до ОПС ($h = 80$ мм; $D/\mu = 741$ м⁴/с²); 2 – после оптимального ОПС ($h_{ОПТ.} = 40$ мм; $D_{ОПТ.}/\mu = 92,5$ м⁴/с²)

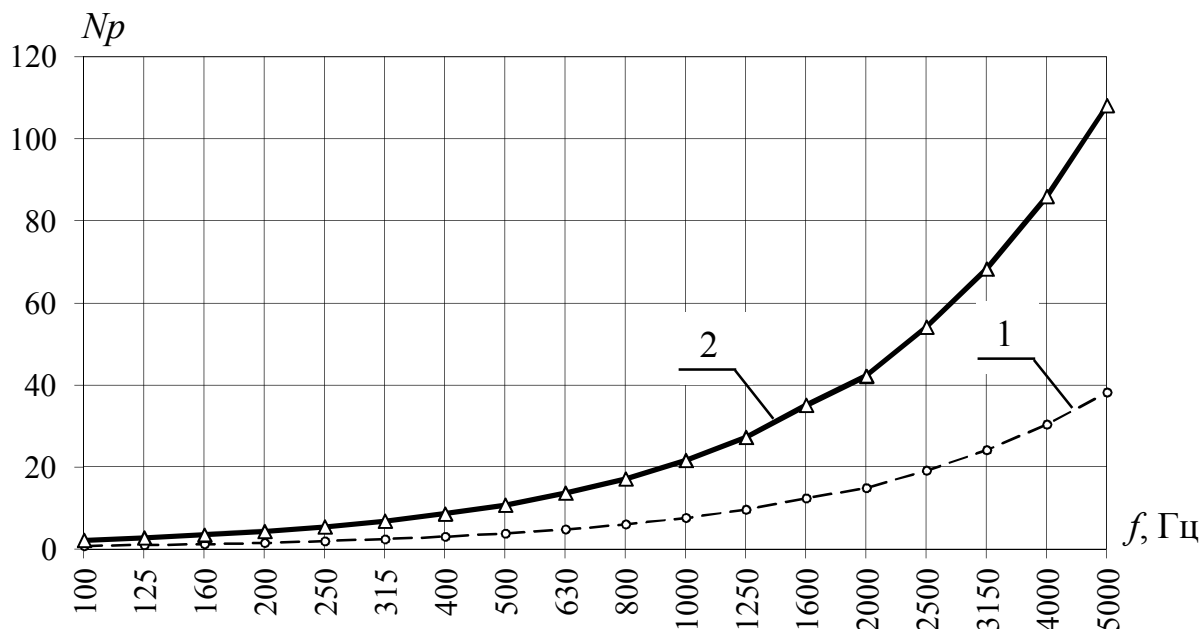


Рис. 3.21. Частотная зависимость числа резонансов для ГБ панели: 1 – до ОПС ($h = 80$ мм; $D/\mu = 741$ м⁴/с²); 2 – после оптимального ОПС ($h_{ОПТ.} = 40$ мм; $D_{ОПТ.}/\mu = 92,5$ м⁴/с²)

Из рассмотрения представленных данных можно видеть, что изменение волновых характеристик после ОПС ограждения со средней поверхностной плотностью происходит аналогично легким ограждающим конструкциям, рассмотренным выше. После уменьшения фактической толщины панели до оптимальной величины ее цилиндрическая жесткость снижается, а собственное волновое поле уплотняется благодаря увеличению чисел m , n и увеличению числа резонансов ΔN_p . Отличие состоит в том, что для данного типа ограждений эти изменения происходят в другом частотном диапазоне – в средней части нормируемого диапазона частот.

Изменение характеристики самосогласования ГБ панели с ОПС по сравнению с исходным состоянием показано на рис. 3.22. Расчеты проведены по формулам (2.68), (2.71). Из рассмотрения данного рисунка можно видеть, что для ограждения в исходном состоянии самосогласование волновых полей резко возрастает на резонансных пиках – вблизи граничных частот неполных и полных ПР.

Оптимальное ОПС панели позволило уменьшить характеристику самосогласования волновых полей во всем рассматриваемом диапазоне частот. При этом можно наблюдать значительное сглаживание резонансных пиков на граничных частотах НПР и ППР. Это вызвано тем, что для гипсобетонной панели отношение D/μ больше, чем для гипсоволокнистого листа, рассмотренного выше. Поэтому резонансное прохождение звука преобладает над инерционным прохождением во всем рассматриваемом диапазоне частот. Соответственно, снижение самосогласования здесь более заметно, чем для легких ограждений.

Изменение резонансной звукопроницаемости ограждения со средней поверхностной плотностью можно видеть на рис. 3.23.

В отличие от легких ограждений, для ограждений со средней поверхностной плотностью прохождение звука с собственными волнами преобладает в диапазонах низких и средних частот, а не в диапазоне высоких частот. Поэтому

наибольшее снижение значений коэффициента резонансного прохождения звука τ_c происходит в диапазоне частот $f = 100 \text{ Гц} \div 630 \text{ Гц}$.

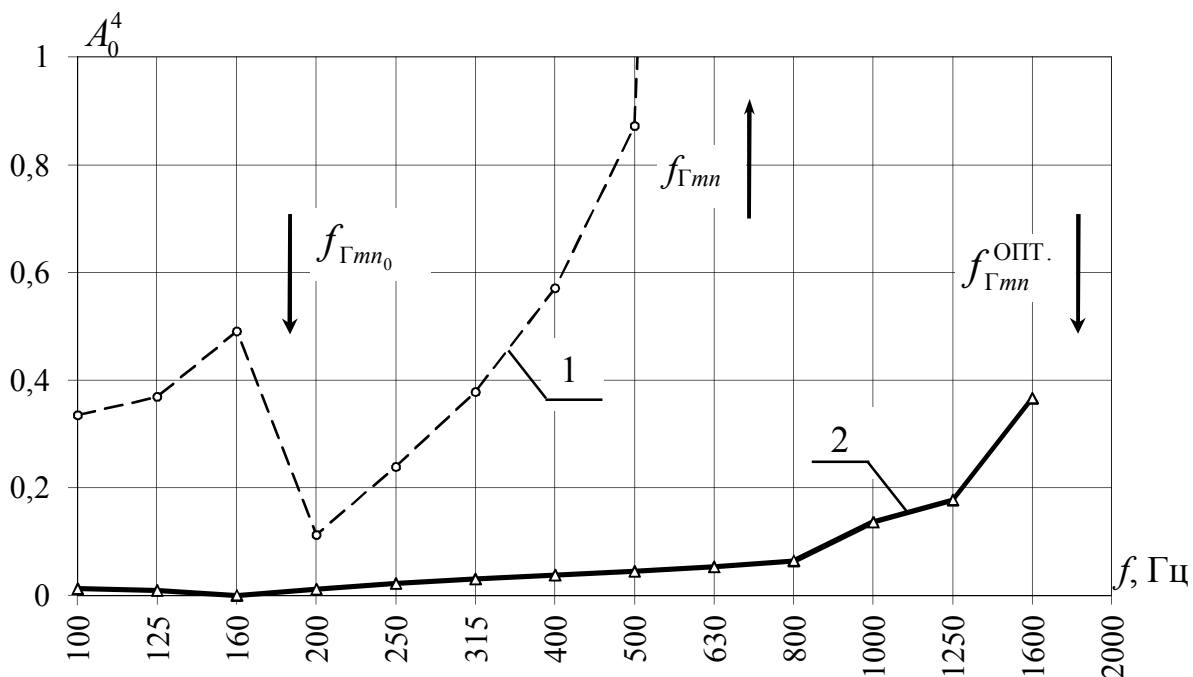


Рис. 3.22. Частотные характеристики самосогласования для ГБ панели: 1 – до ОПС ($h = 80 \text{ мм}$; $D/\mu = 741 \text{ м}^4/\text{с}^2$); 2 – после оптимального ОПС ($h_{OPT.} = 40 \text{ мм}$; $D_{OPT.}/\mu = 92,5 \text{ м}^4/\text{с}^2$)

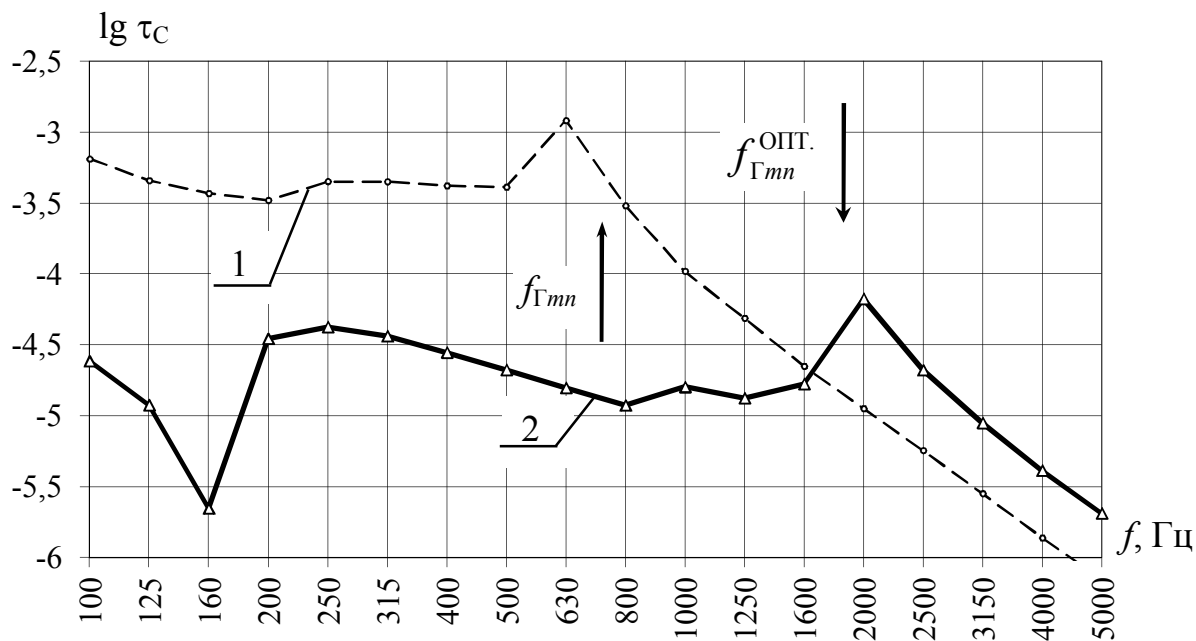


Рис. 3.23. Частотные характеристики коэффициента резонансного прохождения звука для ГБ панели: 1 – до ОПС ($h = 80 \text{ мм}$; $D/\mu = 741 \text{ м}^4/\text{с}^2$); 2 – после оптимального ОПС ($h_{OPT.} = 40 \text{ мм}$; $D_{OPT.}/\mu = 92,5 \text{ м}^4/\text{с}^2$)

В области ППР, начиная с частоты $f = 1600$ Гц, резонансная звукопроницаемость рассматриваемой панели с ОПС незначительно возрастает по сравнению с исходным вариантом. Это связано с тем, что коэффициент резонансного прохождения звука в области полных ПР определяется величиной граничной частоты $f_{Гм}$ (см. формулу (2.53)). Соответственно, при смещении провала звукоизоляции на более высокие частоты, величина τ_C в диапазоне высоких частот увеличивается.

На данном этапе исследования необходимо оценить соотношение резонансного и инерционного вклада в прохождение звука через ограждения со средней поверхностной плотностью. На рис. 3.24 представлены частотные зависимости коэффициентов резонансного и инерционного прохождения звука для исходного состояния ГБ панели (до ОПС) в сравнении с кривой общего коэффициента прохождения звука. На рис. 3.25 приведены частотные зависимости коэффициентов τ , τ_C и $\tau_{и}$ для ГБ панели с учетом оптимального ослабления сечения.

Анализируя представленные данные, можно сделать следующие выводы. Звукопроницаемость ограждающих конструкций со средней поверхностной плотностью определяется резонансным прохождением звука во всем нормируемом диапазоне частот. Оптимальное ОПС позволяет сместить области повышенной резонансной звукопроницаемости в диапазон более высоких частот. Кроме того, за счет снижения самосогласования волновых полей в области НПР происходит перераспределение вклада собственных и инерционных волн в общее прохождение звука. Для ГБ панели после ОПС инерционное прохождение звука стало преобладать над резонансным в диапазоне $f = 100$ Гц ÷ 315 Гц, а в диапазоне $f = 400$ ÷ 800 Гц они стали соизмеримы.

Снижение резонансного прохождения звука через ограждающую конструкцию со средней поверхностной плотностью дает возможность значительно повысить ее звукоизоляцию в диапазоне средних частот и приблизить ее к предельным значениям.



Рис. 3.24. Частотные характеристики коэффициентов прохождения звука для ГБ панели до ОПС ($h = 80$ мм; $D/\mu = 741$ м⁴/с²): 1 – коэффициент резонансного прохождения звука τ_c ; 2 – коэффициент инерционного прохождения звука τ_i ; 3 – общий коэффициент прохождения звука τ



Рис. 3.25. Частотные характеристики коэффициентов прохождения звука для ГБ панели после ОПС ($h_{\text{ОПТ.}} = 40$ мм; $D_{\text{ОПТ.}}/\mu = 92,5$ м⁴/с²): 1 – коэффициент резонансного прохождения звука τ_c ; 2 – коэффициент инерционного прохождения звука τ_i ; 3 – общий коэффициент прохождения звука τ

На рис. 3.26 показана частотная характеристика звукоизоляции ГБ панели с оптимальной толщиной по сравнению с исходным вариантом. Анализируя представленные данные, можно видеть, что ОПС ограждения позволяет эффективно использовать внутренние резервы повышения звукоизоляции в диапазонах средних и высоких частот. В диапазоне низких частот звукоизоляция рассматриваемой панели также повысилась относительно исходных значений.

На рис. 3.27 приведены графики резонансных отклонений, которые показывают эффективность способа ОПС для использования резервов повышения звукоизоляции однослойных ограждающих конструкций со средней поверхностной плотностью в диапазоне средних частот.

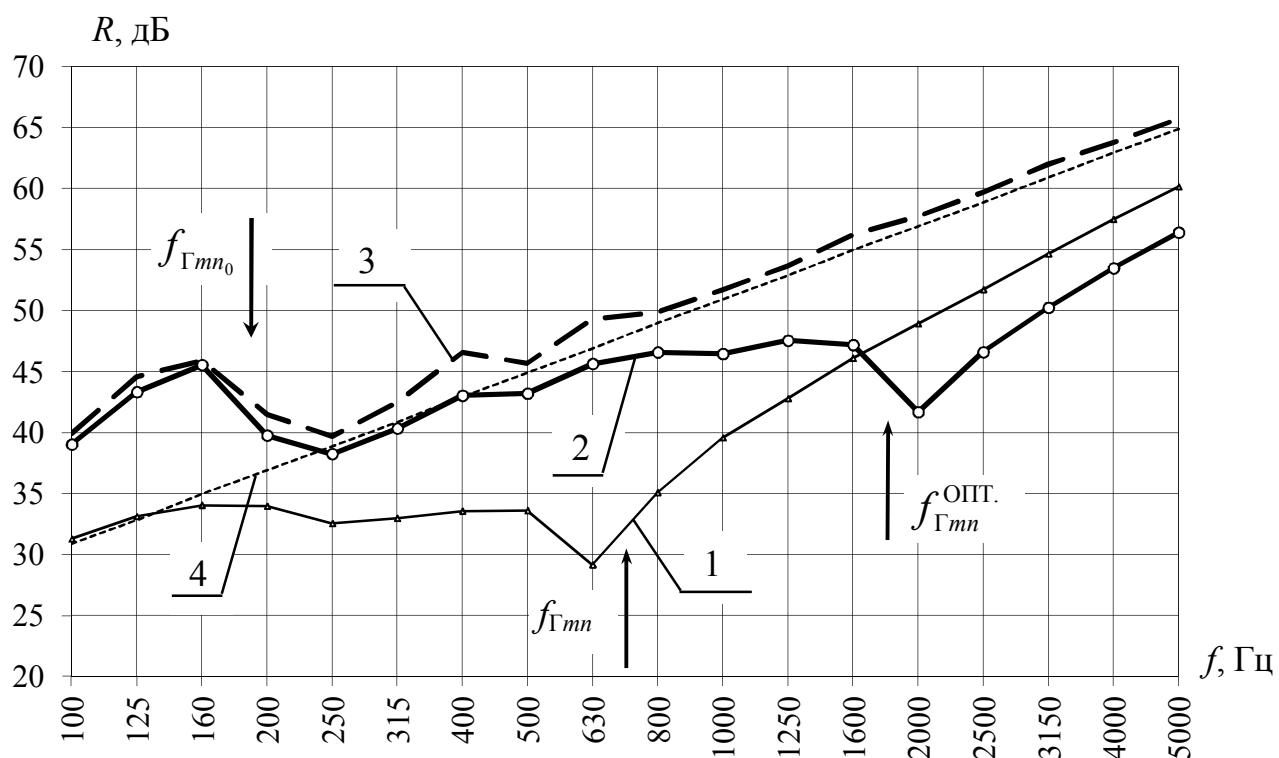


Рис. 3.26. Теоретические частотные характеристики звукоизоляции ГБ панели: 1 – до ОПС ($h = 80$ мм, $\mu = 83,2$ кг/м², $D = 61635$ Па м³); 2 – после оптимального ОПС ($h_{\text{ОПТ.}} = 40$ мм, $\mu = 83,2$ кг/м², $D_{\text{ОПТ.}} = 7704$ Па м³); 3 – предельная звукоизоляция ограждения; 4 – закон масс

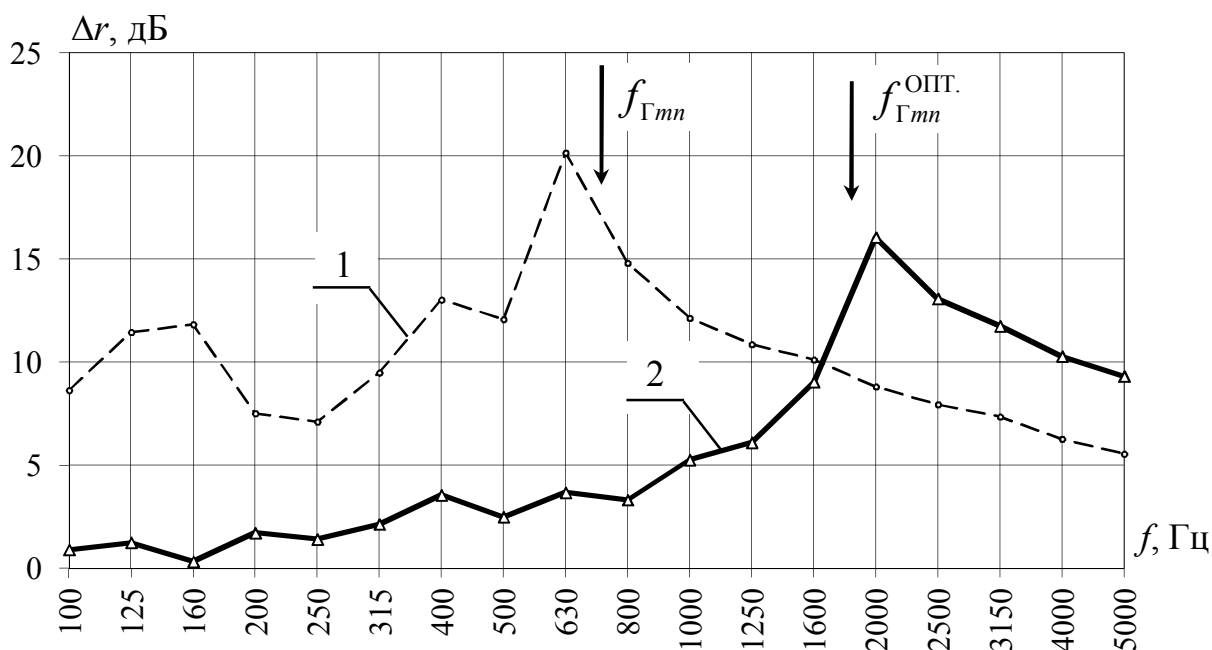


Рис. 3.27. Частотные характеристики резонансных отклонений для ГБ панели: 1 – до ОПС ($h = 80$ мм; $D/\mu = 741$ м⁴/с²); 2 – после оптимального ОПС ($h_{\text{Опт.}} = 40$ мм; $D_{\text{Опт.}}/\mu = 92,5$ м⁴/с²)

По результатам проведенных теоретических исследований можно сделать следующие выводы:

- с помощью ослабления поперечного сечения можно эффективно использовать внутренние резервы повышения звукоизоляции однослойных легких ограждающих конструкций и ограждающих конструкций со средней поверхностной плотностью, приближая значения звукоизоляции к предельным значениям, определяемым инерционным прохождением звука;

- для проектирования ограждающей конструкции с ОПС необходимо предварительно определить ее оптимальные параметры (цилиндрическую жесткость и толщину), которые определяются поверхностной плотностью, геометрическими размерами, упругими характеристиками материала, коэффициентом потерь и текущей частотой звука;

- снижение цилиндрической жесткости ограждающей конструкции после ОПС приводит к изменению размеров областей резонансного прохождения звука – простых, неполных и полных пространственных резонансов. При этом

область НПР значительно расширяется за счет смещения граничного пространственного резонанса в диапазон более высоких частот;

– изменение звукоизолирующих свойств строительных панелей происходит в соответствии с последовательностью, рассмотренной выше: снижение цилиндрической жесткости ограждения → увеличение чисел m , n и числа резонансов в полосе частот N_p (уплотнение спектра частот собственных колебаний) → уменьшение характеристики самосогласования волновых полей → снижение резонансного прохождения звука через ограждение → повышение звукоизоляции ограждения;

– повышение звукоизоляции однослойных ограждающих конструкций с ОПС зависит от соотношения вкладов собственных и инерционных волн в прохождение звука в различных частотных диапазонах. Наибольшее повышение звукоизоляции отмечено в областях неполных и полных ПР вблизи граничной частоты ППР.

3.5. Инженерный метод расчета звукоизоляции однослойных ограждающих конструкций конечных размеров с ослабленным поперечным сечением

Нумерация формул, таблиц и рисунков в данном разделе принята самостоятельной.

1) Определение физико-механических характеристик ограждения.

1.1) На начальном этапе расчета устанавливаются основные параметры проектируемой ограждающей конструкции: геометрические 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. 1).

Исходные данные для ограждающей конструкции

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

1.2) Вычисление поверхностной плотности (μ , кг/м²) и цилиндрической жесткости ограждения (D , Па м³) по формулам:

$$\mu = \rho \cdot h ; \quad (1)$$

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

1.3) Определение оптимальной степени ОПС ограждения (глубина и шаг прорезей на лицевой поверхности):

1.3.1) Определение оптимальной толщины ограждения ($h_{\text{ОПТ.}}$), м, по формуле (3.17)

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

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. Для несущих внутренних перегородок и листовых обшивок по каркасу рекомендуется назначать $h_{\text{ОПТ.}} \leq \frac{1}{2} h$.

1.3.2) Таким образом, глубина ОПС ограждения (δ , м)

$$\delta = h - h_{\text{ОПТ.}} , \quad (4)$$

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

1.3.3) Шаг прорезей (d , м) определяется исходя из условия (3.5):

$$d < \frac{\lambda_{\text{И}}}{4}, \quad (5)$$

1.3.4) Фактическая толщина ограждения ($h_{\text{П}}$, м) после выполнения прорезей на глубину δ определяется как

$$h_{\text{П}} = h - \delta. \quad (6)$$

1.4) Вычисление цилиндрической жесткости и поверхностной плотности ограждающей конструкции после ОПС.

1.4.1) Цилиндрическая жесткость ($D_{\text{П}}$, Па м³) ограждения с ОПС определяется по формуле, аналогичной формуле (2):

$$D_{\text{П}} = \frac{E \cdot h_{\text{П}}^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)}. \quad (7)$$

1.4.2) Поверхностная плотность ограждения с ОПС ($\mu_{\text{П}}$, кг/м²) изменится в зависимости от размеров выполненных прорезей

$$\mu_{\text{П}} = \frac{\rho}{S} \cdot (V - V_{\text{ПР}}), \quad (8)$$

где S – площадь поверхности ограждения, м²;

V – объем панели до ослабления сечения, м³;

$V_{\text{ПР}}$ – объем прорезей, м³.

2) Определение граничных частот областей резонансного прохождения звука для ограждения.

Вычисление граничных частот областей ПрПР, НПР и ППР проводится по формулам (2.65), (2.69), (2.73) соответственно. Полученные значения округляются до ближайшей среднегеометрической частоты третьоктавной полосы пропускания звука. Граничные частоты со штрихом относятся к ограждению с ОПС.

**Граничные частоты областей резонансного
прохождения звука через ограждающую конструкцию**

Диапазон частот	Граничная частота, Гц	
	для ограждающей конструкции до ОПС	для ограждающей конструкции после ОПС
Область ПрПР	$f_{\Gamma m_0 n_0} = \frac{c_0}{4 \cdot a} + \Delta f_{\Gamma m_0 n_0}$	$f'_{\Gamma m_0 n_0} = \frac{c_0}{4 \cdot a} + \Delta f'_{\Gamma m_0 n_0}$
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	$f_{\Gamma mn} = \frac{c_0^2}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu}{D}}$	$f'_{\Gamma mn} = \frac{c_0^2}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_{\Pi}}{D_{\Pi}}}$

3) Расчет звукоизоляции ограждающих конструкций с ОПС.

3.1) Расчет звукоизоляции проектируемого ограждения в исходном состоянии и после ОПС проводится для областей частот ПрПР, НПР и ППР по формулам (2.67), (2.70), (2.74) соответственно (см. табл. 3).

В знаменателе всех выражений, приведенных в табл. 3, первое слагаемое характеризует инерционное прохождение звука через ограждающую конструкцию, а второе слагаемое – резонансное прохождение звука.

Звукоизоляция ограждающей конструкции

Диапазон частот	Звукоизоляция, дБ	
	для ограждающей конструкции до ОПС	для ограждающей конструкции после ОПС
Область ПрПР	$R = 10 \lg \frac{0,56 \cdot 10^{-4} \mu^2 f^2}{2,61 \cdot F_{\text{И}}^2 + 0,096 \cdot \frac{A_0^4}{\eta}}$	$R' = 10 \lg \frac{0,56 \cdot 10^{-4} \mu_{\Pi}^2 f^2}{2,61 \cdot F_{\text{И}}^2 + 0,096 \cdot \frac{A_0'^4}{\eta}}$
Область НПР	$R = 10 \lg \frac{0,56 \cdot 10^{-4} \mu^2 f^2}{2,61 \cdot F_{\text{И}}^2 + 0,586 \cdot \frac{A_0^4}{\eta}}$	$R' = 10 \lg \frac{0,56 \cdot 10^{-4} \mu_{\Pi}^2 f^2}{2,61 \cdot F_{\text{И}}^2 + 0,586 \cdot \frac{A_0'^4}{\eta}}$
Область ППР	$R = 10 \lg \frac{0,56 \cdot 10^{-4} \mu^2 f^2}{2,61 \cdot F_{\text{И}}^2 + 0,63 \cdot \frac{f_{\Gamma mn} \cdot \bar{s}_{mn}}{f \cdot \eta}}$	$R' = 10 \lg \frac{0,56 \cdot 10^{-4} \mu_{\Pi}^2 f^2}{2,61 \cdot F_{\text{И}}^2 + 0,63 \cdot \frac{f'_{\Gamma mn} \cdot \bar{s}'_{mn}}{f \cdot \eta}}$

3.2) Величина характеристики самосогласования волновых полей A_0 в областях простых и неполных ПР определяется по формулам (2.68), (2.71) соответственно. Из этих же выражений рассчитываются величины m , n и m' , n' , характеризующие волновое поле собственных колебаний ограждения до и после ОПС, соответственно. Величина коэффициента звукоизлучения в области полных ПР определяется по формуле (2.75).

3.3) Инерционное прохождение звука определяется поверхностной плотностью и функцией отклика ограждения $F_{и}$. Данная величина имеет численные значения $(0,2 \div 1,0)$ и зависит от геометрических размеров ограждения и частоты звука. Значения функции отклика определяются по формуле (2.59).

3.4) Построение частотных характеристик звукоизоляции ограждением до 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 стрелки, 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 с ОПС (искомый вариант).

3.5) Сравнение частотных характеристик звукоизоляции проектируемой ограждающей конструкции с оценочной кривой по СП 51.13330-2011 «Защита от шума», вычисление индексов изоляции воздушного шума R_w и R'_w .

4. Экспериментальные исследования звукоизоляции однослойных ограждающих конструкций с ослабленным поперечным сечением

4.1. Методика исследований

Измерения звукоизоляции исследуемых ограждающих конструкций проводились в больших и малых реверберационных камерах лаборатории акустики ННГАСУ. Конструктивное решение данных камер показано на рис. 4.1 и 4.2 соответственно. Для создания диффузного звукового поля измерительным камерам придана неправильная форма. Большие реверберационные камеры объемом 150 и 66 м³ выполнены на самостоятельных фундаментах в целях акустического разобщения и исключения косвенной передачи звука. В малых акустических камерах для тех же целей применены многослойные прокладки из упругих материалов.

Для измерения звукоизоляции ограждений использовалась прецизионная электроакустическая аппаратура «Larson&Davis» (США) и «Sounbook» (Германия). Измерительная установка включает в себя передающий и приемный электроакустические тракты – см. рис. 4.3. Передающий тракт включает в себя генератор шума с третьоктавным фильтром, усилители мощности и систему акустических излучателей. В больших камерах установлено шесть звуковых колонок мощностью 100 Вт каждая, а в малых камерах – четыре звуковые колонки мощностью 20 Вт каждая. Все излучатели установлены на различной высоте и имеют различную ориентацию в пространстве, что обеспечивает создание диффузного звукового поля в камере высокого уровня (КВУ).

Приемный электроакустический тракт состоит из двухканальных анализаторов спектра «Larson&Davis» 2900В и «Sounbook», оснащенных конденсаторными микрофонами «Larson&Davis», 1/2 ", тип 2559.

ПЛАН НА ОТМ. 0,000

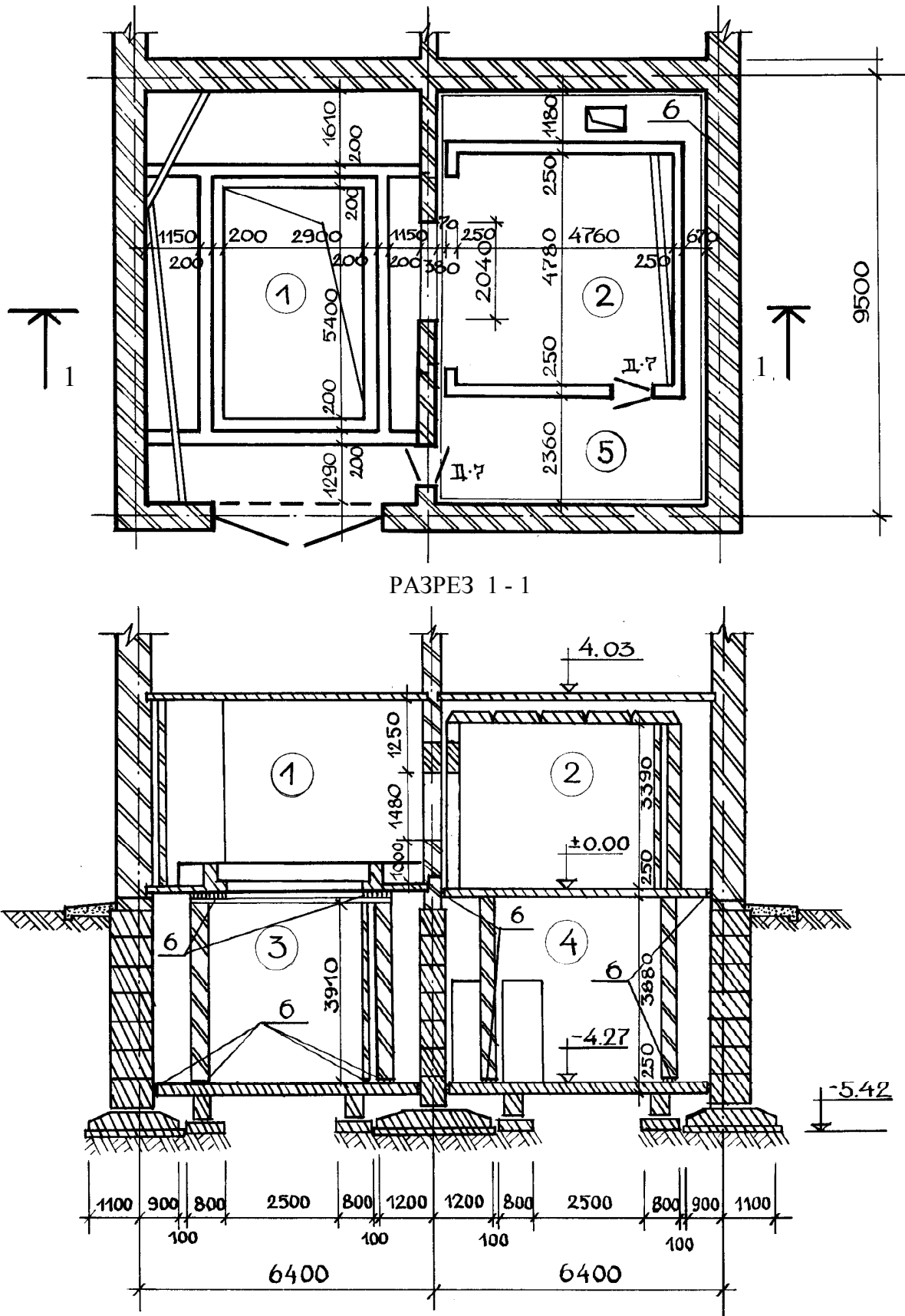


Рис. 4.1. Измерительные камеры лаборатории акустики ННГАСУ: 1 – камера высокого уровня ($V = 150 \text{ м}^3$); 2 – камера низкого уровня ($V = 66 \text{ м}^3$); 3 – камера низкого уровня ($V = 81 \text{ м}^3$); 4 – заглушенная камера; 5 – аппаратная; 6 – акустическое разобщение

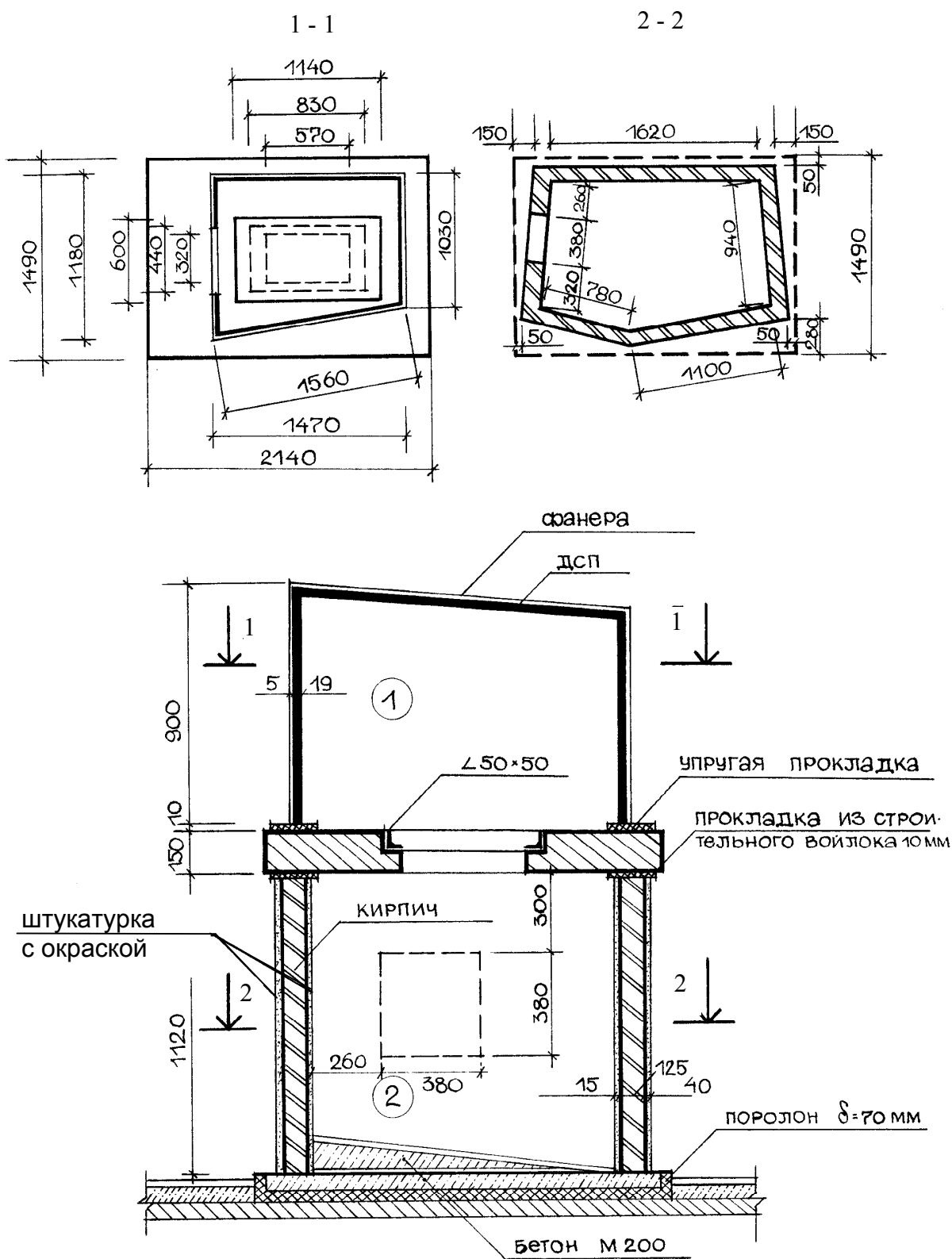


Рис. 4.2. Малые реверберационные камеры лаборатории акустики ННГАСУ: 1 – камера высокого уровня ($V = 1,33 \text{ м}^3$); 2 – камера низкого уровня ($V = 1,73 \text{ м}^3$)

4.2. О надежности и точности измерений звукоизоляции ограждающих конструкций

Реверберационные камеры лаборатории акустики ННГАСУ удовлетворяют требованиям для определения звукоизоляции ограждающих конструкций в нормируемом диапазоне частот. Измерительное оборудование и средства измерений обеспечивают стабильный прием звукового сигнала с погрешностью не более 1,0 дБ при уровне собственных шумов менее 15 дБ.

Результаты подробных экспериментальных исследований звукового поля в реверберационных камерах приведены в работе [41]. Для оценки диффузности звукового поля в больших камерах уровни звукового давления измерялись в 220 точках в КНУ и в 260 точках в КВУ. В малых реверберационных камерах количество измерений для КНУ и КВУ составило 160 и 150 точек соответственно. По результатам проведенных измерений была определена величина среднеквадратического отклонения пространственного распределения звукового давления. На рис. 4.3 и 4.4 приведены результаты оценки диффузности поля в звукомерных камерах [39].

Измерения времени стандартной реверберации в больших и малых реверберационных камерах показали, что оно изменяется в пределах $0,6 \div 4$ с и $0,5 \div 3$ с соответственно. Это свидетельствует о малом звукопоглощении в камерах низкого уровня.

Точность проводимых измерений определяется величиной суммарной погрешности, которая для реверберационных камер ННГАСУ составляет $1 \div 2$ дБ при доверительной вероятности 0,95 [41].

Проведенное рассмотрение подтверждает наличие необходимых условий, которые обеспечивают надежное и точное измерение звукоизоляции ограждающих конструкций в реверберационных камерах лаборатории акустики ННГАСУ.

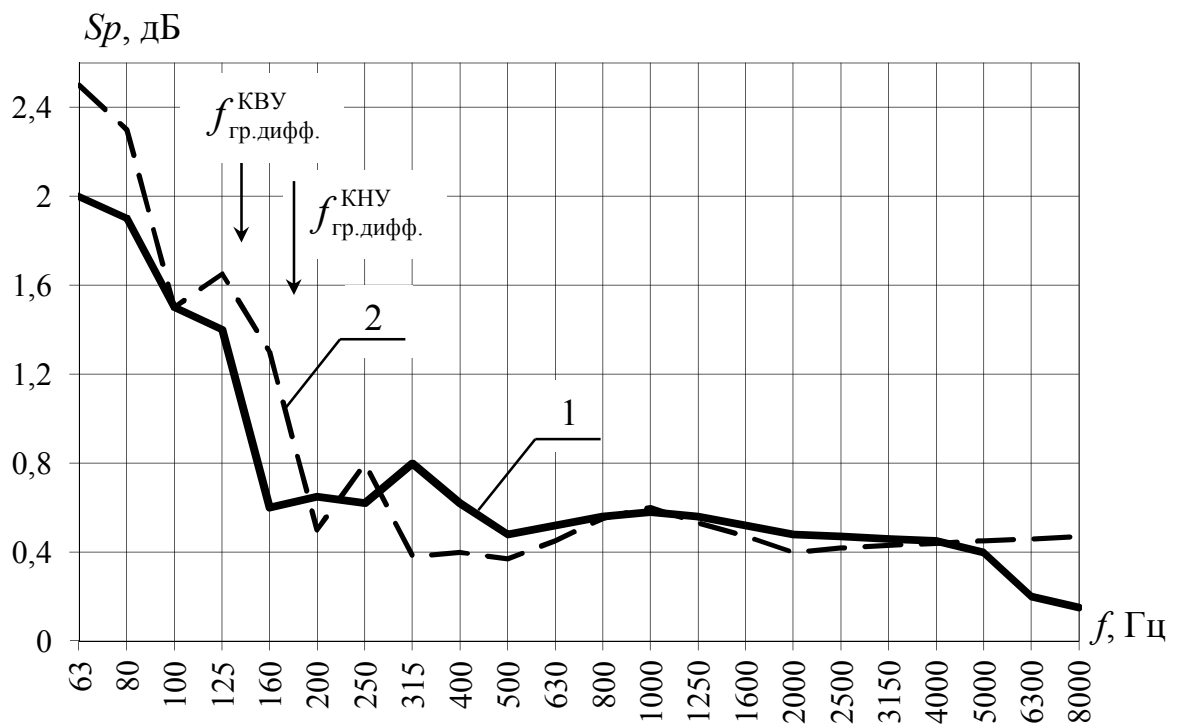


Рис. 4.3. Величина среднеквадратического отклонения пространственного распределения звукового давления в больших реверберационных камерах: 1 – для КВУ; 2 – для КНУ

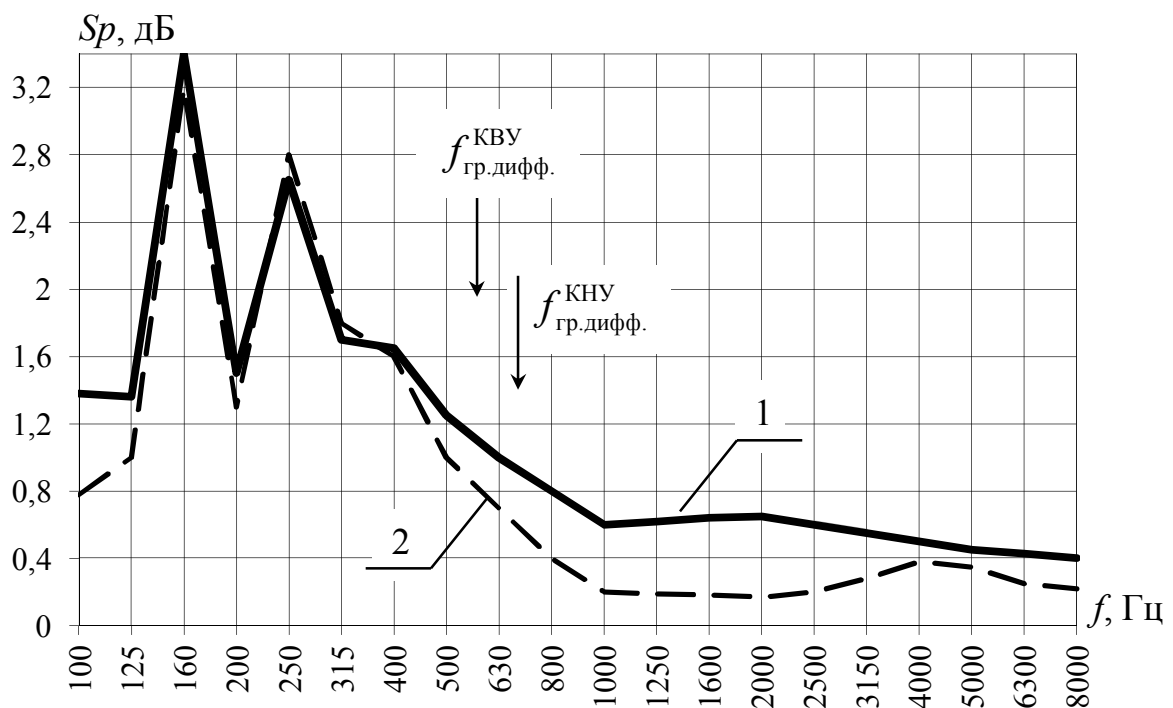


Рис. 4.4. Величина среднеквадратического отклонения пространственного распределения звукового давления в малых реверберационных камерах: 1 – для КВУ; 2 – для КНУ

4.3. Звукоизоляция однослойных легких ограждающих конструкций

В качестве объекта исследования легких ограждающих конструкций проведены экспериментальные исследования звукоизоляции гипсоволокнистых листов с ОПС. Измерения звукоизоляции ограждений из ГВЛ проводились в малых реверберационных камерах лаборатории акустики ННГАСУ.

В качестве образцов для проведения испытаний использовались листы толщиной 12,5 мм и геометрическими размерами $1,0 \times 0,5$ м. Выше было определено, что для ГВЛ толщиной 12,5 мм оптимальная толщина после ОПС составляет $h_{\text{ОПТ.}} = 0,006 \text{ м} = 6 \text{ мм}$, т. е. $\delta = 6,5 \text{ мм}$.

Гипсоволокнистые листы используются при возведении внутренних перегородок в зданиях и сооружениях в качестве обшивок по каркасу, поэтому ослабление сечения на величину $\delta \approx h/2$ не будет опасным из соображений прочности и устойчивости конструкции – условие (3.18) выполняется.

В соответствии с выражением (3.5) оптимальный шаг прорезей не должен превышать четверти длины изгибной волны в панели на частоте граничного пространственного резонанса. Для ГВЛ это условие выполняется при $d < 0,03 \text{ м}$. Кроме того, из практических соображений необходимо, чтобы шаг прорезей был кратным сторонам образца a и b . Принимаем оптимальный шаг прорезей $d_{\text{ОПТ.}} = 0,025 \text{ м} = 2,5 \text{ см}$. При ширине прорезей $a = 3 \text{ мм}$ поверхностная плотность ГВЛ с ослабленным сечением равна $\mu_{\text{П.}} = 13,3 \text{ кг/м}^2$.

На рис. 4.5 проводится сравнение экспериментальных частотных характеристик звукоизоляции ГВЛ до и после ОПС с теоретической кривой предельной звукоизоляции, рассчитанной по формуле (2.77). Анализируя представленные данные, можно видеть, что оптимальное ослабление сечения однослойного легкого ограждения позволило вывести провал звукоизоляции вблизи граничной частоты области ППР за верхнюю границу нормируемого диапазона частот. При этом звукоизоляция панели в расширенной области НПР повысилась на $5 \div 14 \text{ дБ}$ по сравнению с исходным вариантом и приблизилась к своим предельным значениям.

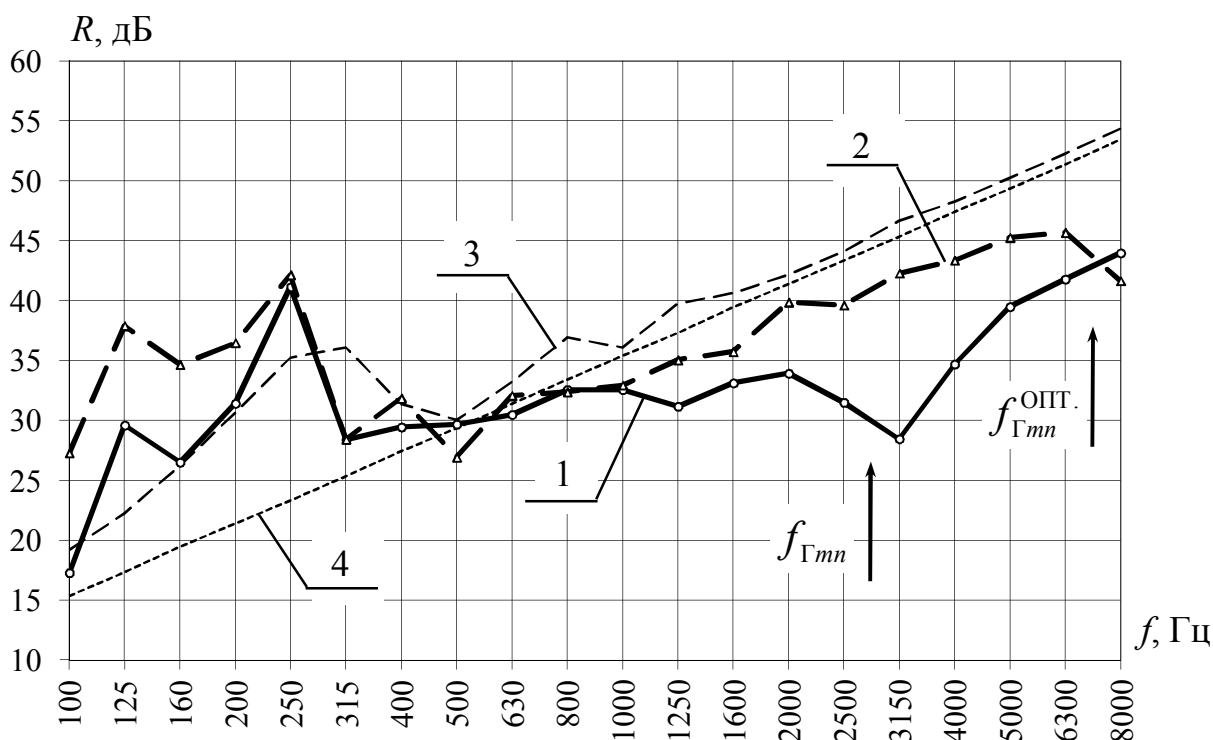


Рис. 4.5. Частотные характеристики звукоизоляции ГВЛ ($a \times b = 1,0 \times 0,5$ м): 1 – экспериментальная кривая для исходного ограждения до ОПС; 2 – экспериментальная кривая для ограждения после ОПС; 3 – кривая предельной звукоизоляции; 4 – закон масс

Полученные экспериментальные данные по звукоизоляции ГВЛ соответствуют результатам теоретических исследований, представленным в п. 3.4.1.

Дальнейшим направлением экспериментальных исследований было изучение влияния шага прорезей d на величину повышения звукоизоляции легкой ограждающей конструкции. Для оценки влияния данного параметра ОПС на звукопроницаемость были проведены измерения звукоизоляции ГВЛ с шагом прорезей $d > d_{\text{ОПТ.}}$: $d = 25$ см и $d = 9$ см при оптимальной глубине ОПС $\delta = 6,5$ мм. Результаты данных исследований приведены на рис. 4.6.

Из рассмотрения рис. 4.6 можно видеть, что для варианта ОПС с неоптимальным шагом прорезей $d = 25$ см (одна продольная прорезь и две поперечных прорези) звукоизоляция панели уменьшилась на $5 \div 7$ дБ относительно исходного варианта в диапазонах частот $f = 400 \div 1000$ Гц и $f = 4000 \div 8000$ Гц. Уменьшение шага прорезей до 9 см привело к некоторому повышению звукоизоляции ГВЛ вблизи граничного пространственного резонанса, но дополни-

тельного снижения звукопроницаемости ограждения не произошло. При использовании оптимального шага прорезей $d_{\text{опт.}} = 2,5$ см значения звукоизоляции ГВЛ соответствуют расчетным значениям.

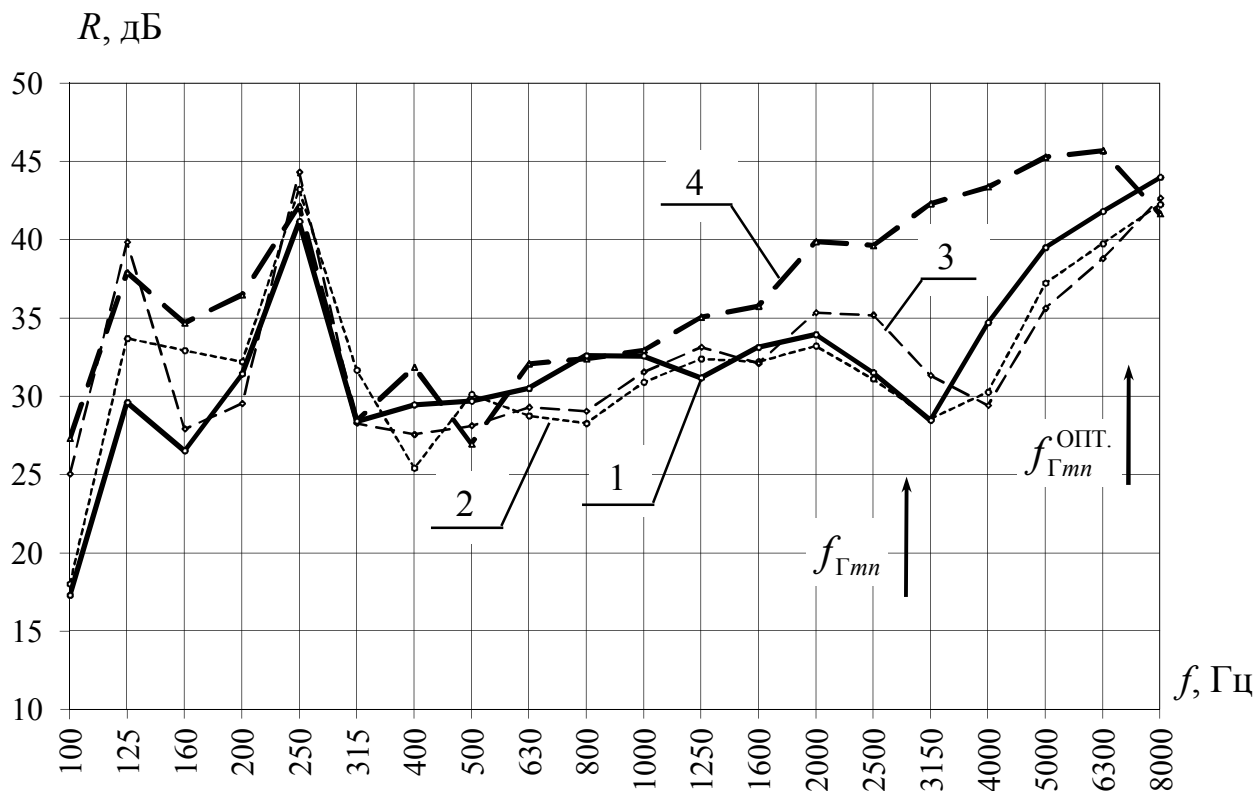


Рис. 4.6. Экспериментальные частотные характеристики звукоизоляции ГВЛ ($a \times b = 1,0 \times 0,5$ м): 1 – до ОПС ($h = 12,5$ мм); 2 – после ОПС ($h_{\text{опт.}} = 6$ мм; шаг прорезей $d = 25$ см); 3 – после ОПС ($h_{\text{опт.}} = 6$ мм; $d = 9$ см); 4 – после оптимального ОПС ($h_{\text{опт.}} = 6$ мм; $d_{\text{опт.}} = 2,5$ см)

Проведенное экспериментальное исследование подтвердило вывод [70] о необходимости определенного соотношения шага прорезей и длины изгибной волны в ограждении $d < \lambda_{\text{и}}/4$.

Если однослойная легкая ограждающая конструкция используется в качестве элемента звукоизолирующего кожуха для изоляции шума с определенным спектром, то может потребоваться не только оптимальное ослабление сечения, но и другая степень ОПС (большая или меньшая, чем оптимальная), которая определяется в зависимости от изолируемого диапазона частот. В связи с этим представляет интерес исследование влияния глубины ослабления сечения ограждения на повышение его звукоизоляции в различных частотных диапазонах.

Для исследования данного вопроса была измерена звукоизоляция гипсоволокнистого листа для двух дополнительных случаев ОПС:

1) $\delta_1 = 5 \text{ мм} < \delta_{\text{ОПТ.}} = 6,5 \text{ мм}$;

2) $\delta_2 = 7,5 \text{ мм} > \delta_{\text{ОПТ.}} = 6,5 \text{ мм}$.

На рис. 4.7 и 4.8 представлены экспериментальные частотные характеристики звукоизоляции ГВЛ для двух вариантов ОПС в сравнении с исходной кривой (до ОПС) и с оптимальной кривой (при $\delta = \delta_{\text{ОПТ.}}$). Можно видеть, что при ослаблении сечения ГВЛ меньше оптимального значения ($\delta_1 = 5 \text{ мм}$), провал звукоизоляции вблизи граничной частоты области ППР не выходит за нормируемый диапазон частот. Благодаря этому в области ППР, в диапазоне $f = 4000 \text{ Гц} \div 8000 \text{ Гц}$ звукоизоляция ограждения снизилась по отношению к исходному варианту на $5 \div 7 \text{ дБ}$.

Для второго варианта ОПС (см. рис. 4.8), при котором ослабление поперечного сечения больше оптимального значения, в рассматриваемом диапазоне частот дополнительного повышения звукоизоляции практически не происходит, а на частотах $f = 3150 \text{ Гц}$ и 4000 Гц наблюдается снижение звукоизоляции по сравнению с кривой 2 (соответствует оптимальному ОПС). Это вызвано тем, что при оптимальном ОПС гипсоволокнистого листа его звукоизоляция максимально приблизилась к своим предельным значениям и дальнейшее ослабление поперечного сечения не приводит к дополнительному повышению звукоизоляции.

Также можно видеть, что за счет дополнительного ОПС облегченного ограждения можно смещать граничную частоту ППР на более высокие частоты по сравнению с оптимальной величиной ($f_{\text{Гmn}}^2 = 9200 \text{ Гц}$).

На рис. 4.9 показана динамика изменения частотных характеристик звукоизоляции ГВЛ в зависимости от степени ОПС. Можно видеть, что последовательное снижение фактической толщины легкого ограждения приводит к снижению его звукопроницаемости в области НПР (диапазоны средних и высоких частот) и приближению звукоизоляции к своим предельным значениям.

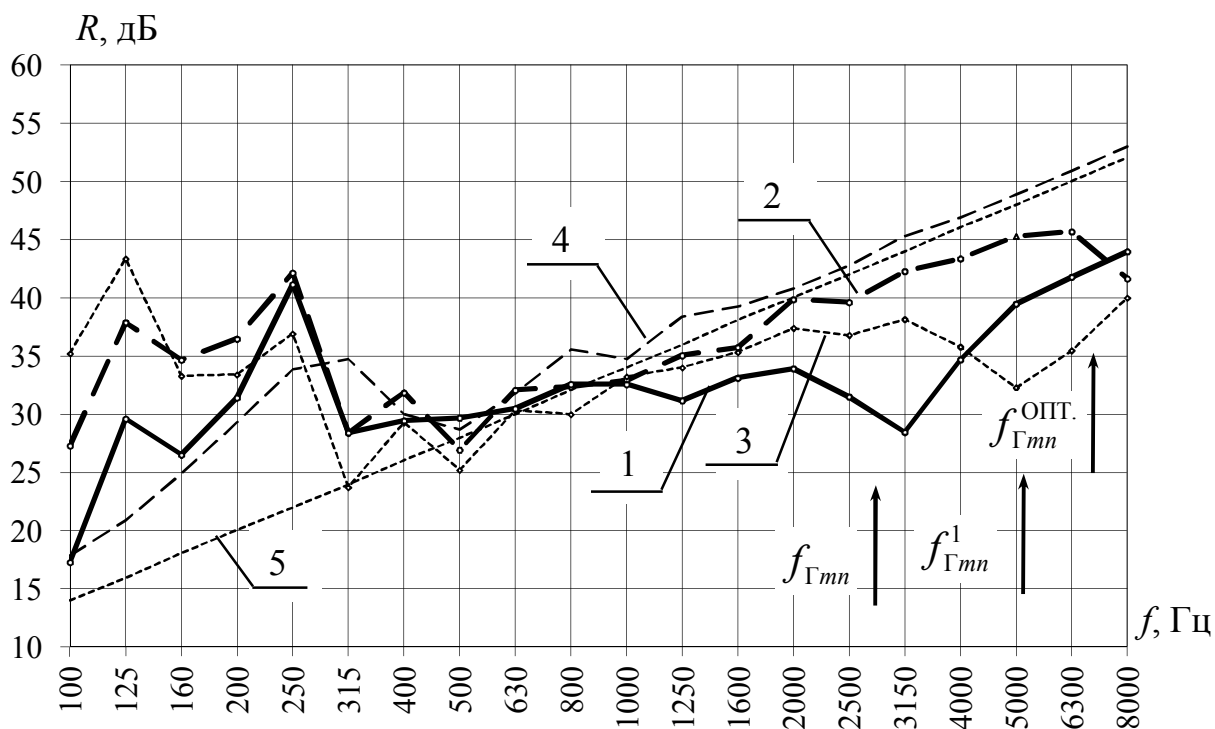


Рис. 4.7. Экспериментальные частотные характеристики звукоизоляции ГВЛ ($a \times b = 1,0 \times 0,5$ м): 1 – до ОПС ($h = 12,5$ мм); 2 – после оптимального ОПС ($\delta_{\text{ОПТ.}} = 6,5$ мм, $h_{\text{ОПТ.}} = 6$ мм); 3 – после ОПС, меньшего, чем оптимальный ($\delta_1 = 5$ мм, $h_1 = 7,5$ мм); 4 – кривая предельной звукоизоляции; 5 – закон масс

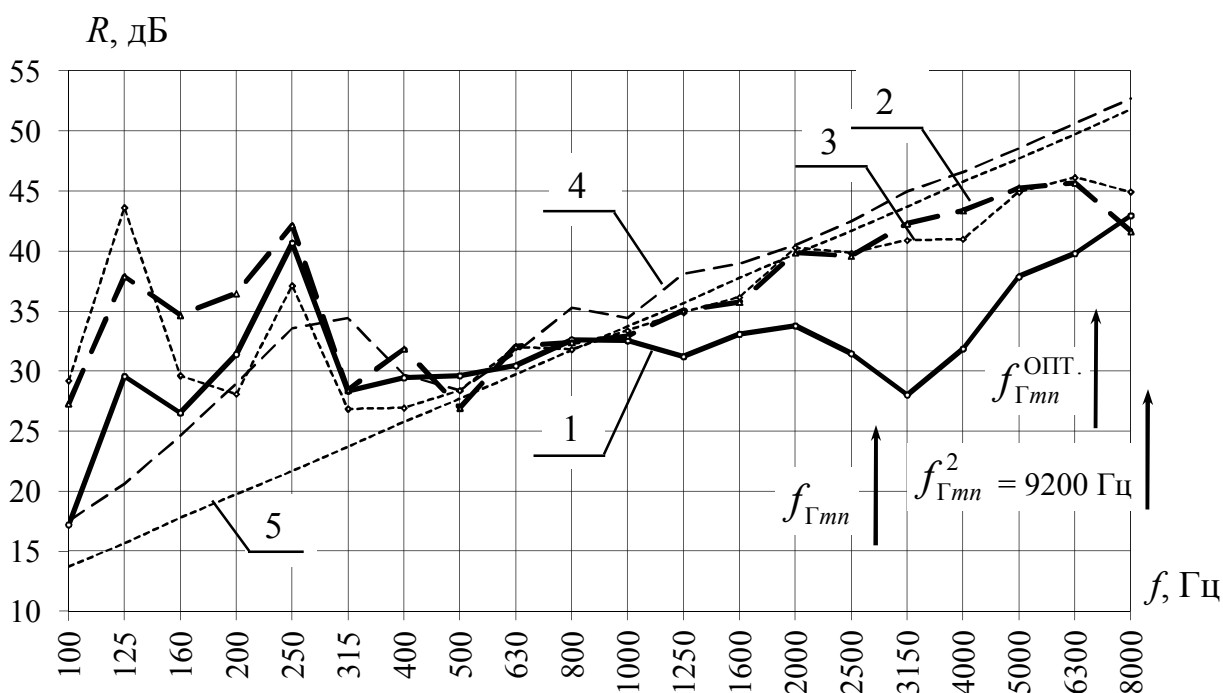


Рис. 4.8. Экспериментальные частотные характеристики звукоизоляции ГВЛ ($a \times b = 1,0 \times 0,5$ м): 1 – до ОПС ($h = 12,5$ мм); 2 – после оптимального ОПС ($\delta_{\text{ОПТ.}} = 6,5$ мм, $h_{\text{ОПТ.}} = 6$ мм); 3 – после ОПС, большего, чем оптимальный ($\delta_2 = 7,5$ мм, $h_2 = 5$ мм); 4 – кривая предельной звукоизоляции; 5 – закон масс

При этом поверхностная плотность ограждающей конструкции не только не увеличивается, но и снижается благодаря увеличению глубины прорезей. Данные результаты подтверждают теоретические выводы, сделанные в п. 3.4.1.

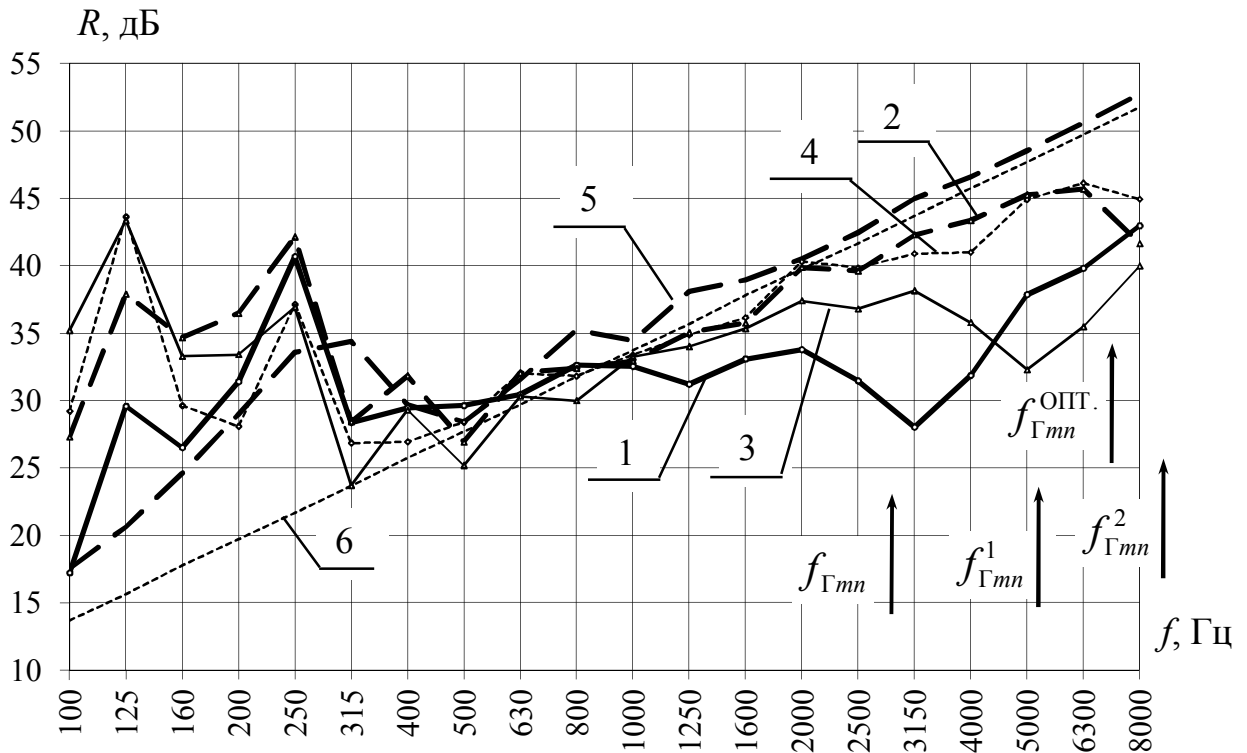


Рис. 4.9. Экспериментальные частотные характеристики звукоизоляции ГВЛ ($a \times b = 1,0 \times 0,5$ м): 1 – до ОПС ($h = 12,5$ мм); 2 – после оптимального ОПС ($\delta_{\text{опт.}} = 6,5$ мм, $h_{\text{опт.}} = 6$ мм); 3 – после ОПС, меньшего, чем оптимальный ($\delta_1 = 5$ мм, $h_1 = 7,5$ мм); 4 – после ОПС, большего, чем оптимальный ($\delta_2 = 7,5$ мм, $h_2 = 5$ мм); 5 – кривая предельной звукоизоляции; 6 – закон масс

Проведенное исследование показало, что для однослойных легких ограждений наилучший результат использования резервов повышения звукоизоляции в нормируемом диапазоне частот наблюдается при оптимальном ослаблении сечения, когда $\delta = \delta_{\text{опт.}}$ и $d = d_{\text{опт.}}$. Другие виды ОПС можно применять для регулирования звукопроницаемости ограждения в области граничного ППР в зависимости от спектра изолируемого шума.

На рис. 4.10, 4.11 представлены теоретические и экспериментальные частотные характеристики звукоизоляции древесностружечной плиты (ДСП) и панели из органического стекла [39].



Рис. 4.10. Частотные характеристики звукоизоляции ДСП с ОПС ($a \times b = 1,2 \times 1,08$ м): 1 – экспериментальная кривая до ОПС ($h = 23$ мм, $D/\mu = 115,6$ м⁴/с²); 2 – теоретическая кривая до ОПС; 3 – экспериментальная кривая после ОПС ($\delta = 11,5$ мм, $h_{\text{П.}} = 11,5$ мм; $D_{\text{П.}}/\mu_{\text{П.}} = 16,4$ м⁴/с²); 4 – теоретическая кривая после ОПС

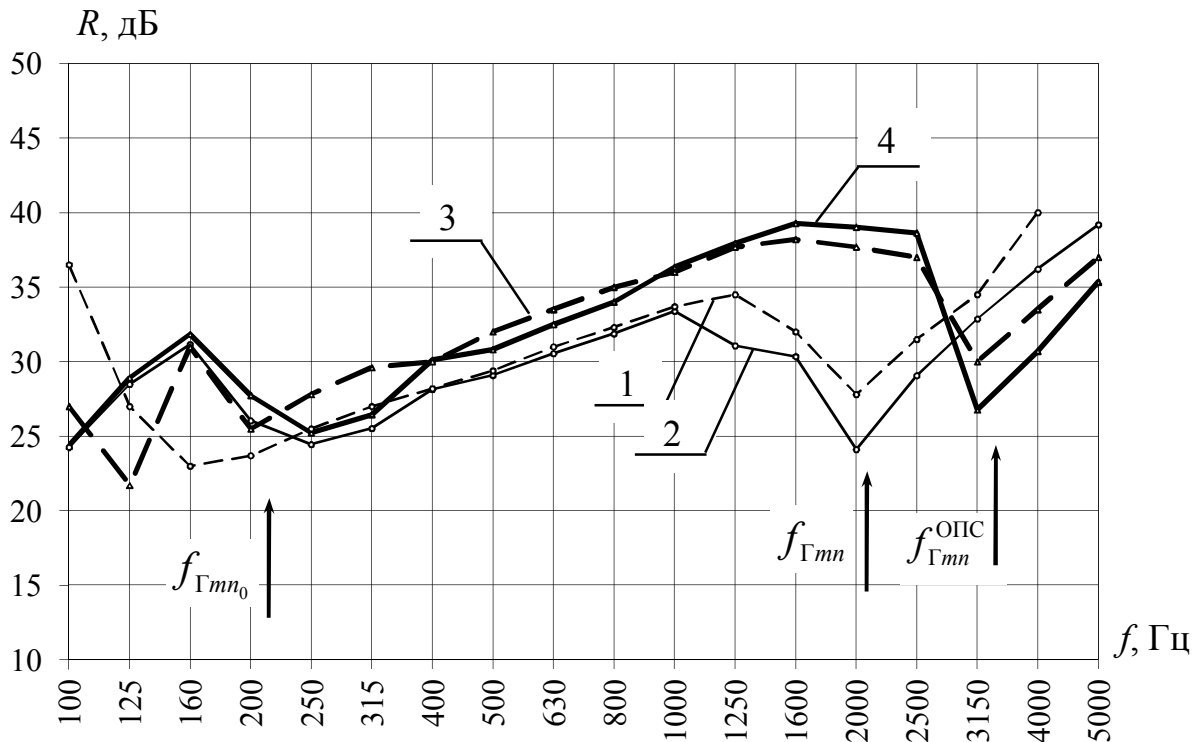


Рис. 4.11. Частотные характеристики звукоизоляции панели из оргстекла с ОПС ($a \times b = 1,20 \times 1,08$ м): 1 – экспериментальная кривая до ОПС ($h = 15$ мм, $D/\mu = 88$ м⁴/с²); 2 – теоретическая кривая до ОПС; 3 – экспериментальная кривая после ОПС ($\delta = 5$ мм, $h_{\text{П.}} = 10$ мм; $D_{\text{П.}}/\mu_{\text{П.}} = 35,8$ м⁴/с²); 4 – теоретическая кривая после ОПС

Из рассмотрения рис. 4.10 и 4.11 можно видеть, что ослабление поперечного сечения позволяет значительно повышать звукоизоляцию легких ограждений в диапазонах средних и высоких частот. Экспериментальные данные для ограждений из ДСП и оргстекла подтверждают выводы, сделанные на примере ГВЛ.

4.4. Звукоизоляция однослойных ограждающих конструкций со средней поверхностной плотностью

Ограждающие конструкции со средней поверхностной плотностью широко применяются при возведении внутренних перегородок гражданских и промышленных зданий. Практический интерес представляют экспериментальные исследования звукоизоляции данного типа ограждений с ОПС с целью подтверждения теоретических выводов, представленных в п. 3.4.2.

В п. 3.4.2 проведен расчет теоретической частотной характеристики звукоизоляции данной строительной панели. Определено, что для ГБ панели толщиной 80 мм оптимальная толщина после ОПС с учетом условия (3.18) составляет $h_{\text{ОПТ.}} = 0,04 \text{ м} = 40 \text{ мм}$, т. е. $\delta = h/2 = 40 \text{ мм}$. Оптимальный шаг выполнения прорезей на поверхности панели определяем по формуле (3.5) с учетом кратности длинам сторон a и b : $d_{\text{ОПТ.}} = 0,1 \text{ м} = 10 \text{ см}$. Поверхностная плотность гипсобетонной панели с оптимальным ОПС определяется за вычетом объема прорезей: $\mu_{\text{п.}} = 75,7 \text{ кг/м}^2$.

В больших реверберационных камерах лаборатории акустики ННГАСУ проведены измерения звукоизоляции гипсобетонной панели (ГБ панель) толщиной 80 мм и геометрическими размерами $1,8 \times 1,0 \text{ м}$. На рис. 4.12 представлены экспериментальные частотные характеристики звукоизоляции данного ограждения до и после ОПС. Можно видеть, что оптимальное ослабление сечения ограждения со средней поверхностной плотностью позволяет смещать граничный провал звукоизоляции в область более высоких частот и эффективно использовать внутренние резервы повышения звукоизоляции. Звукоизоляция

ограждающей конструкции повысилась на $3 \div 11$ дБ по сравнению с исходным вариантом (до ОПС) как в диапазонах средних и высоких, так и низких частот. Это подтвердило теоретические выводы, сделанные в п. 3.4.2, относительно перспективности применения ОПС для использования резервов повышения звукоизоляции ограждений со средней поверхностной плотностью.

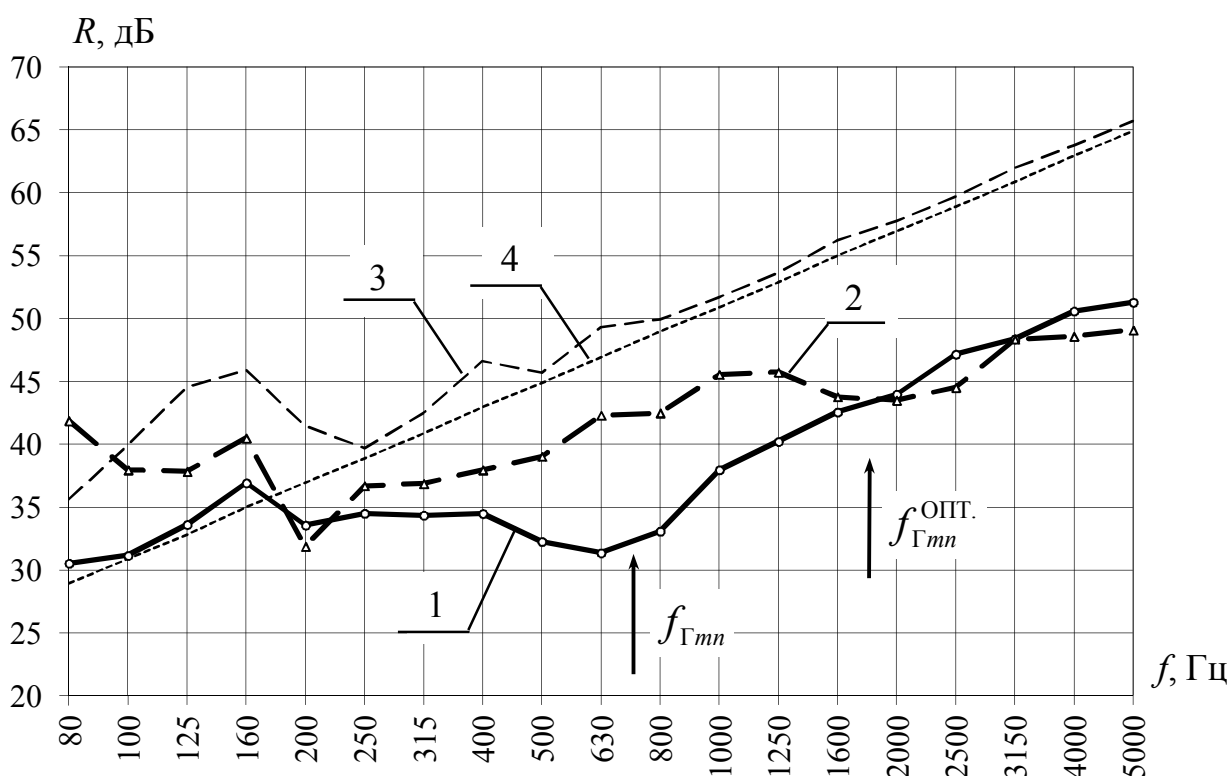


Рис. 4.12. Частотные характеристики звукоизоляции ГБ панели ($a \times b = 1,8 \times 1,0$ м): 1 – экспериментальная кривая для исходного образца (до ОПС); 2 – экспериментальная кривая для образца с оптимальным ОПС; 3 – кривая предельной звукоизоляции; 4 – закон масс

Для гипсобетонной панели также был проведен эксперимент по изучению влияния шага прорезей d на величину ее звукоизоляции. Для этого была измерена звукоизоляция данного ограждения с шагом прорезей $d > d_{\text{Опт.}}$: $d = 200$ мм при оптимальной глубине прорезей $\delta = 40$ мм. Результаты данного эксперимента приведены на рис. 4.13.

Анализируя данные, представленные на рис. 4.13, можно видеть, что при шаге прорезей $d = 200$ мм звукоизоляция панели повысилась относительно ис-

ходного состояния на $3 \div 8$ дБ относительно исходного варианта в диапазоне средних частот (вблизи граничного ППР).

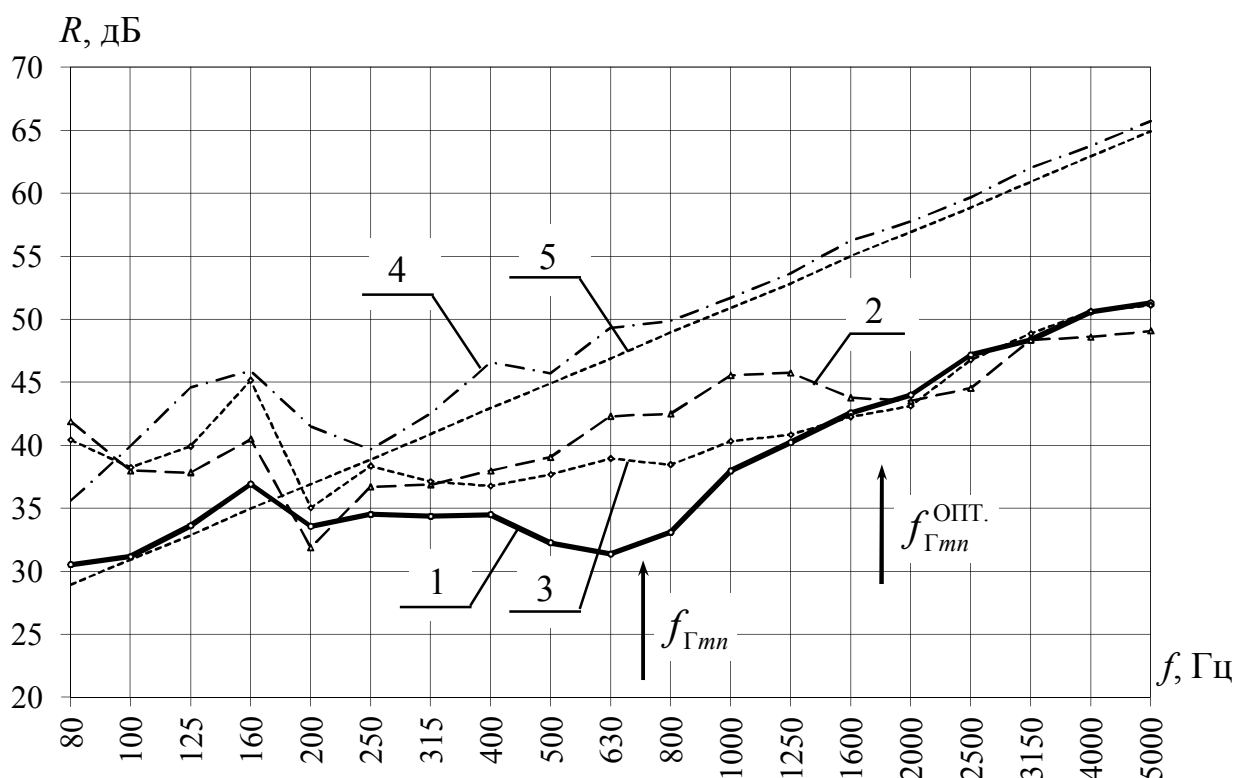


Рис. 4.13. Экспериментальные частотные характеристики звукоизоляции ГБ панели ($a \times b = 1,8 \times 1,0$ м): 1 — до ОПС ($h = 80$ мм); 2 — после оптимального ОПС ($h_{\text{опт.}} = 40$ мм; шаг прорезей $d_{\text{опт.}} = 10$ см); 3 — после ОПС, меньшего, чем оптимальный ($h_{\text{опт.}} = 40$ мм; $d = 20$ см); 4 — кривая предельной звукоизоляции; 5 — закон масс

Это повышение произошло несмотря на невыполнение условия: $d < \lambda_{\text{д}}/4$. То есть, в отличие от легких ограждений, для ограждений со средней поверхностной плотностью можно получить дополнительное повышение звукоизоляции при шаге прорезей, большим, чем оптимальный шаг. При этом провал вблизи граничной частоты области ППР сглаживается и звукоизоляция панели становится ближе к своим предельным значениям.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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.
2. Berger R. Die Zfuftschalldämpfung von Wänden. Forschung aus dem Gebiete des Ingenieurwesens, 1932, B.3, S. 193-202.
3. Schoch A. Die physicalischen und technischen Grundlagen der Schalldämmung im Bauwesen, Leipzig, 1937.
4. Reissner H. Der senkrechte und schräge Durchtritt einer in einem flüssiger Medium ersugten ebenen Dilatations (longitudinal) Welle durch eine in diesem Medium befindliche planparallele feste Platte. Helv. Phys. ASTA, 1938, B. 11, S. 140.
5. Cremer L. Theorie der Schalldämmung dünner Wände bei schragem Einfall. Akustische Zeitschrift, 1942, B. 7, №3, S. 81–104.
6. Sanders F.H. Can. J. Research, Vol. 1, 1939.
7. Gotz J. Akust. Zs., 11, 1943.
8. Beranek L.L. Noise Reduction, New York-Toronto-London. Mc.Graw-Hill. Book Company. – 1960, 752 p.
9. Schoch A. Der Schalldurchgang durch Platten // Acustica. – 1952, B. 2. – S. 55–78.
10. Schoch A. Zum Einfluss der seitlichen Bergrenzung auf die Schalldurchlässigkeit einfacher Wände//Acustica. – 1954, B.4. – S. 288–302.
11. Лямшев Л.М. Отражение звука тонкими пластинками и оболочками в жидкости. Изд-во АН СССР, 1955.
12. Заборов В.И. Теория звукоизоляции ограждающих конструкций. – М.: Стройиздат, 1969. – 185 с.
13. 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.
14. Осипов Г.Л. Шумы и звукоизоляция. М., Госстройиздат, 1967. – 252 с.

15. Осипов Г.Л. Методы и средства защиты от шума в зданиях и на селитебной территории // Защита от шума зданий и территорий, акустический комфорт: Сб. тр. ин-та / НИИСФ. – М., 1986. – С. 5–14.
16. Fleming F. Nat phus. Lab. Teddington, private communication, 1950. – 27 p.
17. Bobran H.W. Die kritischen Frequenzen schalldämmen der Bauteile. Boden//Band und Decke. – 1957, № 11. – S.331–335.
18. Peutz V.M. Some fundamental measurements on single and double plate structures //Acustica. – 1954. – Vol.4, № 1. – S. 281–292.
19. Schoch A., Feher K. The mechanism of sound transmission through single leaf partitions investigated using small scale models//Acustica. – 1952 – Vol. 2, № 5. – S. 189–195.
20. Peutz V.M. Letter to the editor concerning the article by W. Kuhl “Fehlermöglichkeiten bei Schalldämmungsmessungen bei tiefen Frequenzen” //Acustica. – 1955. – Vol. 5, № 1. – S. 46–55.
21. Heckl M. Die Schalldämmung von homogenen Einfachwänden endlicher Fläche //Acustica. – 1960. – Bd.10, №2. – S. 98–108.
22. Heckl M. Untersuchung an orthotropic Platten//Acustica. – 1960. – Vol.10, №2. –S. 109–115.
23. Kihlman T.K. Sound Radiation into a Rectangular Room. Applicative to Airborne Sound Transmission in Buildings//Acustica. – 1967. – Vol.18, № 1. – S. 11–20.
24. Kihlman T.K., Nilsson A.C. The effects of some laboratory designs and mounting conditions on reduction index measurements//The journal of sound and vibration. –1972. – Vol.24, № 3. – S. 349–364.
25. Mulholland K.A., Lyon R.H. Sound insulation at low frequencies//The Journal of the Acoustical Society of America. – 1973. – vol. 54, № 4. – P. 867–878.
26. Nilsson A.C. Reduction index and boundary conditions for a wall between two rectangular rooms. Part I, Theoretical results//Acustica. – 1972. – Vol.26, № 1. – S. 1–18.

27. Nilsson A.C. Reduction index and boundary conditions for a wall between two rectangular rooms. Part II, Experimental results// *Acustica*.–1972. –Vol. 26, № 1. – S. 19-23.

28. Nilsson A.C., Kihlman T.K. Influence of boundary conditions upon the reduction index of a wall between two rectangular rooms//*Proc. 7-th Int. Congr. Acoust., Budapest.* – 1971. – P. 33–36.

29. Utley W.A. Single leaf transmission loss at low frequencies//*The Journal of sound and vibration.* – 1968 – Vol.8, № 2. – S. 256–261.

30. Josse R., Lamure C. Transmission du son par une paroi simple // *Acustica.* – 1964, № 14. – S. 226–243.

31. Lyon R., Maidanik G. Power flow between lineary coupled oscillators//*The Journal of the Acoustical Society of America.* – 1962, Vol. 34. – P. 623–635.

32. 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.

33. Овсянников С.Н. Распространение звуковой вибрации в гражданских зданиях. – Томск: Изд-во ТГАСУ, 2000. – 378 с.

34. 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.

35. Седов М.С. Звуковая динамика зданий и сооружений // *Изв. вузов. – Сер.: Строительство.* – 1997. – № 8. – С. 19–23.

36. 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.

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

38. Седов М.С., Бобылев В.Н., Тишков В.А. и др. Прогнозирование и измерения звуковой среды: Учебное пособие. – Нижний Новгород: ННГУ, 1991. – 67 с.

39. Бобылев В.Н. Звукоизоляция однослойных ограждающих конструкций на частотах, ниже граничной: Автореф. дис. канд. техн. наук. – Горький, 1974. – 25 с.

40. Бобылев В.Н. О звукоизоляции однослойных ограждений в области частот ниже граничной частоты диффузности звукового поля//Звукоизоляция конструкций зданий. Труды ГИСИ, вып. 71. – Горький: ГИСИ, 1974. – С. 44–50.

41. Бобылев В.Н., Данилин С.Г. О надежности и точности измерений звукоизоляции однослойных ограждений//Звукоизоляция конструкций зданий. Труды ГИСИ, вып. 71. – Горький: ГИСИ, 1974. – С. 66–74.

42. Седов М.С., Тишков В.А. Расчет звукоизоляции однослойных конструкций при направленном падении звука. Курс лекций.– Горький: ГГУ им. Н.И. Лобачевского, 1978. – 45 с.

43. Кочкин А.А. О звукоизоляции облегченных демпфированных ограждений при продолжительной их эксплуатации / А.А. Кочкин, Ю.Я. Машьянов // Длительное сопротивление конструкционных материалов и вопросы расчета элементов конструкций: межвуз. сб. – Ленинград – Вологда, 1991. – С. 70-71.

44. Кочкин А.А. Исследование влияния физико-механических характеристик слоистых элементов с вибродемпфирующими слоями на звукоизоляцию непрозрачных ограждающих конструкций / А.А. Кочкин // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – Томск. – 2012. – №3 – С. 111-116.

45. Седов М. С., Машьянов Ю. Я. Проектирование эффективных звукоизолирующих ограждений: Учебное пособие. – Горький: ГИСИ им. В. П. Чкалова, 1989. – 36 с.

46. Седов М.С., Юферев А.П. Расчет звукоизоляции двустенных конструкций: Конспект лекций. – Горький: ГИСИ им. В.П. Чкалова, 1983. – 40 с.

47. Седов М.С., Юлин В.И., Кочкин А.А. Расчет звукоизоляции облегченных ограждающих конструкций: Учебное пособие. – Горький: ГИСИ им. В.П. Чкалова, 1985. – 55 с.
48. Большаков В.Н. О звукоизоляции ограждающих конструкций с учетом их пространственной взаимосвязи. Депонир. рукопись, ЦИНИС, № 1593, Горький, 1979. – 27 с.
49. Седов М.С., Данилин С.Г. Волновое поле неразрезных пластин/Звукоизоляция конструкций зданий. Труды ГИСИ, вып. 71.– Горький: ГИСИ, 1974.– С. 3–10.
50. Cremer L., Eisenberg A. Verbesserung der Schalldämmung dünner Wände durch Verringerung ihrer Biegesteifigkeit//Bauplanung und Bautechnik. – 1948. – В.2, №8, S. 235–281.
51. Ильяшук Ю.М. Влияние жесткости ограждающих конструкций на их звукоизоляцию / Сб. Борьба с шумом и действие шума на организм. Вып. 2. ЛИОТ, Л., 1958. – С.57–76.
52. Клячко Л.Н. Вопросы снижения производственных шумов методами звукоизоляции. Автореф. дис. канд. техн. наук: Челябинск. – Уралниипром-проект, 1965. – 24 с.
53. Боголепов И.И. К вопросу о звукоизоляции прозрачных конструкций / Сб. «Шумоглушение». ВЦНИИОТ ВЦСПС. – М.: 1976. – С. 33–39.
54. Боголепов И. И. Промышленная звукоизоляция. – Л.: Судостроение, 1986. – 368 с.
55. Бобылев В.Н., Седов М.С. О влиянии изгибной жесткости ограждений на их звукоизоляцию в области частот ниже граничной/Тезисы докладов VIII Всесоюзной акустической конференции. – М.: 1973. – С. 27–29.
56. Мониц Д.В. Повышение звукоизоляции ограждающих конструкций зданий и сооружений без увеличения их массы. Автореф. дис. канд. техн. наук. – ННГАСУ. – 2002. – 24 с.

57. 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.

58. 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.

59. Тимошенко С. П. Колебания в инженерном деле. – М.: Наука, 1967. – 444 с.

60. Бидерман В.Л. Теория механических колебаний: Учебник для вузов. – М.: Высш. школа, 1980. – 408 с.

61. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Механика., 4-е изд., М.: Наука, 1988. – 325 с.

62. Двайт Г.Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы. – М.: Наука, 1964. – 228 с.

63. Фурдуйев В.В. Электроакустика. – М.: Гостехтеориздат, 1948. – 515 с.

64. Седов М.С. Теория инерционного прохождения звука через ограждающие конструкции // Изв. вузов. – Сер.: Строительство и архитектура. – 1990. – № 2. – С. 37–42.

65. Седов М.С., Бобылев В.Н. Расчет звукоизоляции строительных панелей: Учебное пособие. – Горький: ННГУ, 1979. – 111 с.

66. Седов М.С., Бобылев В.Н. Расчет звукоизоляции однослойных ограждений на низких частотах. – Горький: ГГУ им. Н.И. Лобачевского, 1976. – 46 с.

67. Седов М.С. Решение некоторых основных задач о собственных колебаниях упругих тел. – Горький: ГГУ им. Н.И. Лобачевского, 1970. – 64 с.

68. Боголепов И.И. Промышленная звукоизоляция. – Л.: Судостроение, 1986. – 368 с.

69. Клюкин И.И. Борьба с шумом и звуковой вибрацией на судах.– Л.: Судостроение, 1971. – 416 с.

70. Заборов В.И. Теория звукоизоляции ограждающих конструкций. – М.: Стройиздат, 1969. – 185 с.

Бобылев Владимир Николаевич
Монич Дмитрий Викторович
Тишков Владимир Александрович
Гребнев Павел Алексеевич

РЕЗЕРВЫ ПОВЫШЕНИЯ ЗВУКОИЗОЛЯЦИИ
ОДНОСЛОЙНЫХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

Монография

Редактор
Д.М. Фетюкова

Подписано в печать 05.12.2014 г. Формат 60 × 90 1/16.

Бумага типографская. Печать трафаретная.

Уч. изд. л. 6,8 Усл. печ. л. 7,3. Тираж 500 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.