

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства»
(ПГУАС)

В.М. Разживин

**ИЗОЛЯЦИЯ ВОЗДУШНОГО ШУМА
ЛЕГКИМИ ОГРАЖДАЮЩИМИ
КОНСТРУКЦИЯМИ ЗДАНИЙ
С УЧЕТОМ ИХ ЗАКРЕПЛЕНИЯ**

Пенза 2014

У Д К 692.23:699.844(035.3)

Б Б К 38.43:38.637

P17

*Монография подготовлена в рамках проекта
«ПГУАС – региональный центр повышения качества подготовки
высококвалифицированных кадров для строительной отрасли»
(конкурс Министерства образования и науки Российской Федерации –
«Кадры для регионов»)*

Рецензенты: доктор технических наук, профессор
А.М. Береговой (ПГУАС);
кандидат технических наук, доцент
В.В.Викторов (ООО «Граждан-
проект» г.Пенза)

Разживин В.М.

P17 Изоляция воздушного шума легкими ограждающими
конструкциями зданий с учетом их закрепления: моногр. /
В.М. Разживин. – Пенза: ПГУАС, 2014. – 120 с.
ISBN 978-5-9282-1122-6

Изложены теоретические основы и практический метод расчета изоляции воздушного шума легкими ограждениями с учетом закрепления контура ограждения из традиционных материалов.

Монография подготовлена на кафедре городского строительства и архитектуры и базовой кафедре ПГУАС при ГИП ООО «Гражданпроект» и предназначена для научных и инженерно-технических работников проектных организаций, а также может быть использовано студентами, обучающихся по направлению 08.03.01 «Строительство».

ISBN 978-5-9282-1122-6

© Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства, 2014

© Разживин В.М., 2014

ПРЕДИСЛОВИЕ

Создание благоприятных условий на рабочих площадках, в образовательных и лечебных учреждениях, местах домашнего отдыха людей является важной социально-экономической задачей не только для архитекторов и дизайнеров, но и для специалистов, работающих в области строительной акустики.

В строящихся и реконструируемых зданиях в настоящее время применяется большое количество облегченных перегородок как из традиционных каменных и легкогобетонных материалов, гипса, так и из листовых металлических, полимерных материалов, стекла. При этом используются различные способы крепления к несущим конструкциям: от полного монолитного соединения до разделения упругими прокладками. Массовое их применение требует более точной оценки звукоизолирующей способности. Существующие методы расчета во многих случаях позволяют производить достаточно точную оценку. В нормативной и справочной литературе предлагаются два графоаналитических метода построения частотной характеристики определенного набора легких и массивных ограждений. Для конструкций, поверхностная плотность которых определяется промежуточными значениями, например $80...100 \text{ кг/м}^2$, частотные характеристики изоляции воздушного шума, полученные этими методами, не совпадают. Что же касается лёгких ограждений, то их номенклатура изделий ограничивается набором из восьми наиболее массовых в строительной практике материалов [55, табл.11]. Так же расчеты не учитывают условия закрепления по контуру. Все это не позволяет во многих случаях эффективно использовать звукоизоляцию, что в известной мере ограничивает проектирование строительных конструкций.

Монография, как научная работа, направлена на повышение эффективности звукоизоляции путем совершенствования проектных решений ограждающих конструкций, внедрения строительного-акустических методов и средств, обеспечивающих защиту от шума и создающих акустическое благополучие в помещениях жилых, общественных и промышленных зданий на селитебной территории городов.

Целью работы является создание инженерного метода расчета изоляции воздушного шума легкими ограждающими конструкциями здания с учетом их закрепления по контуру.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- экспериментально получена зависимость изоляции воздушного шума при упругом и жестком закреплении пластин;
- экспериментально исследована зависимость прохождения звука через прямоугольное соединение конструктивных элементов с упругими вставками;
- предложены и обоснованы расчетные модели изоляции звуковой вибрации стыками строительных конструкций при условии их жесткого и упругого сопряжения;
- предложены и обоснованы расчетные модели звукоизоляции легкими ограждениями с учетом их закрепления;
- получена аналитическая зависимость звукоизоляции легкими ограждениями при условии резонансного режима колебаний с учетом потерь на трение в материале ограждения и излучение.

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Один из методов защиты от шума состоит в устройстве ограждающих конструкций, позволяющий снижать уровень проникающей в помещение звуковой энергии. Падающая волна приводит ограждение в колебательное движение с частотой, равной частоте колебания частиц в падающей волне. Поэтому ограждение становится источником излучения звука в смежное помещение.

Подобная модель в предположении её безграничности была предложена Дж.Рэлеем [45]. В представлении Дж.Рэля конструкция под воздействием звуковой энергии приходит в поршневое колебание, а звукоизоляция при этом определяется величиной поверхностной плотности $m_{\text{п}}$ [кг/м²] и текущей частотой f [Гц] при нормальном падении на плоскость ограждения фронта звуковых волн:

$$R = 10 \lg [1 + (\omega \cdot m_{\text{п}} / 2 \cdot \rho_0 \cdot c_0)] \approx 20 \lg (\omega \cdot m_{\text{п}} / 2 \cdot \rho_0 \cdot c_0). \quad (1.1)$$

Несколько позднее исследования [91] позволили выяснить зависимость угла наклона падающей волны на направление движения прошедшей волны, на основании которой А.Шохом [86] была предложена модель ограждения в виде совокупности масс, каждая из которых может быть представлена колебательной системой с одной степенью свободы. Звукоизоляция с учетом угла падения определяется из выражения:

$$R = 10 \lg [1 + (\omega \cdot m_{\text{п}} \cdot \cos\theta / 2 \cdot \rho_0 \cdot c_0)] \approx 20 \lg (\omega \cdot m_{\text{п}} \cdot \cos\theta / 2 \cdot \rho_0 \cdot c_0). \quad (1.2)$$

В общем виде задачу о прохождении звука через бесконечную пластину монохроматической волной пытался решить Х.Рейснер [85] методами теории упругости. Им было установлено, что при некоторых углах падения звуковой волны на ограждение, последнее становится акустически прозрачным. Величина этих углов определяется зависимостью от толщины пластины и длины звуковой волны. Однако далее этого заключения из полученных результатов выяснить не удалось, так как они оказались сложны для физического истолкования теории и эксперимента.

И только Л.Кремеру [67] удалось на основе теории изгиба тонких пластин выявить некоторые закономерности прохождения звука при нормальном падении на плоскость. Им было открыто явление вол-

нового совпадения, позволившее объяснить поведение изоляции воздушного шума для двух областей частот:

- до частоты волнового совпадения $f_i < f_{гр}$;
- выше частоты волнового совпадения $f_i > f_{гр}$;

по величине граничной частоты волнового совпадения

$$f_{гр} = [c_o^2 \cdot (m_{п} / D)] / 2 \cdot \pi \cdot \sin^2 \theta, \quad (1.3)$$

где $c_o = 340$ м/с – скорость распространения звука в воздухе;

θ – угол падения волны;

$m_{п}$ – поверхностная плотность;

$D = E \cdot h^3 / 12 \cdot (1 - \sigma)^2$ – цилиндрическая жесткость.

В соответствии с теорией Л.Кремера, каждая из этих областей частот отличается собственным механизмом прохождения звука. На частотах $f_i < f_{гр}$ звукоизоляция ограждений управляется «законом массы»:

$$R = 10 \lg [1 + (\omega \cdot m_{п} \cdot \cos \theta)]^2 \cdot (1 - c_{п}^4 \cdot \sin^4 \theta / c_o^4)^{-1} \quad (1.4)$$

или проведя преобразования:

$$R = 20 \lg m_{п} \cdot f - 47,5. \quad (1.4a)$$

А в области выше граничной частоты звукоизоляция определяется массой ограждения, частотой падающего звука, углом падения и коэффициентом потерь на внутреннее трение:

$$R = 20 \lg [\pi \cdot f_{гр} \cdot m_{п} / \rho_o \cdot c_o] + 30 \lg f / f_{гр} + 10 \lg \eta. \quad (1.5)$$

В работе [87] А.Шох обстоятельно проанализировал процесс распространения звука через бесконечную пластину и подтвердил выводы Кремера об условиях волнового совпадения при прохождении звука. Им были установлены границы действия «закона массы» для ограниченных пластин. В частности, нижняя граница может определяться частотой, при которой по короткой стороне исследуемой пластины укладывается 2...3 изгибные волны. Этот размер должен быть больше длины звуковой волны, что является условием неприятия во внимание дифракционных явлений. Верхнюю границу «закона массы» можно принять для диффузно падающего звука равной $1/2 f_{гр}$.

Таким образом, звукоизоляция неограниченных по длине пластин практически не отличается от ограниченных по размеру пластин в пределах «закона массы».

Однако на частотах $f_i > 1/2 f_{гр}$ уже оказывают влияние отраженные от краев свободные изгибные волны. Звукоизлучение в предшествующей граничную частоту области мало и, как показали исследования К.Гёзеле [75] и И.И.Боголепова [5], уменьшение размеров пластин приводит к увеличению излучения звука пластинами, следствием чего является снижение изоляции. Рассмотрение этого вопроса имеет место в работе А.Шоха [88], в которой указывается на то, что интенсивность понижения изоляции на частотах волнового совпадения определяется тем, как близко от них находятся резонансные частоты. Из этого следует то, что для этой области частот изоляция воздушного звука пластинами ограниченного размера меньше, чем при тех же условиях для бесконечных.

В дальнейшем Л.М.Лямшевым [38] были проведены исследования и разработана теория подобно той, которая была развита Кремером, но для случая продольных колебаний пластин. Такого типа волны появляются при поперечных колебаниях сжатия в тонких, ограниченных пластинах при шарнирном опирании по контуру. Лямшевым Л.М. было установлено явление двойного резонанса, которое заключается не только в совпадении частот собственных колебаний, но и форм распределения уровня звукового давления в падающей волне и самой пластине. Таким образом, совпадение указанных условий приводит к интенсивному росту колебаний пластины и резкому снижению её изоляции. Это явление получило название пространственно- частотного резонанса. Теория Л.М.Лямшева получила экспериментальное подтверждение в ходе исследований по распределению энергии колебаний через пластины различных материалов и толщин на ультразвуковой установке. Анализ результатов позволил выявить следующую взаимосвязь: чем тоньше пластина, тем большая часть отраженной или прошедшей энергии вносится изгибными волнами.

Заборовым В.И. [12] на основе теоретических исследований была подтверждена предложенная Л.Кремером [67, 71, 74] модель, уточнялось наличие не двух, а трёх расчетных областей. В первой, соответствующей частотам $f_i \leq 1/3 \dots 1/2 f_{гр}$, поведение конструкции подобно системе несвязанных масс, а изоляция определяется поверхностной плотностью и частотой звука. Скорость распространения изгибных волн в пластине гораздо меньше звуковых волн, а жесткость не оказывает существенного влияния на изоляцию. При дальнейшем увели-

чении частоты скорость изгибных волн возрастает, при этом длина изгибной волны в пластине приближается к длине следа звуковой волны. Эта область вторая, охватывающая диапазон частот до $f_i \leq 2 \cdot f_{гр}$, характеризуется резким спадом звукоизолирующей способности ограждения и возникновением пространственно-частотного резонанса. Граничную частоту определяют при критических углах падения, приближающихся к 90° , когда волна скользит вдоль пластины и наблюдается условие равенства длины изгибной волны $\lambda_{и}$ и проекции падающей звуковой волны λ_o .

Явление пространственно-частотного резонанса при диффузном возбуждении отличает то, что каждая частота определяется соответствующим углом падения.

На участке третьего расчетного диапазона, когда $f_i > 2 \cdot f_{гр}$ звукоизоляция определяется жесткостью и потерями на внутреннее трение в материале пластины конечных размеров, рост изоляции составляет 7,5 дБ/октава:

$$R = 20 \lg [\pi \cdot f_{гр} \cdot m_{п} / \rho_o \cdot c_o] + 25 \lg f / f_{гр} + 10 \lg \eta + 3. \quad (1.6)$$

Учет закрепления по контуру элементов ограждений значительно усложняет решение задачи даже для тонкой пластины, как это показано в работе [12]. Аналогичный расчет и оценка звукоизолирующей способности ограждения были проведены М.Хеклем [78, 79]. Как показали исследования, в области частот ниже граничной отражение свободных волн мало, их вклад в снижение изоляции незначителен. Этот вывод подтверждает теоретические выкладки А.Шоха [89]. Для частот $f_i > f_{гр}$ при жестком опирании исследуемого элемента по контуру им было получено следующее выражение изоляции:

$$R = 20 \lg \pi \cdot f_i \cdot m_{п} / \rho_o \cdot c_o - 20 \lg (q+1 / q) - 10 \lg \pi \cdot f_{гр} \cdot l / 4c_o, \quad (1.7)$$

где q – периметр ограждения;

l – наибольшая сторона ограждения.

Анализируя полученное выражение, следует отметить, что снижение изоляции пропорционально $10 \lg l$, а передача в примыкающие конструкции $20 \lg q$.

Хекль М. предположил, что на частотах выше граничной звукоизоляция определяется размерами ограждающей конструкции, условиями закрепления по контуру, а так же соотношением цилиндрических жесткостей собственно ограждения и примыкающей конструкции.

Однако внесение поправок, которые имеют место в выражение (1.7), не уточняют величины изоляции, так как во многих случаях энергия, уходящая в примыкающие конструкции, оказывается меньше той, которая безвозвратно теряется за счет потерь на внутреннее трение в материале ограждения.

Влияние условий закрепления по контуру на изоляцию перегородок было исследовано Ф. Ингерслевом [29]. Им было сделано предположение об ухудшении изоляции в связи с увеличением жесткости сопряжения перегородки с примыкающей конструкцией.

Большой теоретический и экспериментальный материал позволил отечественному исследователю М.С.Седову [48, 50, 51] разработать теорию «локального совпадения спектров». На основе волновой модели переноса колебательной энергии с минимальными потерями на возбуждение вибрационного поля была решена задача расчета изоляции воздушного шума для тонких ограниченных пластин. Как отмечалось [51], получение максимальной по величине амплитуды отклика на падающую звуковую волну возможно в случае появления резонансных процессов на пластине. То есть, форма собственных колебаний пластины ограниченного размера, а вместе с ней и распределение уровня давления в падающей волне, на резонансных частотах оказывают влияние на формирование спектра излучения, характер проявления которого наблюдается только в своей ограниченной области. Как и у В.И.Заборова [12], таких областей три: простых, неполных и полных пространственных резонансов.

На частотах, лежащих в пределах области простых резонансов, величина звукоизоляции определяется зависимостью:

$$R=10 \lg 5,85 \cdot 10^{-3} \cdot (\mu^2 \cdot f_i \cdot \Delta f \cdot \eta / \check{s}), \quad (1.8)$$

а в диапазоне частот неполных пространственных резонансов

$$R=10 \lg 1,46 \cdot 10^{-3} \cdot (\mu^2 \cdot f_i \cdot \Delta f \cdot \eta / \check{s}), \quad (1.9)$$

где μ – поверхностная плотность ограждения;

Δf – полоса частот, в пределах которой определяются резонансы;

\check{s} – коэффициент излучения.

Если первые две области лежат в пределах $f_i < f_{гр}$, то третья $f_i > f_{гр}$.

Для более полного практического использования полученной теории в работах [49-51] были рассмотрены вопросы изоляции воздушного звука пластинами при диффузном падении на плоскость.

На основании этого подхода был создан инженерный метод расчета. Авторам [53] удалось установить расчетной моделью строгую зависимость между звукоизолирующей способностью и физическими и геометрическими параметрами легких ограждений. Однако в расчете не нашли отражения условия закрепления контура пластин, учет которых привел бы в соответствие расчетную модель с реальной конструкцией.

Теоретические и экспериментальные исследования [5, 12, 30, 52, 75] показали возможность создания расчетных моделей с включением всего набора определяющих ограждения параметров. Но сложный математический аппарат, трудности анализа получаемых решений ограничили их использование в инженерной практике. Кроме того, точность решения определяется точностью исходных данных, которые при современном техническом уровне не всегда возможно точно получить. Эти исследования используют методы волновой теории, которая базируется на представлении конструкции или группы элементов в виде колебательной системы с распределенными параметрами.

В решении задач прикладной механики и акустики широко используется метод сосредоточенных параметров [58], с помощью которого колебательные системы могут быть представлены с некоторыми упрощениями системами элементов с сосредоточенными параметрами с одной степенью свободы. Исследования, проведенные Ритцем не только на основных, но и на высших формах колебаний, показали, что ошибка подхода к решению задач методом сосредоточенных параметров составляет менее 5 %.

В последние годы опубликовано много работ [7, 14, 40, 55, 57, 61], посвященных различным аспектам теории распространения звука, в том числе методам расчета звукоизолирующей способности отдельных групп ограждений: однослойных и многослойных, легких и массивных. Они появились как ответ на несостоятельность использования проектировщиками теоретических методов в качестве универсального приема при оценке изоляции ограждающих конструкций. Такого рода практические методы расчета базируются в основном на теоретических предпосылках, по которым строятся расчетные зависимости, а необходимые коэффициенты уточняются в результате обработки многочисленных экспериментальных данных. Эти расчеты имеют узкую область применения и используются в инженерной практике ввиду сложности математического аппарата и трудоемкости теоретических методов.

Звукоизолирующая способность разделяющих помещения ограждений при проектировании должна назначаться в разумных пределах. Это требование обусловлено действием косвенной (структурной) звукопередачи, интенсивность которой определенным образом связана с конструктивной схемой здания.

Для выяснения этой связи И.Констеблем [64, 65] были проведены натурные исследования на зданиях с кирпичным остовом и бетонными перекрытиями. Полученные им результаты показали, что формирующееся в помещении звуковое поле зависит не только от собственной изоляции разделяющего помещения ограждения, которое стоит на пути прямой передачи звука. Оно не в меньшей мере определяется структурной звукопередачей через примыкающие конструкции. Ф.Ингерслев [29] проанализировал полученные результаты и сделал вывод о том, что однородные или близкие по физико-механическим характеристикам материалов конструкции зданий усиливают влияние структурной составляющей звукового поля исследуемых помещений. Аналогичный вывод был получен К.Гёзеле [75,76] на основе исследования известных экспериментальных данных: в виду того, что при возбуждении легкие однородные элементы зданий обладают высокими уровнями вибрации, они должны обладать большей структурной передачей.

Исследования Э.Мейера, П.Паркина и др. [84] позволили объяснить физическую сущность явления и дать схему путей распространения шума между помещениями. Ими были установлены предельные соотношения между прямой и косвенной составляющими звукового поля в помещениях.

Исследованиями распространения структурного шума по элементам крупнопанельных зданий занимались С.Д.Ковригин [34], А.В.Захаров [20], К.В.Лукьянович [37], В.Н.Никольский и В.И.Заборов [14]. Было установлено, что на низких и средних частотах энергия звуковой вибрации передается в основном изгибными волнами, а её затухание происходит при прохождении через стыки и на пути прохождения носит нелинейный характер.

Теоретические труды в области структурного шума применительно к задачам прикладной акустики были рассмотрены Л.Я.Гутиным [11] и Л.Кремером [67, 69, 71, 73]. Ими были впервые решены задачи, ставшие основой всех последующих работ по развитию теории струк-

турного звука: были определены импедансы к продольным и поперечным силам и изгибающим моментам, исследованы виброизолирующие свойства угловых соединений, влияние на них вставок из упругих материалов и др.

Среди методов расчета звукового поля в помещении с учетом косвенной звукопередачи имеют место два подхода. Предложенный [90, 91] подход имеет в основе статистический энергетический метод; по нему строится расчетная модель здания, которую в общем случае можно представить как совокупность плоских однородных панелей. Энергообмен осуществляется через контур каждого элемента и характеризуется коэффициентом передачи упругих волн в предположении их нормального падения на угловое соединение полубесконечных пластин. Однако такая трактовка распространения вибраций по элементам здания возможна при массе допущений, которые в конечном счете сказываются на достоверности получаемых результатов.

Та же расчетная модель, но в более совершенном с некоторыми упрощениями варианте предложена в работе В.М.Спиридонова [6, 56]. Автор использует аналогию между энергетическим балансом в объеме помещения при распространении воздушного шума и тем же балансом, только ограждающих конструкций при структурной передаче. В таком случае виброизоляция стыков панелей находится в соответствии со звукоизоляцией ограждающих конструкций, уход энергии через линию сопряжения панелей соответствует звукопоглощению на поверхности, а внутреннее трение в материале конструкций – диссипации в воздухе. Предлагаемый в работе [56] метод сводит на нет приток энергии от смежных конструкций, что во многом упрощает схему Вестфаля – это одна сторона реализации метода; с другой стороны схема способствует увеличению расхождения результатов расчетов с экспериментом приблизительно до 5 дБ и выше, что не всегда допустимо для акустических расчетов.

Примером другого подхода могут служить методы, описанные в работах М.Хекля [78, 79], В.И.Заборова [13, 15, 16], С.Ингемансона [81], И.Кащура [63]. Общим для них является то, что фактическая звукоизоляция ограждения определяется с учетом поправки на косвенную передачу звука. В работах М.Хекля [74] и В.И.Заборова [15, 16] для определения коэффициентов передачи предлагаются оригинальные расчетные схемы. Величина коэффициентов звукопередачи рас-

считывается по отношению величин средних квадратических скоростей колебаний жестко сопряженных пластин неограниченных [78] и ограниченных [72] размеров с равными значениями коэффициентов потерь на внутреннее трение. При рассмотрении только изгибных волн эти коэффициенты оказываются независимыми от частоты, а с учетом изгибных и продольных волн эта зависимость прослеживается, но в очень малой степени.

Таким образом, задача о влиянии косвенной звукопередачи на уровень звуковой энергии в помещении может быть решена при условии достаточно точного определения коэффициентов отражения и прохождения упругих волн [8, 68, 70, 72, 82]. При более четкой постановке задачи определение этих коэффициентов составляет отдельную экспериментальную задачу, рассмотрению которой посвящена часть настоящей работы.

К сожалению, сопоставление экспериментальных результатов работ разных авторов по этому вопросу весьма затруднительно ввиду использования в исследованиях различных материалов, методик и экспериментальных установок.

Выводы по первой главе и задачи исследования

Для повышения эффективности звукоизоляции легких ограждающих конструкций необходим учет условий закрепления по контуру, которые могут изменяться в широком диапазоне в зависимости от решения узлов примыкания к основным несущим конструкциям, как жесткого, монолитного, так и упругого типа. Следствие этого – различная интенсивность отражения от краев упругих волн.

Для качественной оценки краевых условий следует рассмотреть резонансный режим колебания конструкций из различных материалов при жестком и упругом закреплении по контуру, так как эти два способа имеют широкое распространение в строительной практике. Необходимо исследование функциональной связи между условиями закрепления пластины и их звукоизоляцией; представление этой зависимости в удобной для инженерных расчетов форме.

Прохождение звуковой энергии через легкие ограждения, а так же распространение звуковой вибрации через стыки элементов конструкций зданий представляют сложные физические процессы, аналитическое выражение которых представляется на основе анализа

широкого круга экспериментальных и теоретических исследований. Поэтому постановка задач настоящего исследования сформулирована в следующей последовательности разделов и содержательной части каждого из них:

- анализ существующих методов расчета изоляции воздушного шума легкими конструкциями, а так же вопросов виброизоляции элементами строительных конструкций;

- экспериментальные исследования изменения вибрационного поля и изоляции воздушного шума легкими ограждениями в зависимости от условий закрепления по контуру;

- экспериментальные исследования распространения энергии звуковой вибрации через соединения конструктивных элементов, включающие упругие прокладки;

- разработка расчетных моделей и выявление аналитической зависимости изоляции воздушного шума легкими ограждениями от их физических и геометрических характеристик, а так же с учетом их закрепления по контуру;

- разработка расчетных моделей и определение величин коэффициентов прохождения и отражения звука для различных соединений элементов строительных конструкций, включающие упругие прокладки;

- разработка практического метода расчета изоляции воздушного шума легкими ограждающими конструкциями здания.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ВОЗДУШНОГО ШУМА ЛЕГКИМИ ОГРАЖДЕНИЯМИ И ЗВУКОВОЙ ВИБРАЦИИ В УГЛОВЫХ СОЕДИНЕНИЯХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СПОСОБА ЗАКРЕПЛЕНИЯ

2.1. Разработка методики исследования звукоизоляции легкими ограждениями

В соответствии с постановкой задачи исследования установление зависимости звукоизоляции легких ограждений от условий опирания по периметру предлагается производить на основе обобщения данных экспериментальных исследований вибрации пластин и звукового поля акустических камер.

2.1.1. Экспериментальная установка.

Исследование звукоизолирующей способности легких ограждений в натуральных условиях требует специальных дорогостоящих сооружений и оборудования, а проведение измерений непосредственно в отстроенных домах очень сложны ввиду того, что вибрационное поле зависит от многих факторов, влияние каждого из которых точно определить не представляется возможным. Поэтому целесообразно использование малых акустических камер, в которых достигается достаточно точное соблюдение реальных условий закрепления и использование большего числа экспериментальных образцов.

С целью проведения акустических исследований в лаборатории строительной акустики Пензенского государственного университета архитектуры и строительства была построена камера объемом 3,8 м³. Установка представляет в плане неправильный многоугольник, стенки которого выполнены из двух слоёв – наружного и внутреннего из профилированных асбестоцементных листов, заполненных изнутри бетоном марки 200. Основанием для камеры служит железобетонная плита толщиной 50 мм, которая опирается через резиновые амортизаторы на панель перекрытия. Камера разделена на два объема 1,5 и 2,3 м³ перегородкой той же конструкции, что и наружные стенки. Каждый объем имеет боковые проемы 0,5×0,5 м для установки микрофона, которые в рабочем положении закрываются дверцами из двухслойной

древесно-стружечной плиты, а по периметру плотно прижимаются винтами.

Для установки исследуемых образцов обе камеры имеют горизонтальные проемы $0,5 \times 0,74 \text{ м}^2$, обрамленных металлическими уголками, которые жестко заделаны в верхнюю плиту перекрытия камеры.

Каждая из этих камер может быть использована в качестве камеры низкого уровня (далее КНУ). Для исследования изоляции воздушного шума камера высокого уровня (КВУ) устанавливается на верхнюю плиту КНУ-1. Она представляет объем неправильной формы – $1,6 \text{ м}^3$, выполненный из листов древесно-стружечной плиты. Для повышения изоляции КВУ опирается на верхнюю плиту КНУ-1 через поролон толщиной 25 мм, а отверстия для ввода проводов к динамикам и микрофонам промазывались нетвердеющим герметиком.

Для моделирования условий опирания пластины укладывались

– при упругом опирании на прокладки из пористой резины марки ИР-22 сечением $15 \times 10 \text{ мм}^2$;

– при жестком закреплении на пластичный раствор гипса толщиной 15 мм.

Для создания условий хорошего отражения звуковой энергии стенки в камерах были окрашены масляной краской, а длина волны асбестоцементных листов была равна 21 см. Частотная характеристика собственной изоляции КНУ-1 при заполнении монтажного проема железобетонной плитой $0,5 \times 0,74 \text{ м}^2$ с тщательной промазкой всех неплотностей по периметру гипсовым раствором, представлена на рис.2.4.

Экспериментальные исследования проводились с помощью

отечественной аппаратуры и фирмы RFT (рис.2.1). Для измерения звукоизоляции использовалась методика [9]. В состав передающего тракта входили следующие приборы: генератор белого шума Г2-12, частотомер ЧЗ-35А, акустические колонки 25АС-311 «Эстония» с набором динамических головок 25ГД-26В, 15ГД-11А, 3ГД-31. Приемный тракт состоял из следующих приборов: конденсаторные микрофоны МК-102 с усилителями МУ-102, переходники цепи РС типа 009, датчики вибрации КД-12, КД-13, шумомеры импульсные типа 00017, самописец электрических сигналов Н-111. Суммарная мощность излучателей составила 50 Вт, что позволило обеспечить достаточный уровень звукового давления в КНУ, а расстановка акустических головок в камере высокого уровня – диффузность звукового поля на средних и

высоких частотах. Так как параметры исследуемых пластин соответствовали натурным размерам, то и система излучателей воспроизводила частотный диапазон от 20 до 20000 Гц.

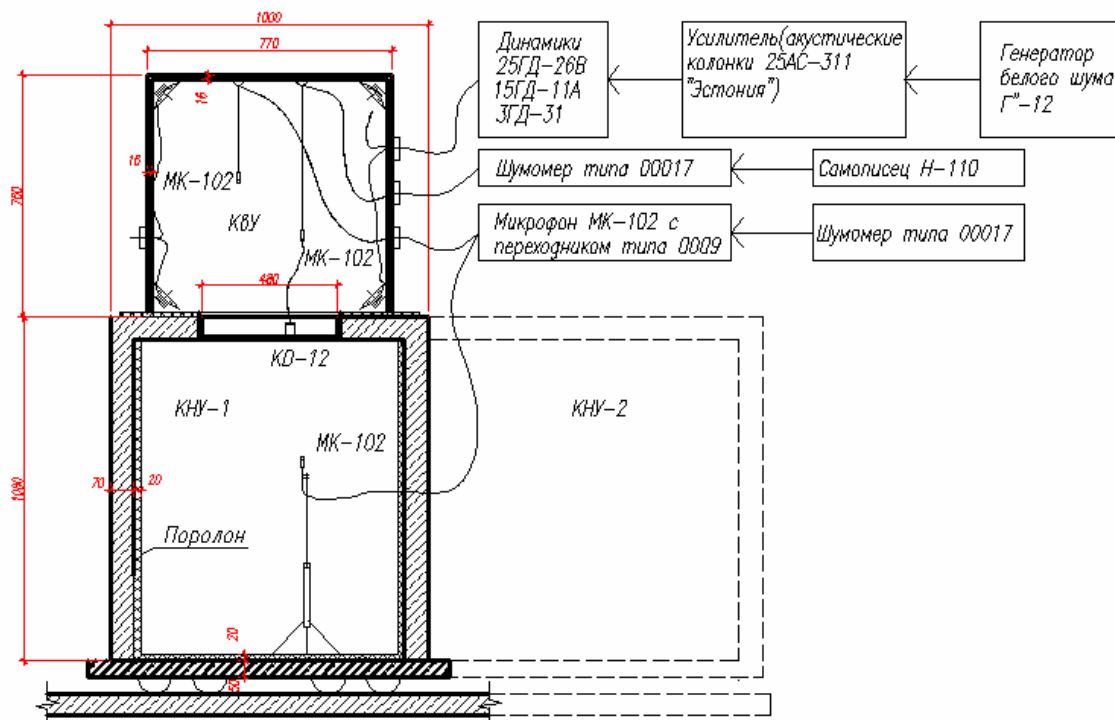


Рис.2.1. Принципиальная схема экспериментальной установки

Постоянство уровня звукового давления в КВУ проверялось на протяжении каждого цикла измерений контрольным шумомером типа 00017 в одной фиксированной точке.

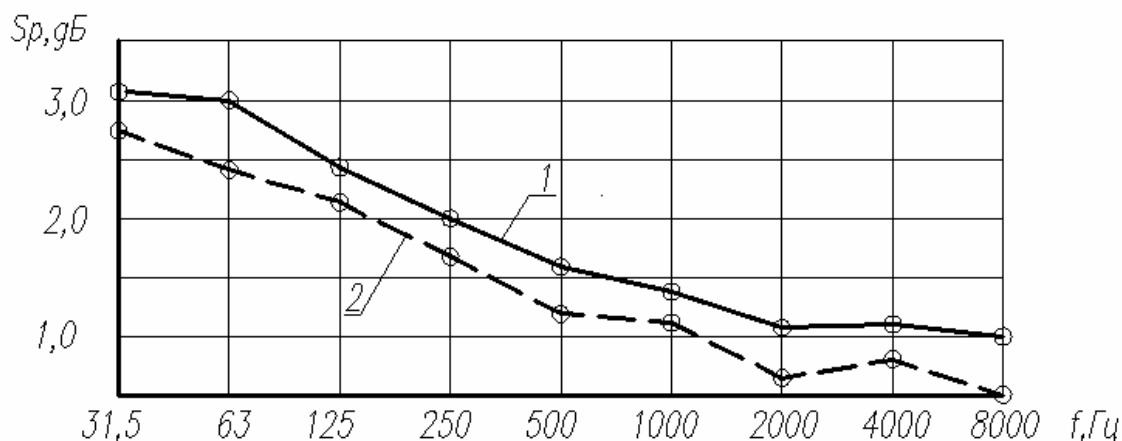


Рис.2.2. Оценка диффузности звуковых полей:
1 – камера высокого уровня; 2 – камера низкого уровня

Объем камер КВУ и КНУ-1 обеспечивают диффузность звукового поля, согласно формулам ISO [80], начиная с 500 Гц:

$$f_{\text{гр}}^{\text{дифф}} = 125 \cdot (180/V). \quad (2.1)$$

Сканируя частотой тонального генератора, нетрудно заметить резкие изменения звукового давления в камерах на частотах $f < f_{\text{гр}}^{\text{дифф}}$. В первую очередь это относится к приемной камере. В этом диапазоне частот собственные колебания пластин не оказывают существенного влияния на подобные изменения, которые в большей мере определяются резонансами на частотах собственных колебаний измерительных объемов:

для КВУ это частоты – 103; 172; 207; 235; 381 Гц;

для КНУ – 94; 115; 137; 174; 263; 309 Гц.

Для определения уровней звукового давления на частотах, лежащих ниже граничной диффузности, необходимо было определить точки замеров. Исследования, проведенные [36,59] показали, что эти точки должны быть расположены на расстоянии не менее 0,25 длины волны от стенок камеры и 0,7 – от углов, так как за пределами получаемого таким образом объема возникают интерференционные явления, следствием которых является неоднородность звукового поля. Зона измерений показана на рис.2.6. Для получения более точных результатов на частотах ниже $f_{\text{гр}}^{\text{дифф}}$ были проведены исследования этой зоны, которые позволили выявить точки с минимальными значениями уровня звукового давления. Эти точки были исключены из числа контрольных, т.е. тех 9-ти фиксированных точек (рис. 2.6), по которым анализировалось звуковое поле КНУ.

Оценка диффузности в камерах производилась на основе величины среднего квадратического отклонения пространственного распределения уровней звукового давления S_p :

$$S_p = [\sum_{i=1}^n (L_i - \bar{L})^2 / n - 1]^{0.5}, \quad (2.2)$$

где $\bar{L} = 1/n \cdot (\sum_{i=1}^n L_i)$ – среднеарифметическая величина уровней звукового давления L_i , измеренного в n точках объема камеры.

Для камер КВУ и КНУ значения L_i определялись в 18 точках. Частотная характеристика степени диффузности звукового поля камер по величине среднего квадратического отклонения S_p представлена на

рис.2.2. Поле считается диффузным, если среднее квадратическое отклонение уровней звука не превышает 2 дБ. Как видно из графиков, поле можно считать диффузным с частоты 500 Гц; приблизительная такая же величина получается расчетом по формуле (2.1):

- для КВУ $f_{гр}^{дифф} = 603,4$ Гц;
- для КНУ $f_{гр}^{дифф} = 616,5$ Гц.

Частотная характеристика времени реверберации в КВУ показано на рис. 2.3. Процесс реверберации записывался на ленту самописца в 5-ти точках камеры, а затем усреднялся.

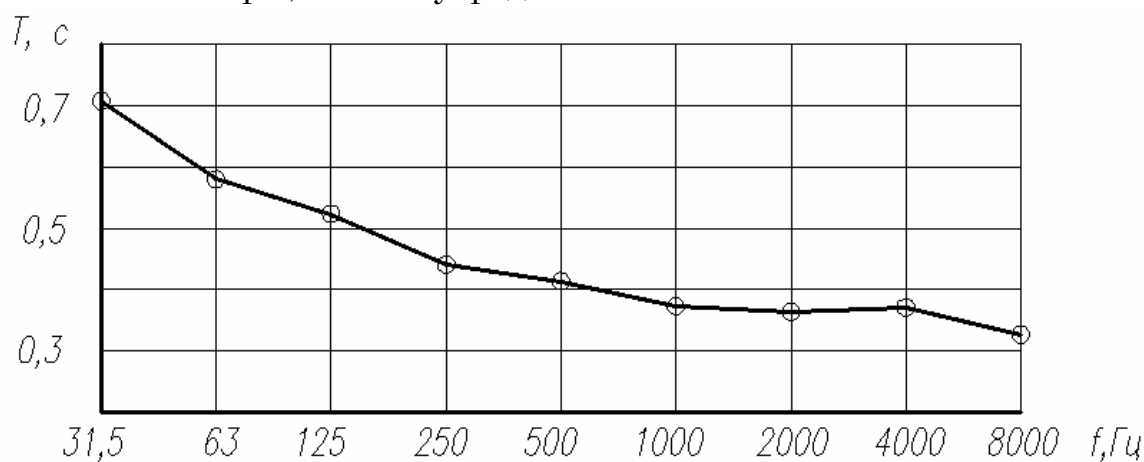


Рис.2.3. Частотная характеристика времени реверберации в камере низкого уровня (КНУ-1)

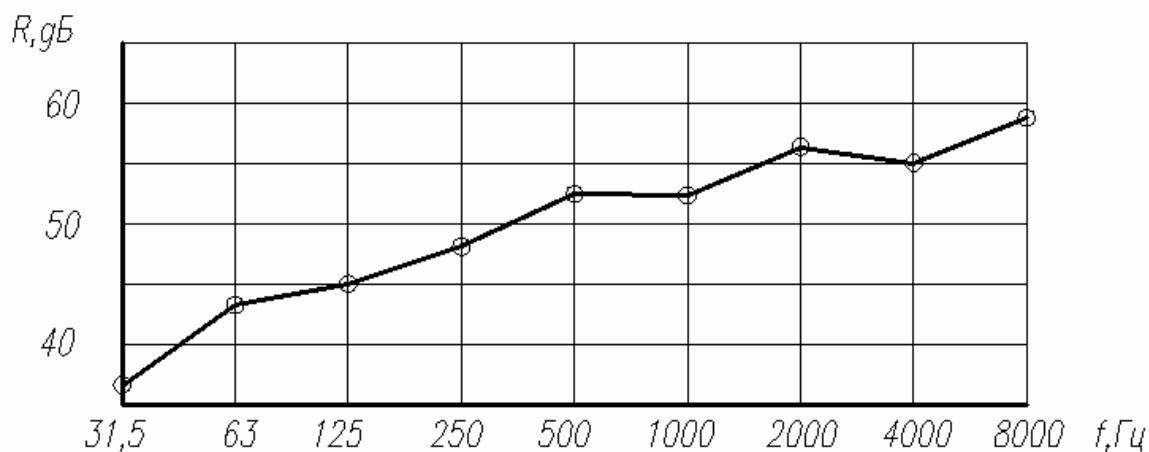


Рис.2.4. Частотная характеристика собственной изоляции между камерами высокого и низкого уровня (КВУ – КНУ-1)

2.1.2. Методика измерений

Исследования изоляции воздушного шума образцов конструкций производились в соответствии с ГОСТ [9] и рекомендациями [80], а также [3, 33, 43]. В качестве объектов исследования рассматривались пластины из стали, стекла и асбестоцемента при двух условиях закрепления по контуру. Характеристики исследуемых материалов представлены в табл.2.1.

Таблица 2.1

Физико-механические характеристики материалов						
Наименование	ρ , кг/м ³	E , н/м ²	a , м	b , м	h , м	η
1	2	3	4	5	6	7
Сталь ГОСТ 16523-70	7850	$2,14 \cdot 10^{11}$	0,74	0,472	0,0021	0,001
Стекло ОСТ 3413885-79	2500	$6,21 \cdot 10^{10}$	0,737	0,478	0,0071	0,002
Асбестоцемент ГОСТ18124-75	2310	$2,38 \cdot 10^{10}$	0,737	0,472	0,0091	0,002
Резина ИР-22	1250	$2,76 \cdot 10^6$	0,74	0,01	0,0015	0,09

Таблица 2.2

Динамические характеристики резины ИР-22							
Частота, Гц	63	125	250	500	1000	2000	4000
$E_d \cdot 10^5$, н/м ²	56	60	64	70	81	97	105
η	0,1	0,12	0,13	0,15	0,2	0,3	0,32

На первом этапе экспериментальных исследований производились измерения при жестком опирании пластин по контуру монтажного проема, которое выполнялось на гипсовом растворе толщиной 15мм. Для исключения появления трещин пластины после установке в проеме пригружались, а после затвердения раствора производилась дополнительная обмазка шва раствором. Микрофоны в камере КВУ прикреплялись на подвеске к потолку в 9-ти фиксированных точках; в камере КНУ микрофоны устанавливались на штативе.

Измерение вибрации производилось согласно единой для всех трёх пластин схеме (рис.2.5) одновременно с измерениями уровней звукового давления в КВУ и КНУ. Аналогичная методика была использована и на втором этапе эксперимента при закреплении краев пластин на упругих прокладках из резины.

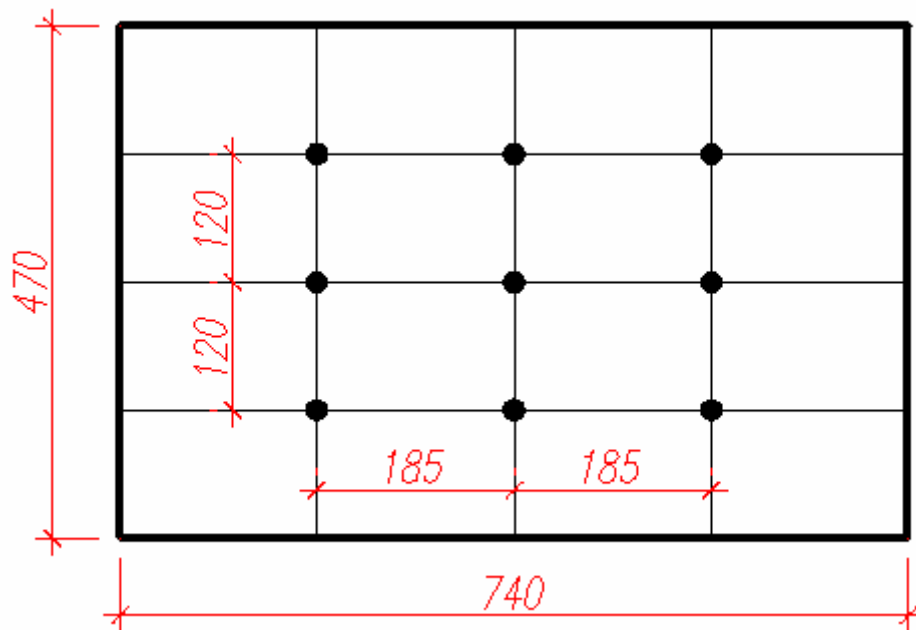


Рис.2.5. Размещение датчиков вибрации КД-12 на исследуемых пластинах

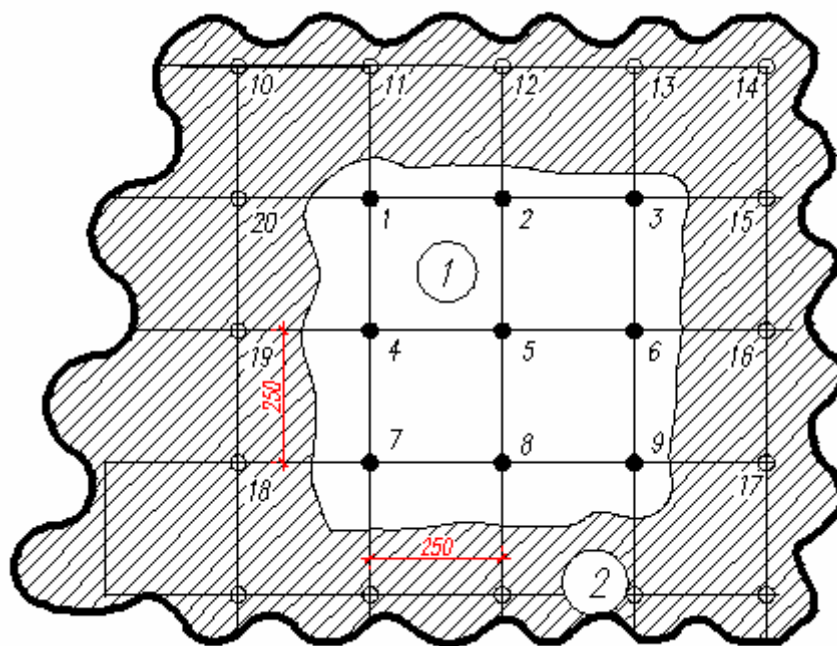


Рис.2.6. Схема расположения точек проведения замеров уровня звукового давления в камере низкого уровня:
1 – зона проведения замеров; 2 – зона неудовлетворительной диффузности

Для исключения неплотностей прокладки, исследуемых пластин и обрамления монтажного проема тщательно зачищались, обезжиривались и склеивались в пригруженном состоянии клеем «Момент».

Величина изоляции воздушного шума пластинами определялась в соответствии с [9] по формуле

$$R = L_1 - L_2 + 10 \lg(S/A), \quad (2.3)$$

где L_1 – уровень звукового давления в КВУ, дБ;
 L_2 – уровень звукового давления в КНУ, дБ;
 S – площадь исследуемого ограждения, м²;
 A – эквивалентная площадь звукопоглощения,

$$A = 0,163 \cdot V/T;$$

здесь V – объем измерительной камеры, м³;

T – время реверберации, с.

2.1.3. Обобщение результатов экспериментальных исследований.

Снижение уровня звукового давления при прохождении звуковой волны через ограждение связаны с потерями энергии, в частности на формирование вибрационного поля. Ранее уже отмечалось, что энергия при этом частично уходит в примыкающие конструкции, а частично запирается в пределах площади ограждения и уменьшается за счет трения в материале ограждения и излучения.

При жестком опирании краев (график «б», рис.2.8) вибрационное поле формируется решеткой узловых линий бегущих изгибных волн, наложение которых создает одну из форм колебаний. В первой октаве уровень вибрации минимален, а начиная со второй октавы растет со скоростью 10 дБ/ок., что связано с простыми резонансами на пластине:

$$f_p = (n \cdot C_{из}) / 2 \cdot l, \quad (2.4)$$

где $C_{из}$ – скорость распространения изгибной волны, м/с;

l – размер короткой стороны ограждения, м.

Минимальное значение скорости колебаний $L_{ог}$, дБ, наблюдается в пределах октавных полос частот, которые содержат граничную частоту $f_{гр}$:

$$f_{гр} = C_o^2 / 1,8 \cdot C_{п} \cdot h, \quad (2.5)$$

где C_o – скорость распространения звуковой волны в воздухе, м/с;

$C_{п}$ – скорость распространения продольной волны в ограждении, м/с;

h – толщина ограждения, м,

т.е. когда наблюдается совпадение следа падающей звуковой волны и изгибной волны в пластине. На частотах, лежащих выше $f_{гр}$ происходит

спад уровня вибрации, что связано с наложением части изгибных волн в перпендикулярных плоскостях и их взаимном гашении.

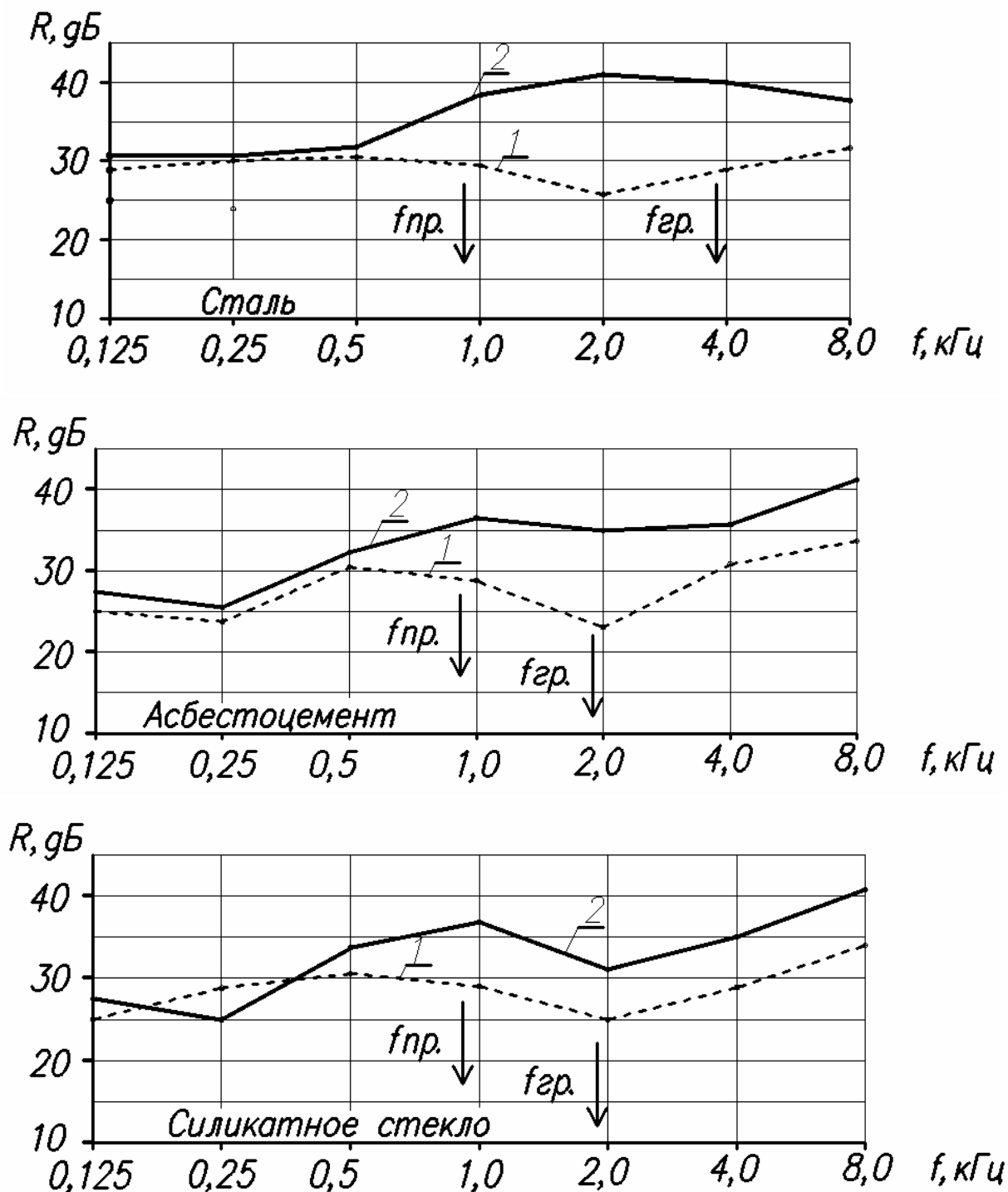


Рис.2.7. Изоляция воздушного шума пластинами:
 1 – при упругом закреплении краев (резиновые прокладки);
 2 – при жестком закреплении (на гипсовый раствор)

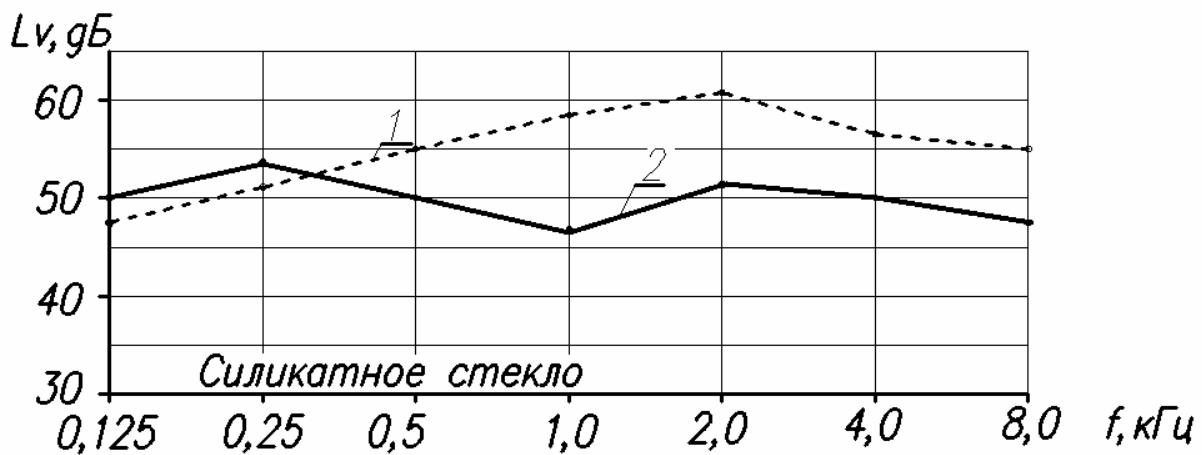
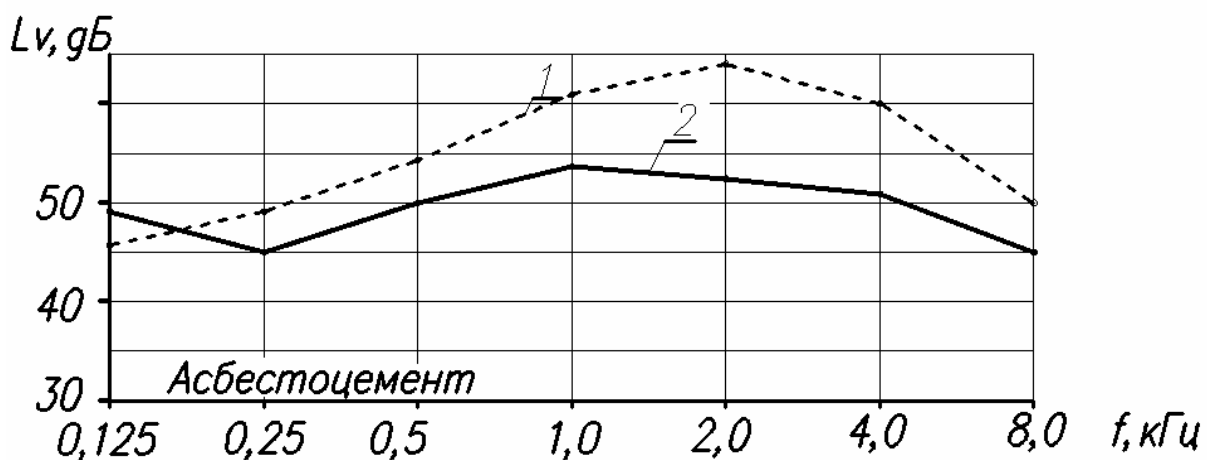
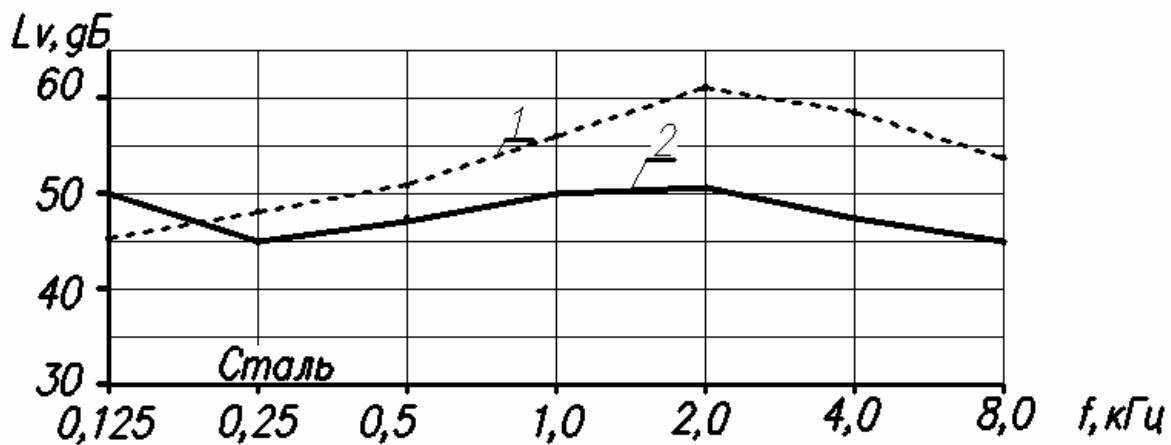


Рис.2.8. Уровни колебательных скоростей на пластинах:
 1 – при упругом закреплении краев (резиновые прокладки);
 2 – при жестком закреплении (на гипсовый раствор)

На рис.2.8 показан график виброскорости L_v , дБ при упругом опирании пластин (график «а»). Начиная со второй октавной полосы рост скорости колебаний, совершаемых ограждением, составит 4 дБ/ок., а

после появления волнового движения в упругой прокладке ($f_{гр}=500$ Гц) наблюдается резкий скачок виброскорости – до 10 дБ/ок.

На рис.2.7 представлены графики звукоизоляции пластин. При опирании на упругие прокладки изоляция имеет ровный характер на средних и высоких частотах. Имеющие место выбросы в пределах первой октавной полосы обусловлены резонансными явлениями в камере КНУ и слабой диффузностью звукового поля. При жестком закреплении краев наблюдается рост изоляции по закону массы на частотах $f_i < f_{гр}$, а после снижения на пространственном резонансе растет в среднем 6 дБ/ок.

Обобщение результатов экспериментальных исследований и анализ основных факторов, снижающих изоляцию воздушного шума, изложены в работе [27].

Анализ результатов исследований по оценке звукоизолирующей способности легких ограждений будет приведен в третьем разделе работы.

2.2. Разработка методики экспериментальных исследований распространения упругих колебаний через угловой стык стержневой системы

В разделе рассматриваются вопросы выбора экспериментальной установки, приборного парка и методики исследования распространения изгибных и продольных волн через жесткое и с упругой вставкой угловое соединение стержней, имеющих одинаковые и разные попарно сечения.

2.2.1. Выбор параметров экспериментальной установки

Для проведения исследования распространения упругих колебаний по элементам строительных конструкций и изучения вопроса о влиянии упругих прокладок на изоляцию изгибных и продольных волн при прохождении ими углового соединения была выбрана модель установки, представленная на рис. 2.9.

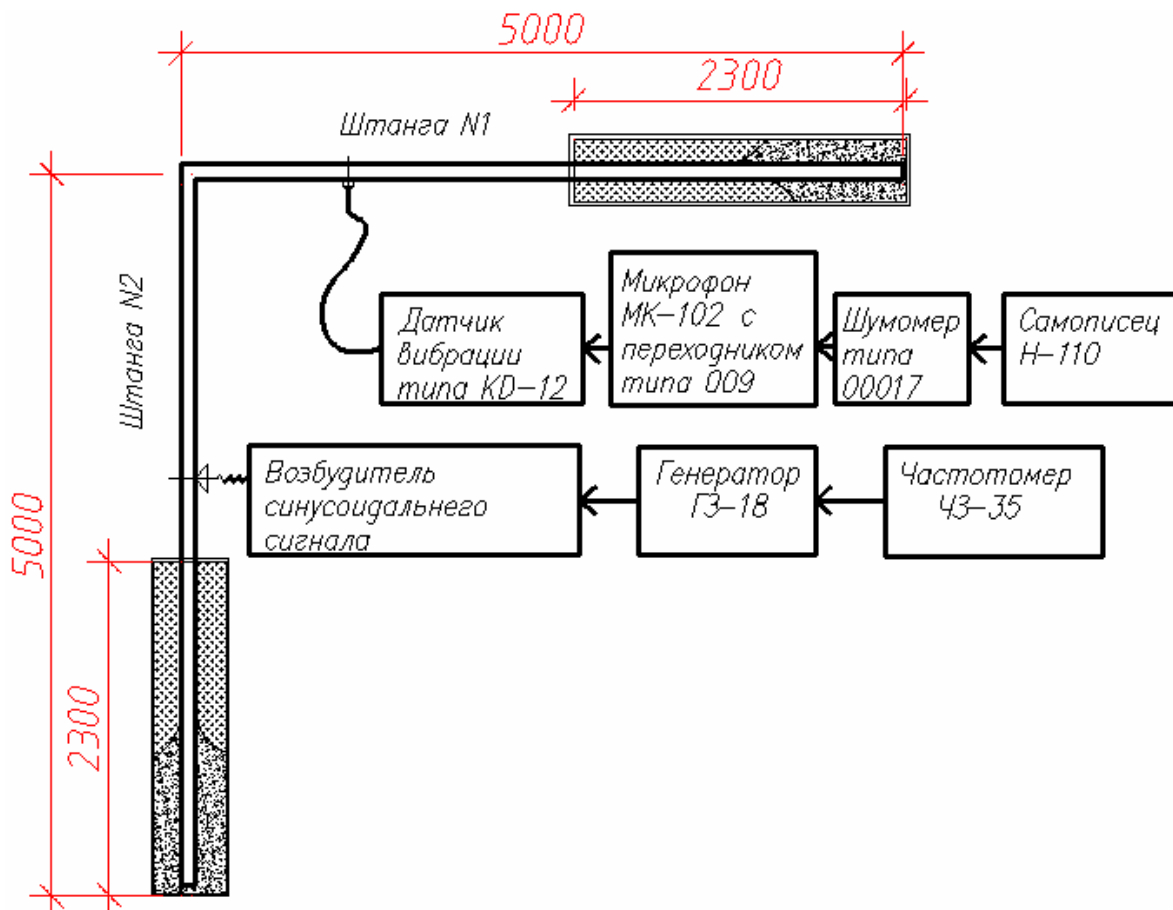


Рис.2.9. Принципиальная схема экспериментальной установки

Такая конструкция позволяет в лабораторных условиях получать с достаточной степенью точности искомые результаты, уменьшив до минимума влияние тех факторов, учет которых в натуральных условиях не представляется возможным.

Материалом для изготовления штанг явилось органическое стекло, имеющее изотропную структуру, относительно малый модуль упругости. Геометрические размеры штанг назначались из условий границ рабочего диапазона частот измерительной аппаратуры: длина определялась длиной изгибной волны на низких частотах в соответствии с соотношением

$$l_{\text{свободная}} \geq 4 \cdot \lambda_{\text{и}} \text{ для частоты } 125 \text{ Гц,}$$

а со стороны высоких частот $f = 4000 \text{ Гц}$, так как ограничением является условие элементарной теории изгибных волн:

$$\lambda_{\text{и}} \geq 6 \cdot h$$

где $\lambda_{\text{и}}$ – длина изгибной волны.

Т а б л и ц а 2.3

Физико-механические характеристики оргстекла штанг

Параметр	Обозначение	Численное выражение
Объемная масса	ρ	1200 кг/м ³
Модуль упругости	E	59,2·10 ⁸ н/м ²
Коэффициент Пуассона	σ	0,34
Коэффициент внутренних потерь	η	0,067ч 0,08
Скорость продольных волн	C_{II}	2200 м/с

Для отработки методики эксперимента было изготовлено угловое соединение двух штанг, каждая из которых имела длину 5 м, ширину 0,06 м, толщину 0,018 м. Жесткость прямоугольного стыка элементов стержневой системы обеспечивалась склеиванием фрезерованных концов соединения специальным клеем УДО-3. Шов обеспечивал однородность конструкции, а прочность на сдвиг была исследована на пяти образцах и составила в среднем $9,6 \cdot 10^6$ н/м². Для исследования упругого соединения использовалась резина марки ИР-22 толщиной 0,005 и 0,0025 м.

Штанги раскреплялись в горизонтальной плоскости в 3-х точках на стальной проволоке длиной 2 м. Система подвесок была выбрана из условия максимальной прочности, минимального их количества по длине штанг, что обеспечивало малый прогиб в пролете между точками подвеса и, в конечном счете, горизонтальность всей системы штанг (рис.2.9).

Регулировка натяжения в подвесках осуществлялось струбцинами, которые соединялись с неподвижной массивной рамой. Для контроля прямого угла соединения и горизонтальности плоскости обеих штанг использовался теодолит ТТ-50.

Частота собственных колебаний стержневой системы определялась как для физического маятника в свободно – подвешенном состоянии по формуле

$$f_o = (1/2\pi) \cdot [m \cdot g \cdot l / I]^{0.5} = 0,35 \text{ Гц.}$$

Таким образом, частота собственных колебаний системы на подвесках не оказывает влияние на результат эксперимента.

Определялось влияние подвесок на величину затухания колебаний упругой волны в штангах. С этой целью производилось измерение времени реверберации для одной из штанг в свободно подвешенном состоянии при расстановке 5-ти подвесок через 1 п.м. длины штанги и 3-х – через 1,65 п.м. Время реверберации для первого варианта составило $T^0 = 1,2$ с; для второго варианта $T^0 = 1,25$ с. Измерения показали, что разность времени реверберации находится в пределах 4 %, так что влиянием подвесок на колебательный процесс в штангах можно пренебречь.

2.2.2. Измерительная аппаратура

Излучающий (передающий) тракт включал следующие приборы:

– тональный генератор ГЗ-18, миллиамперметр, контактный возбудитель изгибных колебаний.

Приёмный тракт состоял из следующих приборов:

– датчик ускорения КД-12(13), переходник интегрирующей цепи типа 009, импульсный шумомер тип 00017.

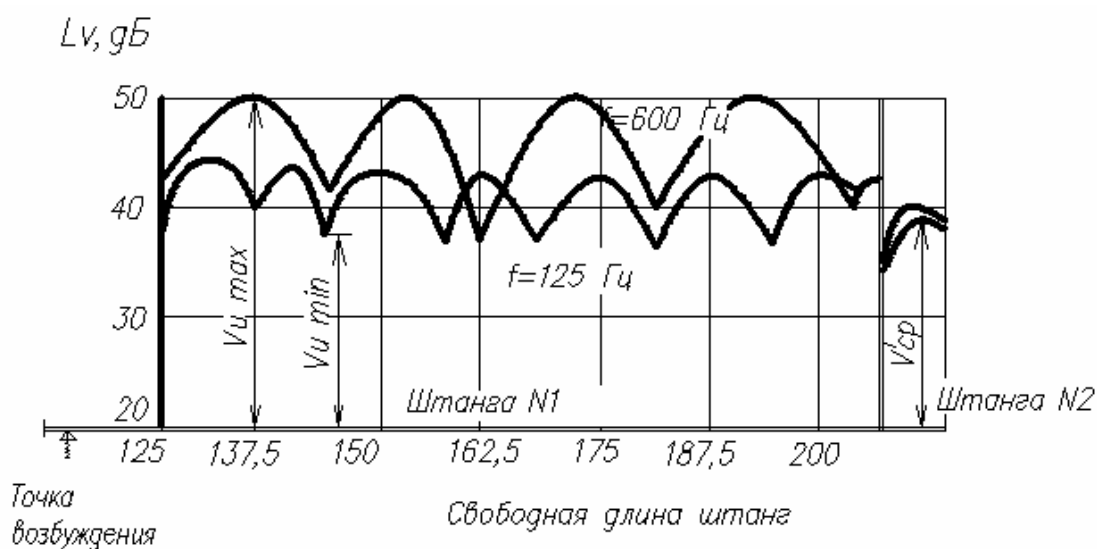


Рис.2.10. Распределение уровня колебаний на штангах

Возбуждение звуковой вибрации в штангах производилось генератором синусоидальных сигналов ГЗ-18 посредством возбудителя колебаний. Генератор воздействует на колебательную систему простой

гармонической силой, обеспечивая широкий диапазон частот. Для обеспечения точности измерений, на выходе генератора подключались частотомер ЧЗ-35 А и миллиамперметр. Последний обеспечивает контроль сигналов заданной силы на контактный возбудитель колебаний, который точно соединялся со штангой посредством специального стержня с целью исключения искажения или задержки самим источником вибрации отраженных от углового стыка волн.

Т а б л и ц а 2 . 4

Время реверберации(с) штанг				
стык	в свободном состоянии		в задемпфированном состоянии	
	жесткий	с прокладкой	жесткий	с прокладкой
$h_1 = h_2$	0,53	0,43	0,05	0,047
$h_1 < h_2$	1,12	0,9	0,059	0,06

Для обеспечения возбуждения в штанге №1 (см. рис.2.9) только изгибных волн по центральной оси штанги нарезались отверстия, обеспечивающие жесткую, строго перпендикулярную к оси установку стержня в передающем звене: электродинамический возбудитель – штанга, а так же крепление датчика вибрации, который соединялся переходником типа 009 и микрофоном МК-101 с шумомером типа 00017.

При проведении исследований использовались датчики вибрации-аксельрометры, которые воспринимают вибрацию и генерируют выходные напряжения, пропорциональные ускорению и квадрату частоты. В специальном интегрирующем устройстве происходит модификация полученных сигналов в сигналы, пропорциональные скорости перемещения при соответствующей частотной зависимости. Это позволяет получать с аксельрометра непосредственную информацию о скорости перемещения штанг при распространении по ним упругих волн. Метод обработки сигналов с датчиков вибрации аналогичен обработке сигналов с датчиков – микрофонов при измерении звукового давления.

2.2.3. Предварительное исследование колебательной системы штанг при угловом соединении

В целях получения неискаженной интерференционной картины на штангах необходимо получить частоты собственных колебаний диффузора электродинамического возбудителя и системы штанг. При подаче электрического сигнала генератора (см. рис.2.9), подвижная катушка прибора приходит в колебания, которые распространяются от края диффузора со скоростью, равной скорости распространения звука в материале диффузора. В случае, если по образующей диффузора укладывается половина длины волны или кратная ей величина, то последний начинает интенсивно колебаться, то есть происходит явление резонанса. При этом синусоидальный сигнал подается с большим искажением, что не желательно при проведении эксперимента. Эти частоты измерены и приводятся в табл. 2.5.

Т а б л и ц а 2 . 5

Таблица резонансных частот	
На диффузоре возбудителя колебаний	На штангах
50; 137; 193; 330; 399; 436; 487; 559; 726; 760; 780; 854; 1492; 1782; 2026; 2538; 3253; 3517.	46; 54; 100; 123; 198; 277; 369; 380; 450; 536; 640; 735; 841; 995; 1000; 1162; 1360; 1492; 2030; 2556; 4000.

Один из методов нахождения частот собственных колебаний системы и конфигурации её частей для соответствующих нормальных мод состоит в том, что на систему воздействуют гармонической силой через тональный генератор с плавно изменяющейся частотой. Полученные при этом максимальные отклонения свидетельствуют о резонансных частотах, которые и будут частотами собственных колебаний. Приведенные в табл.2.5 частоты исключались из рассмотрения при проведении эксперимента.

Для получения достоверных экспериментальных результатов в исследуемой системе необходимо создать режим бегущей волны. Создание такого режима сводится к тому, чтобы сократить до минимума отражения от краев, то есть исключить возможность возникновения стоячих волн. С этой целью концы штанг погружались в демпфирующую среду, глубина погружения в которую определялась из соотношения:

$$l_k \geq (2,5 \div 3) \cdot \lambda_n,$$

где λ_n – наибольшая длина изгибной волны в рабочем диапазоне частот.

Для лучшего механического сцепления с демпфирующей средой концы штанг заострялись на длину 1 м, а гладкая поверхность штанг оклеивалась грубой наждачной бумагой. Концы штанг заводились в желоба, наполненные смесью древесных опилок на глубину 1,2 м, а затем переходящей клинообразно через смесь опилок и песка в чистый песок (1/4 длины желоба). Длина непогруженных в демпфирующую среду штанг составила 2,7 м, что соответствует нижней границе исследуемого диапазона частот. Указанные выше параметры экспериментальной установки были получены эмпирически и соответствовали оптимальному варианту. Время реверберации при этом было сокращено почти в 10 раз, что свидетельствовало о малом отражении от краев изгибных волн, влиянием которого на результаты эксперимента можно пренебречь (табл. 2.4).

2.2.4. Методика измерений

Исследование распространения упругих колебаний стержневой системы проводилось по методике [19, 60, 83] и приведено в табл. 2.6.

Т а б л и ц а 2.6

№ этапа	Переход упругих волн	Тип соединения	Параметры системы			
			Штанга №1		Штанга №2	
	<i>Шт.№1 Шт.№2</i>		<i>b, м</i>	<i>h, м</i>	<i>b, м</i>	<i>h, м</i>
1	равные штанги	жесткое	0,06	0,018	0,06	0,018
2	равные штанги	упругое	0,06	0,018	0,06	0,018
3	тонкая-толстая	жесткое	0,03	0,01	0,06	0,018
4	тонкая-толстая	упругое	0,03	0,01	0,06	0,018
5	толстая-тонкая	жесткое	0,06	0,018	0,03	0,01
6	толстая-тонкая	упругое	0,06	0,018	0,03	0,01

На всех этапах измерений точки возбуждения колебательной системы оставались постоянными. Для получения интерференционной

картины колебаний использовались данные измерения виброскорости, считываемых с шумомера типа 00017; измерительный прибор соединялся через переходник типа 009 с датчиком колебаний КД-12(13), крепление которого к штанге осуществлялось посредством винта, плотно закрученного в тело штанги на глубину 0,7 см в строго перпендикулярной плоскости к продольной оси.

В общем случае возбуждение в штанге №1 (см. рис.2.9) плоской изгибной волны вызовет образование отраженной (бегущей и ближней) изгибной и продольной волн, а в штанге №2 прошедшей (бегущей и ближней) изгибной и продольной волн. Вследствие наложения падающей и отраженной изгибных волн в штанге №1 образуется стоячая волна, характеризующаяся неподвижными точками – узлами и точками с максимальной амплитудой скорости колебаний- пучностями. Процесс измерения сводится к отысканию в них точек с амплитудой скорости колебаний V_{\max} и V_{\min} . Для более точного определения этих величин измерения на штанге производились через 2 см за исключением зон, приближающихся к точке возбуждения и угловому соединению, в виду того, что в этих секторах интерференционная картина сильно искажается ближним полем. Это расстояние приближенно определяется как $l=(\lambda_{и} /3 \div \lambda_{и} /2)$ от препятствия. Прошедшая через угловое соединение изгибная волна благодаря хорошему демпфированию не возвращается, а поэтому на штанге №2 имеет место бегущая волна, как следствие прохождения через упругую среду со снижением энергии колебаний за счет потерь на внутреннее трение в материале штанги (рис. 2.10).

Расчетные выражения для определения коэффициентов отражения и прохождения изгибных и продольных волн были получены следующим образом. Если принять за выражение A амплитуду падающей изгибной волны, а за выражение B амплитуду отраженной от угла изгибной волны, тогда максимальная скорость колебаний на этой штанге может быть определена как $V_{и \max} = A + B$, а минимальная $V_{и \min} = A - B$. Исходя из полученных значений, имеем численное значение выражения:

$$A = S \cdot (V_{и \max} + V_{и \min}); B = S \cdot (V_{и \max} - V_{и \min}).$$

Тогда коэффициент прохождения энергии изгибных волн может быть получен из выражения:

$$\tau_{и} = \mu_2 / \mu_1 \cdot (C^2 / A^2) = \mu_2 / \mu_1 \cdot [2 \cdot V_{и}^1 / (V_{и \max} + V_{и \min})], \quad (2.6)$$

где $C = V_{и}^1$ – скорость колебаний при изгибной волне 2-й штанги;

μ_1 и μ_2 – соответственно приведенные массы первой и второй штанг при изгибной волне (формула (3.2)).

Коэффициент отражения скорости колебаний (по энергии) может быть получен из соотношения квадратов амплитуды скоростей колебаний в отраженной и прошедшей волнах:

$$r_{и} = (B / A) \cdot (\mu_1 / \mu_2) = [(V_{и\max} - V_{и\min}) / (V_{и\max} + V_{и\min})]. \quad (2.7)$$

При замерах скорости колебаний в штангах от продольной волны использовалось специальное приспособление, позволяющее устанавливать датчик в строго параллельной относительно центральной продольной оси штанги плоскости. Оно выполнено из алюминиевого сплава и представляет полый цилиндр, который имеет резьбовое отверстие в одном из торцов для крепления датчика посредством винта, и на образующей цилиндра – для крепления ко второму винту. Этот винт заворачивается в имеющиеся на штанге отверстия вдоль центральной оси. Тонкие риски на образующей цилиндра позволяют точно устанавливать датчик в рабочее положение.

Однако следует отметить то обстоятельство, что ввиду большой длины волны, а так же потерь энергии при трансформации продольных волн в изгибные и обратно, интерференционная картина распространения продольных волн получилась недостаточно четкой на низких частотах; более точные результаты – на средних и высоких частотах.

Расчетные выражения для коэффициентов отражения и прохождения энергии продольных волн были получены по методу Л.Кремера [72, 73]. Интенсивность продольных волн в штангах зависит от плотности материала, модуля упругости и толщины и для углового соединения выражается из соотношения импедансов для продольной волны на 1-й штанге и изгибной волны (трансформированной продольной волны 1-й штанги) для 2-й штанги с учетом погрешности на низких частотах в следующем виде:

$$m_1 \cdot C_{и} \cdot D = m_2 \cdot C_{п} \cdot V_{п}, \quad (2.8)$$

где $m_{1(2)}$ – распределенная масса штанги;

$C_{и}$ – скорость распространения изгибной волны на штанге № 1;

$V_{п}$ – скорость колебания штанги №1 от продольной волны;

D – интенсивность продольных волн на штанге №1.

Тогда коэффициент отражения продольной волны может быть получен из следующего выражения:

$$r_{\Pi} = D/A = (2 \cdot C_{\Pi} \cdot V_{\Pi}) / C_{\text{и}} \cdot (V_{\text{и max}} + V_{\text{и min}}). \quad (2.9)$$

Коэффициент отражения энергии продольных волн получается из следующего выражения:

$$r_{\Pi}^{\ominus} = (C_{\Pi} / 2 \cdot C_{\text{и}}) \cdot [2 \cdot V_{\Pi} / (V_{\text{и max}} + V_{\text{и min}})]^2. \quad (2.10)$$

Аналогично выражаются коэффициенты прохождения продольных волн по скорости и энергии:

$$\tau_{\Pi} = D^1/A = (2 \cdot C_{\Pi} \cdot V_{\Pi}^1) / C_{\text{и}} \cdot (V_{\text{и max}} + V_{\text{и min}}), \quad (2.11)$$

$$\tau_{\Pi}^{\ominus} = (2 \cdot V_{\Pi}^1) / (V_{\text{и max}} + V_{\text{и min}})^2, \quad (2.12)$$

где V_{Π}^1 – скорость продольной волны на 2-й штанге.

2.2.5. Обобщение результатов эксперимента

Результаты измерений и расчетов представлены на графиках рис.2.13 – 2.17.

Из рассмотрения графиков коэффициентов прохождения (τ_{Π}) и отражения (r_{Π}) изгибных волн при жестком соединении штанг (рис. 2.11, 2.12, 2.13) отмечается хорошее согласование экспериментальных данных и расчетных значений по методу С.Б.Будрина и А.С.Никифорова [8]. Для продольных волн удовлетворительное совпадение наблюдается на частотах $f_i > 1$ кГц, так как начиная с этой частоты длина продольной волны в штанге $\lambda_{f=1 \text{ кГц}} = 2,2$ м полностью укладывается по длине демпфирующего устройства (рис.2.10), в котором происходит эффективное глушение отраженных от концов штанг изгибных и продольных волн. На рис.2.16 и 2.17 представлены графики изоляции угловым соединением штанг из оргстекла с упругими вставками. Как видно из сравнения с графиками на рис. 2.11–2.13 введение в стыки упругих материалов даже сравнительно небольшой толщины способно существенно повысить изоляцию на пути распространения изгибных колебаний.

Результаты исследования прохождения звуковой вибрации через угловое соединение строительных конструкций могут быть использованы при разработке инженерного метода расчета вибрации для обоих случаев конструктивного решения – жесткого и с упругими прокладками.

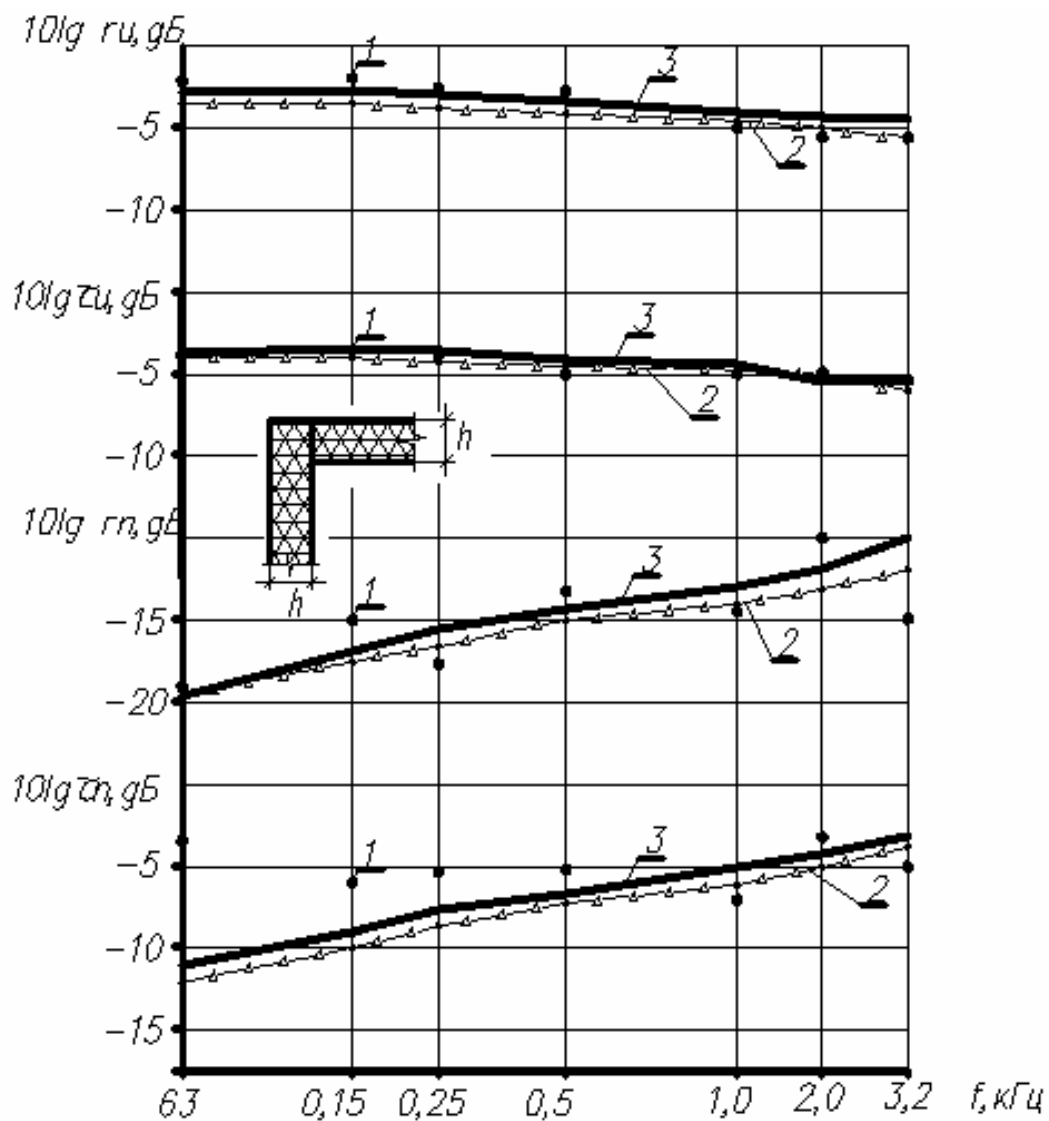


Рис.2.11. Прохождение и отражение упругих волн в жестком прямоугольном стыке равных $h_1 = h_2 = 0,018$ м по толщине штанг:
 1 – эксперимент; 2 – расчет [8]; 3 – предлагаемый метод

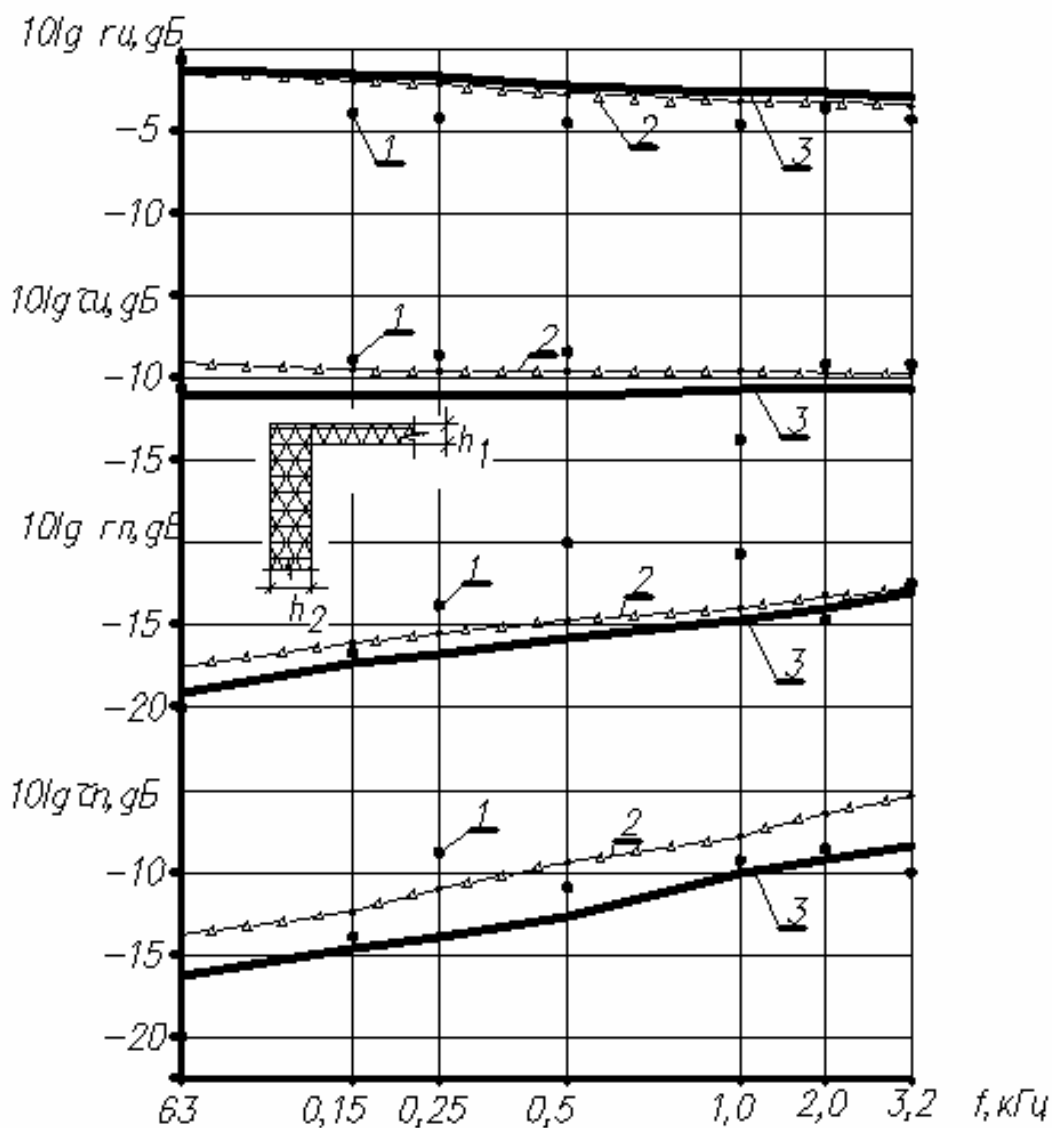


Рис.2.12. Прохождение и отражение упругих волн в жестком прямоугольном стыке; направление распространения волны – из тонкой штанги $h_1 = 0,01$ м в толстую $h_2 = 0,018$ м:
 1 – эксперимент; 2 – расчет [8]; 3 – предлагаемый метод

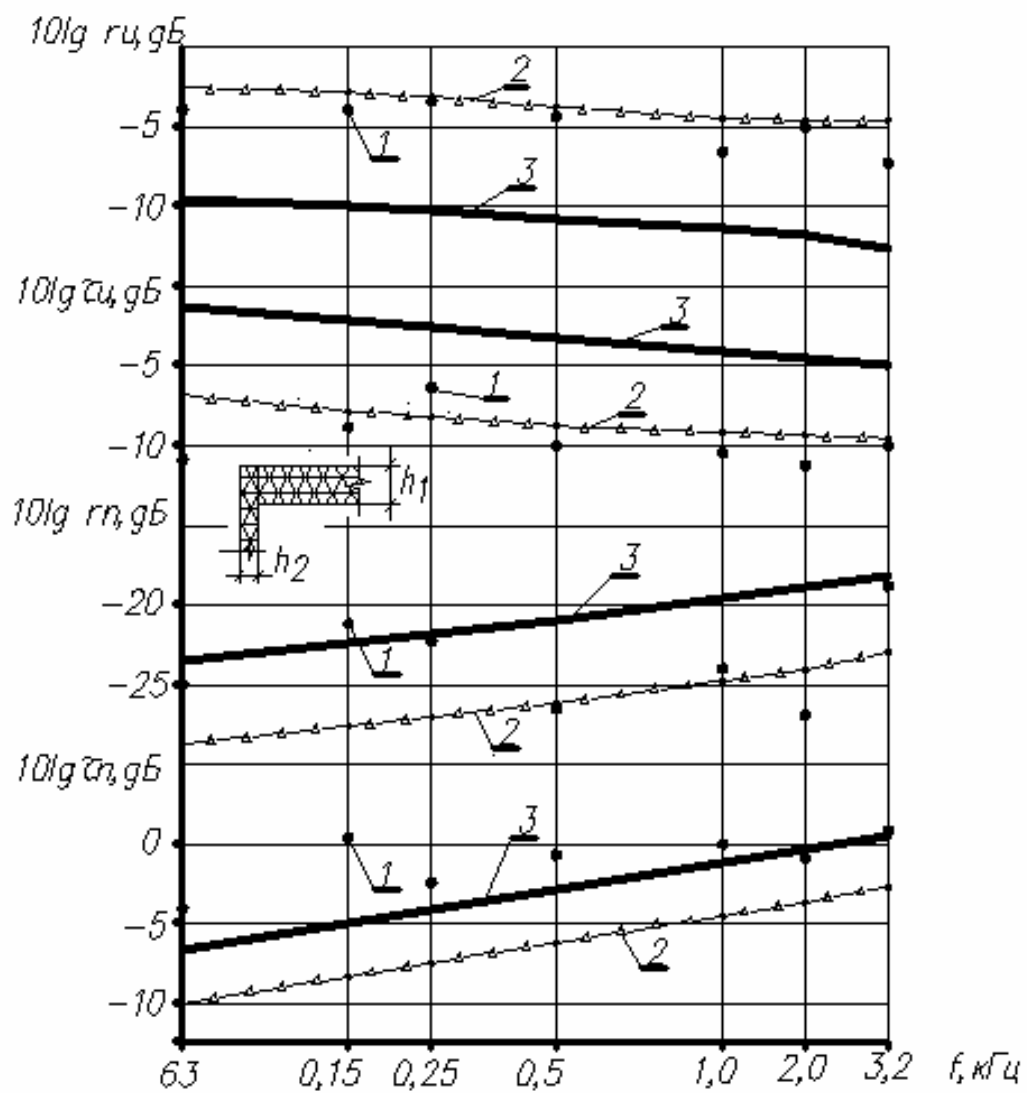
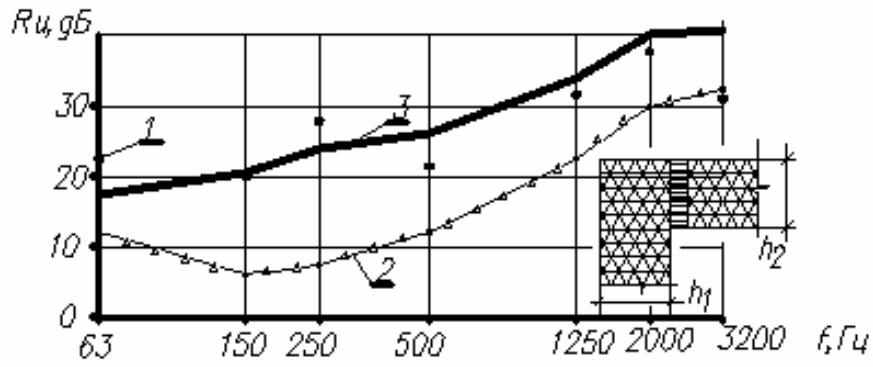
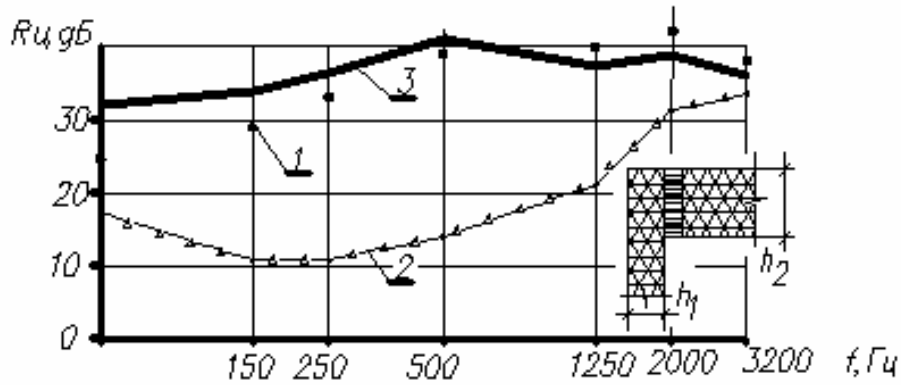


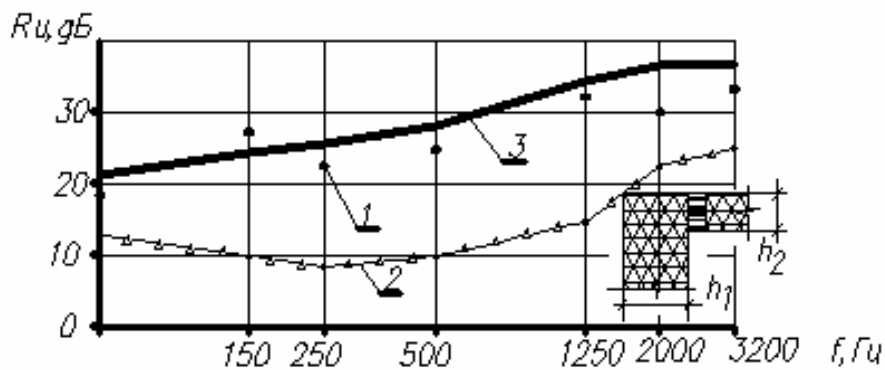
Рис.2.13. Прохождение и отражение упругих волн в жестком прямоугольном стыке; направление распространения волны – из толстой штанги $h_1 = 0,018$ м в тонкую $h_2 = 0,01$ м:
 1 – эксперимент; 2 – расчет [8]; 3 – предлагаемый метод



а) штанги равной толщины: $h_1 = h_2 = 0,018$ м,
упругая прокладка толщиной $\Delta = 0,005$ м

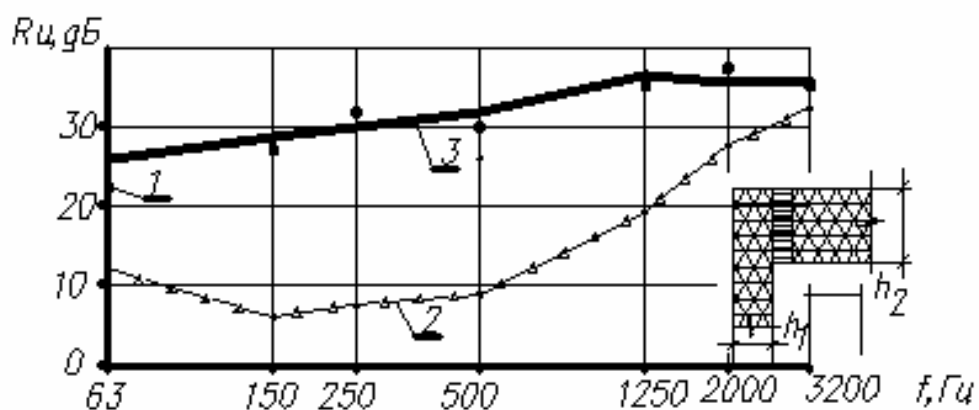


б) штанги разной толщины: $h_1 = 0,01$ м, $h_2 = 0,018$ м,
упругая прокладка толщиной $\Delta = 0,005$ м

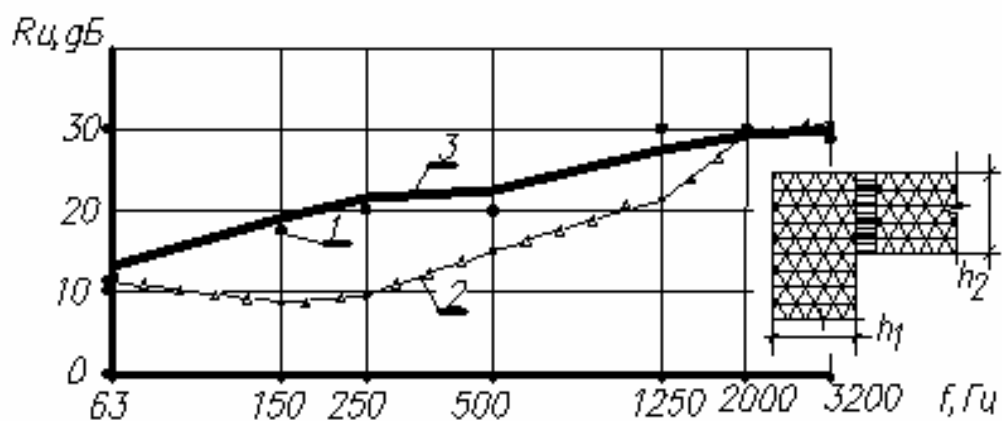


б) штанги разной толщины: $h_1 = 0,018$ м, $h_2 = 0,01$ м,
упругая прокладка толщиной $\Delta = 0,005$ м

Рис.2.14. Изоляция изгибных колебаний угловым стыком:
1 – эксперимент; 2 – расчет [83]; 3 – предлагаемый метод



а) штанги разной толщины: $h_1 = 0,01$ м, $h_2 = 0,018$ м,
упругая прокладка толщиной $\Delta = 0,0025$ м



б) штанги разной толщины: $h_1 = 0,018$ м, $h_2 = 0,01$ м,
упругая прокладка толщиной $\Delta = 0,0025$ м

Рис.2.15. Изоляция изгибных колебаний угловым стыком:
1 – эксперимент; 2 – расчет [83]; 3 – предлагаемый метод

2.3. Оценка погрешностей и ошибок полученных результатов

На точность результатов могут оказать влияние следующие погрешности измерений:

- основные или погрешности средств измерения;
- дополнительные или погрешности от действия внешних факторов;

– систематические или постоянные при проведении всего цикла измерений;

– методические или погрешности несовершенства метода измерений;

– случайные.

Однако влияние многих из них удалось значительно снизить. Так измерения уровней звукового давления (или относительные измерения) на штангах производились по методике [8, 83], что позволило в значительной мере устранить погрешности от неточности электрической калибровки микрофонов и датчиков. Весь цикл измерений производился одной и той же аппаратурой за относительно короткое время, что уменьшило влияние погрешностей от нестабильной работы приборов. Крепление датчиков к плоскости штанг производилось винтами при плотном притирании к поверхности в соответствии с разметкой продольных осей, а на горизонтальных пластинах – с помощью специальной мастики, которая наносилась тонким слоем для исключения влияния упругих свойств. Благодаря этому разброс результатов измерений не превышает 2 дБ.

В работе [32] указывается на то, что в случае, если масса датчика и его размеры пренебрежительно малы в сравнении с массой колеблющейся конструкции, то его влияние на характер колебаний будет так же мал. Для датчика КД-12(13) при массе $m_d = 20$ г оно составит следующие значения:

Т а б л и ц а 2 . 7

Частота f , Гц	63	125	250	500	1000	2000	4000
ΔL , дБ	0,014	0,021	0,03	0,04	0,056	0,08	0,095

Выводы

1. На средних и высоких частотах изоляция воздушного шума R , дБ, находится в прямой зависимости от скорости колебания ограждения L_v , дБ. Величину этой скорости определяют отражения от краев.

2. Как известно, прокладки дают виброизолирующий эффект, поэтому звукоизоляция будет зависеть от того, каким образом закреплены края: жестко или через упругие элементы. Обработанные результаты измерений показывают, что порядок изменения ΔL , дБ, и

ΔV , дБ, одинаков, однако качественная сторона каждого из факторов требует дополнительного изучения.

3. Изгибные волны играют основную роль в переносе энергии звуковой вибрации через стыки строительных конструкций в нормируемом диапазоне частот. Как показывают результаты эксперимента, скорость колебаний штанг при прохождении изгибной волны ($V_{из}$) намного больше, чем при продольных волнах ($V_{п}$), а поэтому можно судить и об энергии каждого типа волн.

4. Различие в толщинах сопрягаемых элементов сказывается на прохождении упругих волн. Уменьшение площади поперечного сечения в четыре раза способно снизить значение коэффициента прохождения колебаний через жесткий стык:

- в направлении из тонкого элемента в более толстый на $6 \div 7$ дБ;
- в направлении из толстого элемента в тонкий на $4 \div 5$ дБ.

Введение упругих прокладок способно увеличить на 8–10 дБ изолирующий эффект, что является одним из возможных путей борьбы с распространяющейся по строительным конструкциям вибрацией.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КРАЕВЫХ УСЛОВИЙ НА ЗВУКОИЗОЛЯЦИЮ ОГРАЖДЕНИЙ И ВИБРОИЗОЛЯЦИЮ СТЫКОВ КОНСТРУКЦИЙ

3.1. Теоретические основы построения частотной характеристики изоляции воздушного шума легкими ограждениями

3.1.1. Построение расчетных схем и моделей

Для построения расчетных моделей принимаем метод сосредоточенных параметров, в котором реальные тела представлены сосредоточенными массами и упругостями.

Акустика принципиально отказывается рассматривать объекты, представленные сосредоточенными параметрами, то есть обладающими только одной массой или упругостью. Однако в ряде задач допускается рассматривать тела в виде сосредоточенных масс, когда упругими свойствами можно пренебречь, и сосредоточенной упругостью, когда инерционностью тела можно пренебречь. И в том, и в другом случае волновое движение отсутствует. Такое состояние задается следующим условием:

$$f_{\text{пр}} = c / 6 \cdot h, \quad (3.1)$$

где $f_{\text{пр}}$ – предельная частота, ниже которой тело можно рассматривать в виде сосредоточенной массы или сосредоточенной упругости;

c – скорость распространения волны;

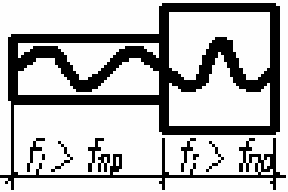
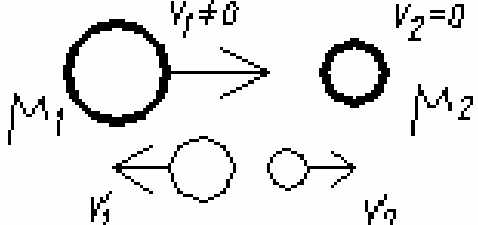

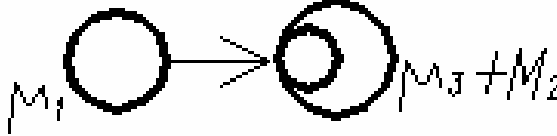
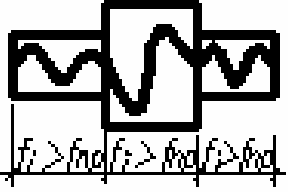
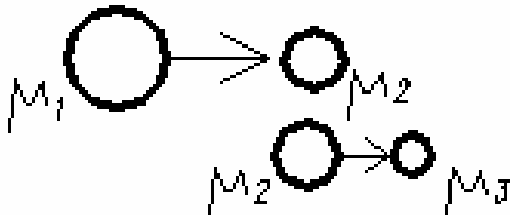
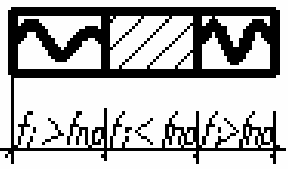

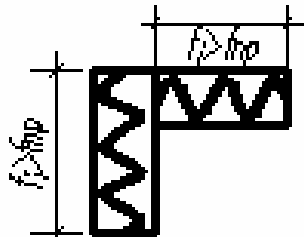
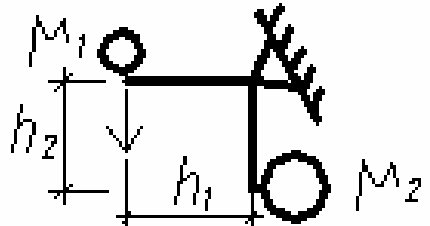
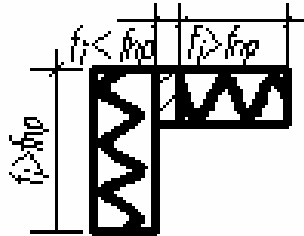
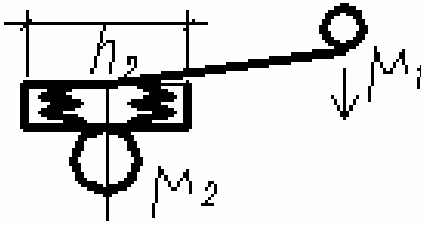
h – размер тела, вдоль которого распространяется волна.

Такие элементы могут образовывать системы типа «масса – упругость» (осциллятор), «масса – упругость – масса». В механике тела, в которых наблюдаются волновые процессы при установившемся режиме колебаний можно, следуя Рэлею – Ритцу, представлять такими системами.

В предлагаемом методе тела, в которых проявляется волновое движение, можно рассматривать в виде сосредоточенной «приведенной массы». Её величина определяется массой части тела, охваченного волновым движением за один период колебаний и деленной на 2π . Сочетания элементарных моделей массы, упругости и приведенной массы в зависимости от вида волны и частоты колебаний образуют

расчетные модели прохождения звука через границы тел или сред. Часть моделей, используемых в данном исследовании, представлены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Схема	Расчетная модель
<p>Рис. 3.1</p> 	
<p>Рис. 3.2</p> 	
<p>Рис. 3.3</p> 	
<p>Рис. 3.4</p> 	
<p>Рис. 3.5</p> 	
<p>Рис. 3.6</p> 	

Приведенные массы вместе с упругими элементами образуют колебательные системы, описываемые теми же уравнениями Лагранжа, которыми описываются системы с обычными массами и упругостями. Если же сопряженные тела представляются системой сосредоточенных или приведенных масс, то передача движения описывается уравнениями сохранения энергии или импульса.

Введение расчетной модели «приведенная масса» расширило возможности метода в решении задач по расчету коэффициентов прохождения и отражения звука по элементам строительных конструкций.

3.1.2. Изоляция воздушного шума однослойными ограждениями.

Прохождение звуковой волны через однослойную конструкцию можно представить моделью упругого взаимодействия сосредоточенных масс, одна из которых – приведенная масса среды перед ограждением μ_1 , наделенная скоростью равной единице и двух других: распределенной массы ограждения с поверхностной плотностью $m_{\pi} = \rho_{\pi} \cdot h_{\pi}$ [кг/м²] и приведенной массы среды за ограждением μ_2 , находящихся в состоянии покоя (рис.3.2). Величина приведенных масс определяется по формуле

$$\mu_i = (\rho_i \cdot \lambda_i \cdot b_i \cdot h_i) / 2 \cdot \pi, \quad (3.2)$$

где ρ_i и λ_i – соответственно плотность среды и длина волны в i -й среде;

b_i и h_i – размеры поперечника (рис.3.7а) лучевой трубки падающей волны.

Как было показано в работах [17, 18, 20, 25], результат взаимодействия описывается математической моделью, состоящей из двух уравнений: первое уравнение соответствует закону сохранения количества движения, второе – закону сохранения кинетической энергии

$$\begin{aligned} \mu_1 &= -\mu_1 \cdot \beta + (m_{\pi} + \mu_2) \cdot \alpha, \\ \mu_1 \cdot 1^2 &= \mu_1 \cdot \beta^2 + (m_{\pi} + \mu_2) \cdot \alpha^2. \end{aligned} \quad (3.3)$$

Решение системы (3.3) дает возможность получить выражение коэффициентов отражения и прохождения скорости колебаний:

$$\begin{aligned} \beta &= (\mu_2 + m_{\pi} + \mu_1) / (\mu_2 + m_{\pi} + \mu_1), \\ \alpha &= (2 \cdot \mu_1) / (\mu_2 + m_{\pi} + \mu_1). \end{aligned} \quad (3.4)$$

Если ограждение разделяет одну среду, то $\mu_1 = \mu_2 = \mu_0$, а полученное выражение (3.4) упрощается до вида:

$$\begin{aligned}\beta &= m_{\text{п}} / 2 \cdot \mu_0 + m_{\text{п}}, \\ \alpha &= 2 \cdot \mu_0 / 2 \cdot \mu_0 + m_{\text{п}}.\end{aligned}\quad (3.5)$$

Тогда изоляция воздушного шума легкими однослойными ограждениями, для которых $m_{\text{п}}$ и μ_0 оказываются вполне соизмеримыми, при нормальном падении звуковой волны рассчитывается по формуле

$$R = 10 \lg(1/\alpha^2) = 20 \lg[1 + (m_{\text{п}} / 2 \cdot \mu_0)] = 20 \lg[1 + (\pi \cdot m_{\text{п}} \cdot f / \rho_0 \cdot c_0)]. \quad (3.6)$$

Для обычных строительных конструкций $m_{\text{п}} \gg \mu_0$, поэтому из выражения (3.6) следует известное выражение звукоизоляции однослойными ограждениями:

$$R = 20 \lg \pi \cdot m_{\text{п}} \cdot f / \rho_0 \cdot c_0. \quad (3.6a)$$

При косом падении, когда звуковой фронт составляет с плоскостью ограждения угол θ , изоляция воздушного звука рассчитывается по формуле:

$$R = 20 \lg m_{\text{п}} \cdot \cos \theta / 2 \cdot \mu_0. \quad (3.6b)$$

Как следует из исследования [25], выражение приведенной массы μ_0 так же оказывается зависимым от угла θ ; при этом величина поперечника лучевой трубки (рис.3.7а) падающей звуковой волны будет изменяться пропорционально $\cos \theta$. Тогда с учетом изменения массы μ_0 величина изоляции запишется выражением (3.6).

Такая картина наблюдается на частотах $f < f_{\text{гр}}$. Однако при углах волнового совпадения она изменяется. Согласно модели (рис.3.8), звуковая волна μ_1 переходит в изгибную или приведенная масса среды перед ограждением одновременно передает движение приведенной массе ограждения $\mu_{\text{п}}$ и приведенной массе среды за ограждением μ_2 . Прохождение звука согласно такой модели дает меньшую изоляцию, поэтому принимаем её в расчет.

На углах волнового совпадения сосредоточенная масса ограждения $m_{\text{п}}$ (3.6b) заменяется на величину приведенной массы:

$$\mu_{\text{п}} = m_{\text{п}} \cdot \lambda_{\text{п}} / 2 \cdot \pi. \quad (3.7)$$

Из рассмотрения рис.3.7б,в получаем выражение приведенной массы воздушного объема $\mu\theta$:

$$\mu\theta = (\rho_0 \cdot \lambda_0 \cdot b \cdot \lambda_{\text{п}} \cdot \cos \theta) / 2 \cdot \pi. \quad (3.8)$$

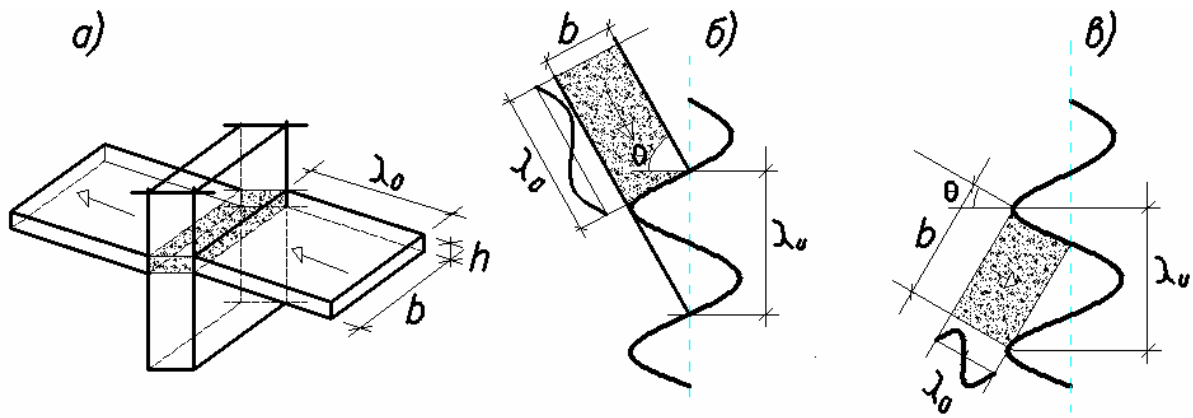


Рис.3.7. Физические модели звукопередачи:
 а – прохождение звука через ограждение; б и в – варианты волнового совпадения соответственно при больших и малых углах падения θ

Тогда величина изоляции (3.6а) будет определяться следующим выражением:

$$R=20\lg m_{\pi} \cdot \cos \theta / 2 \cdot \mu_0 = 20\lg \rho_{\pi} \cdot h / 2 \cdot \rho_0 \cdot \lambda_0 = 20\lg m_{\pi} / 2 \cdot \rho_0 \cdot \lambda_0. \quad (3.9)$$

Очевидно при углах волнового совпадения изоляция, рассчитанная по формуле (3.9), отличается от расчета по формуле (3.6) только коэффициентом $2 \cdot \pi$, который дает снижение изоляции на 16 дБ.

3.1.3. Влияние условий закрепления контура на собственную изоляцию легкого ограждения

Колебания пластин конечных размеров, возбуждаемых звуковыми волнами, в зависимости от закрепления краев (свободное, жесткое защемление, шарнирное и т.п.) подробно рассмотрены в работах [30, 51]. Отмечалось, что изоляция пластинами с жестко защемленными краями в диапазоне частот $f > f_{гр}$ выше на 3-5 дБ, чем при свободном опирании, в тоже время защемление краев в виде упругой полосы снижает «квадрат колебательной скорости примерно на 4 дБ»[51]. Как показали проведенные нами исследования, это лишь осредненные для всего диапазона величина. Максимальные значения колебаний приходятся на октавные полосы, в пределах которых находятся частоты волнового движения ($f_{гр}$) в прокладках и волнового совпадения ($f_{гр}$) на пластинах. Отсюда можно предположить, что между колебаниями пластин и их

звукоизоляции существует связь, изучение которой проводилось в ходе лабораторного эксперимента, описанного во второй главе работы.

На основе теории дискретных моделей А.В.Захарова [18, 21, 23, 28] выясним влияние условий опирания краев легкого ограждения для двух случаев: жесткого и упругого, которые наиболее распространены в строительной практике.

а) Жесткое закрепление краев.

Физическая модель соединения двух элементов – ограждения и примыкающей конструкции, может быть представлена в виде упругого взаимодействия двух масс (рис.3.1). Скорости движения этих масс(или тел), полученные после удара, будут соответствовать скоростям колебаний в отраженной и прошедшей через границу сред волнах. Результат такого взаимодействия может быть описан двумя уравнениями, одно из которых описывает закон сохранения импульса, а второе выражает закон сохранения кинетической энергии:

$$\mu_1 = \mu_1 \cdot \beta + \mu_2 \cdot \alpha, \quad (3.10)$$

$$(\mu_1 \cdot 1^2)/2 = (\mu_1 \cdot \beta^2)/2 + (\mu_2 \cdot \alpha^2)/2. \quad (3.11)$$

Решение этой системы позволяет получить выражение коэффициентов отражения и прохождения скорости колебаний:

$$\begin{aligned} \beta &= \mu_1 - \mu_2 / \mu_1 + \mu_2, \\ \alpha &= 2 \cdot \mu_1 / \mu_1 + \mu_2. \end{aligned} \quad (3.12)$$

Выражение (3.12) используется для расчета изоляции воздушного шума при жестком закреплении краев ограждения.

б) Упругое закрепление краев.

При упругом закреплении последовательно рассматриваются три области нормируемого диапазона по принципу наименьшей частоты:

$$1) f_i < 1,4 \cdot f_o; 2) 1,4 \cdot f_o < f_i \leq f_{пр}; 3) f_i > f_{пр} (f_{гр}), \quad (3.13)$$

где $f_o = (1 / 2 \cdot \pi) \cdot \{ [K \cdot (\mu_1 + \mu_2)] \cdot t / (\mu_1 \cdot \mu_2) \}^{0,5}$ – частота собственных колебаний системы, состоящей из легкого ограждения (μ_1), упругой прокладки с жесткостью $K = E \cdot F \cdot h^{-1}$ и примыкающей конструкции (μ_2) с учетом коэффициента t (см. подразд. 4.5);
 $f_{пр} = c_{пр} / 6 \cdot h$ – частота, начиная с которой в прокладке толщиной h появляется волновое движение при прохождении продольной волны $c_{пр}$.

Каждой области ставится в соответствие расчетная модель. Если на частотах $f_i < 1,4f_0$ колебания передаются как и при жестком сопряжении элементов, а коэффициент отражения определяется по формуле (3.12), то на частотах $1,4f_0 < f_i \leq f_{пр}$ следует использовать расчетную модель, показанную на рис.3.4. На этих частотах величина коэффициента отражения от краев упругих колебаний может быть получена по формуле:

$$\beta = (1 - 0,1^{0,1 \cdot \Delta R})^{0,5}, \quad (3.14)$$

где $\Delta R = 20 \lg |1 - (f/f_j)^2|$ – изоляция колебательной системы «масса – упругость – масса».

При появлении волнового движения в упругой прокладке на частотах $f_i > f_{пр}$ расчетная модель представляется в виде «волновод – волноводы» (рис.3.3), а коэффициент отражения β вычисляется по формуле

$$\beta = [(\mu_1 - \mu_3) / (\mu_1 + \mu_3)] / [(\mu_2 - \mu_3) / (\mu_2 + \mu_3)], \quad (3.15)$$

где μ_1, μ_2, μ_3 – соответственно приведенные массы ограждения, прокладочного элемента и примыкающей конструкции.

3.1.4. Снижение изоляции на резонансах

Для легких конструкций характерен несколько отличный от массивных (4 дБ/ок. вместо 6 дБ/ок.) рост звукоизоляции на всем рабочем диапазоне частот. Это связано с тем, что легкие ограждения при колебаниях имеют потери от упругого соприкосновения с воздушной средой, которые вполне соизмеримы с потерями на внутреннее трение.

Результаты экспериментов показывают, что значение изоляции воздушного шума реальными конструкциями обычно отличается от значений, рассчитанных по формулам (3.6), (3.9). Как видно из работ [24, 26, 27], это отклонение вызывается резонансными и антирезонансными явлениями, зависящими от размеров ограждения и разделяемых им помещений, условий закрепления с другими (смежными) конструкциями.

Для инженерных расчетов интерес представляет резонансный режим колебаний конструкций, как самый неблагоприятный. Амплитуда колебаний в случае резонанса увеличивается до тех пор, пока не установится равновесие между притоком энергии и её потерями, связанными с трением в материале ограждения, потерями на трение о

слоем воздуха, который соприкасается с колеблющейся поверхностью, а так же переходом энергии через стыки в примыкающие конструкции. Последнее обстоятельство особенно важно при сопряжении через упругие прокладки. В работах [24, 26] была рассмотрена интерференционная картина колебаний элемента стержневой системы при постоянно действующем источнике. Эти исследования установили аналитическую зависимость увеличения колебаний на резонансах при учете потерь энергии на внутреннее трение в материале колеблющегося элемента и количеством энергии, ушедшей за её пределы.

Следуя классической схеме, энергию, поступающую извне и проходящую в смежные конструкции, можно учесть посредством совместного решения уравнений, описывающих движение элементарных колебательных систем. Тогда остается необходимым определить потери на внутреннее трение в материале ограждения и трением о слой воздуха, примыкающий к ограждению. В последующем эти характеристики будут именоваться согласно принятой терминологии как потери на внутреннее трение и излучение и иметь соответствующие обозначения η_m и $\eta_{из}$.

При постоянно действующей на элемент конечных размеров периодической силе, гармонические колебания, приходящие от источника, будут складываться с колебаниями, отраженными от краев ограждения. Суммарное колебание будет зависеть от частоты и фазы складываемых колебаний. Внутренние потери могут быть охарактеризованы коэффициентом потерь η_m ; потери на излучение в этом случае можно добавить к внутренним потерям в материале звукоизолирующей преграды в виде отдельного слагаемого.

При колебании массивных конструкций потери на излучение невелики и ими можно пренебречь.

Колебания на резонансах при соблюдении принятых условий представляются в виде суммарного выражения амплитуды колебаний, прошедших от источника в данный момент времени в рассматриваемый элемент с амплитудами колебаний, отраженными от краев во все предшествующие периоды. Значения коэффициентов отражения колебательной скорости упругих волн рассчитываются по формулам, предложенным в [18, 19], а также в последующих разделах настоящей работы с учетом краевых условий. В общем случае снижение звукоизоляции можно описать формулой, определяющей частотную

зависимость между потерями энергии на излучение, трение в материале колеблющегося элемента и ухода её в примыкающие конструкции:

$$\Delta L = 10 \cdot \lg[(1/m) \cdot (1 + a^m \cdot \beta_2) \cdot (1 - a^{0,5m})] / [(1 - a^{2m} \cdot \beta_1 \cdot \beta_2) \cdot (1 - a^{0,5})], \quad (3.16)$$

где m – количество полуволн, укладываемых по длине элемента на рассматриваемой частоте резонанса;

β_1 и β_2 – коэффициенты отражения от краев скорости колебаний элементов ограждения;

$a = e^{-\pi \Sigma \eta}$ – затухание на одну длину волны упругих колебаний при целочисленных значениях коэффициентов потерь в материале η_m и на излучение η_n .

Численное значение величины потерь на излучение η_n может быть получено по следующим формулам:

$$\text{– на частотах } f_i \leq f_{гр} \quad \eta_n = [(\rho_o \cdot c_o) / (\pi \cdot m_n \cdot f)]^{1,2}; \quad (3.17)$$

$$\text{– на частотах } f_i > f_{гр} \quad \eta_n = [(2 \cdot \rho_o \cdot c_o) / (m_n \cdot f)]^{1,2}, \quad (3.18)$$

где $\rho_o = 1,203 \text{ кг/м}^3$ – объёмная масса воздуха;

$c_o = 344 \text{ м/с}$ – скорость распространения звука в воздухе.

3.2. Прохождение упругих колебаний через прямоугольный стык строительных конструкций

Как было показано в разд.1, распространение упругих колебаний по элементам конструкций характеризуется коэффициентами прохождения α и отражения β скорости колебаний. Эти величины могут определяться разными методами [8, 16, 66, 83]. В экспериментальных работах [20, 34, 37] был проведен частотный анализ распространения вибраций по элементам панельных зданий. Было отмечено, что на низких и средних частотах изгибные волны оказываются преобладающими в панелях, лежащих в одной плоскости с вибрирующей. В панелях, раскрепленных в перпендикулярной им плоскости, вибрационное поле формируется в основном за счет изгибных и частично продольных волн. Качественную оценку трансформации упругих волн при разных толщинах сопрягаемых элементов стержневой системы удалось получить А.В.Захарову и В.Т.Мартынову [19].

Таким образом, многочисленные теоретические и в меньшей мере экспериментальные исследования позволили представить механизм

распространения упругих колебаний по элементам строительных конструкций.

Уточнению расчетной схемы и величин коэффициентов отражения и прохождения энергии колебаний на основе метода дискретных моделей А.В.Захарова [17–26], посвящено исследование в настоящем разделе.

3.2.1. Построение расчетной схемы и модели

Для построения расчетной схемы будем использовать принятые ранее (табл. 3.1) простейшие модели и получаемые из них логические комбинации колебательных систем. Рассмотрим физическую модель прохождения упругой волны через угловое соединение при условии нормального падения звуковой волны и однородности материалов стыка и сопрягаемых элементов (рис.3.8, 3.9).

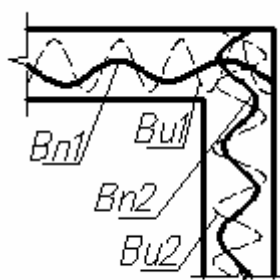


Рис.3.8

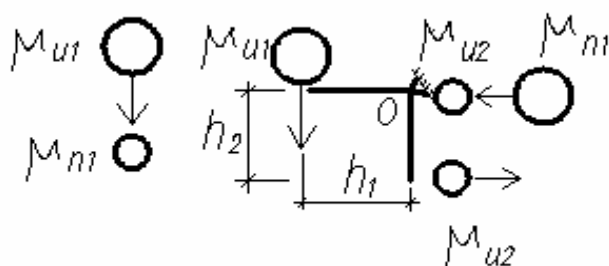


Рис.3.9

Процесс распространения упругих колебаний через прямоугольный стык (см. рис.3.8) можно представить в виде стереомеханического удара четырех приведенных масс через невесомый уголок, который вращается относительно точки «О» (см .рис.3.9):

- μ_{n1} – приведенная масса 1-й штанги при изгибной волне;
- μ_{n2} – приведенная масса 2-й штанги при изгибной волне;
- μ_{u1} – приведенная масса 1-й штанги при продольной волне;
- μ_{u2} – приведенная масса 1-й штанги при продольной волне.

Для описания такой модели необходимо записать четыре уравнения. Два уравнения (3.19), (3.20) отображают (описывают) взаимодей-

стве приведенных масс $\mu_{и1}$, $\mu_{п1}$, $\mu_{и2}$, $\mu_{п2}$ соответственно на 1-й и 2-й штангах в виде проекций импульса силы на ортогональные оси:

$$\mu_{и1} = \pm \mu_{и1} \cdot \beta_{и} + \mu_{п2} \cdot \alpha_{п}, \quad (3.19)$$

$$- \mu_{п2} \cdot \beta_{п} + \mu_{и2} \cdot \alpha_{и} = 0. \quad (3.20)$$

Уравнение (3.21) является аналитическим выражением передачи момента количества движения в представленной на рис.3.9 модели, то есть упругое взаимодействие через невесомый уголок – от приведенной массы $\mu_{и1}$ к $\mu_{и2}$:

$$\mu_{и1} \cdot h_1 \cdot \beta_{и} = \mu_{и2} \cdot h_2 \cdot \alpha_{и}. \quad (3.21)$$

Четвертое уравнение (3.22) выражает закон сохранения кинетической энергии, полученной системой в результате упругого удара приведенной масс $\mu_{и1}$, которая наделяется единичной скоростью. Значения скоростей колебаний для трёх других могут быть определены по частотно через коэффициенты отражения β и прохождения α для продольных и, отчасти, для изгибных волн, совершающих поступательное движение в самой волне. Коэффициентами γ_1 и γ_2 представляется возможным выразить вращательную составляющую изгибной волны.

Вид этого уравнения следующий:

$$\begin{aligned} (\mu_{и1} \cdot 1^2)/2 = & (\mu_{и1} \cdot \beta_{и}^2)/2 + (\mu_{и2} \cdot \alpha_{и}^2 \cdot \gamma_2)/2 + (\mu_{п2} \cdot \alpha_{п}^2)/2 + \\ & + (\mu_{и1} \cdot \beta_{и}^2 \cdot \gamma_2)/2 + (\mu_{п1} \cdot \beta_{п}^2)/2 + (\mu_{п2} \cdot \alpha_{п}^2)/2, \end{aligned} \quad (3.22)$$

где h_1 и h_2 – соответственно плечи приведенных масс $\mu_{и1}$ и $\mu_{и2}$;

γ_1 и γ_2 – коэффициенты, учитывающие энергию вращательного движения в изгибной волне.

Если h – толщина конструкции, а $\kappa = \omega / c_{и}$ – волновое число, то $\gamma_{1,2} = 1/12 \cdot (h_{1,2}^2 \cdot \kappa^2)$ или $\gamma_{1,2} = (\pi^2 \cdot h_{1,2}^2) / 3 \cdot \lambda_{и}^2$.

Совместное решение системы уравнений (3.19)–(3.22) позволяет определить значения коэффициентов:

– отражения скорости колебаний в изгибной волне:

$$\begin{aligned} \beta_{и} = & \{ (\pm \mu_{и1} / \mu_{п2}) \pm [(\mu_{и1} / \mu_{и2})^2 - (1 + \mu_{и1} / \mu_{п2} + \mu_{и1} \cdot h_1^2 / \mu_{п1} \cdot h_2^2 + \\ & + \mu_{и1} \cdot h_1^2 / \mu_{и2} \cdot h_2^2 + \mu_{и1} \cdot h_1^2 \cdot \gamma_2 / \mu_{и2} \cdot h_2^2 + \gamma_1) \cdot [(\mu_{и1} / \mu_{и2}) - 1]] \} / (1 + \mu_{и1} / \mu_{п2} + \\ & + \mu_{и1} \cdot h_1^2 / \mu_{п1} \cdot h_2^2 + \mu_{и1} \cdot h_1^2 / \mu_{и2} \cdot h_2^2 + \mu_{и1} \cdot h_1^2 \cdot \gamma_2 / \mu_{и2} \cdot h_2^2 + \gamma_1); \end{aligned} \quad (3.23)$$

– прохождения скорости колебаний в изгибной волне:

$$\alpha_{и} = (\mu_{и1} \cdot h_1 / \mu_{и1} \cdot h_2) \cdot \beta_{и}; \quad (3.24)$$

– отражения скорости колебаний в продольной волне:

$$\beta_{\pi} = (\mu_{\pi 1} \cdot h_1 / \mu_{\pi 1} \cdot h_2) \cdot \beta_{\pi}; \quad (3.25)$$

– прохождения скорости колебаний в продольной волне:

$$\alpha_{\pi} = (\mu_{\pi 1} / \mu_{\pi 2}) \cdot (1 \pm \beta_{\pi}). \quad (3.26)$$

В случае равенства толщин сопрягаемых элементов эти уравнения могут быть преобразованы до вида:

$$\beta_{\pi} = \{(\pm \mu_{\pi} / \mu_{\pi}) \pm [(\mu_{\pi} / \mu_{\pi})^2 - (2 + 2\mu_{\pi} / \mu_{\pi} + 2\gamma) \cdot (\mu_{\pi 1} / \mu_{\pi 2}) - 1]\} / (2 + 2\mu_{\pi} / \mu_{\pi} + 2\gamma); \quad (3.27)$$

$$\alpha_{\pi} = \beta_{\pi}; \quad (3.28)$$

$$\beta_{\pi} = (\mu_{\pi} / \mu_{\pi}) \cdot \beta_{\pi}; \quad (3.29)$$

$$\alpha_{\pi} = (\mu_{\pi} / \mu_{\pi}) \cdot (1 \pm \beta_{\pi}). \quad (3.30)$$

Коэффициенты отражения и прохождения энергии упругих колебаний могут быть получены из следующих выражений:

$$r_{\pi} = \beta_{\pi}^2, \quad (3.31)$$

$$r_{\pi} = (\mu_{\pi 1} / \mu_{\pi 1}) \cdot \beta_{\pi}^2 \quad (3.32)$$

$$\tau_{\pi} = (\mu_{\pi 2} / \mu_{\pi 1}) \cdot \alpha_{\pi}^2, \quad (3.33)$$

$$\tau_{\pi} = (\mu_{\pi 2} / \mu_{\pi 1}) \cdot \alpha_{\pi}^2. \quad (3.34)$$

Перед первым членом правой части в формулах (3.19), (3.23), (3.25), (3.27), (3.29) стоят два знака – плюс и минус. Они позволяют учитывать фазу колебаний в отраженной волне. Так, если приведенная масса $\mu_{\pi 1} < \mu_{\pi 2}$, что чаще всего бывает на практике, то отраженная волна меняет знак колебаний, и в формулах, поименованных выше, берутся верхние знаки.

Если $\mu_{\pi 1} > \mu_{\pi 2}$, что характерно при переходе колебаний из толстого элемента в тонкий, то колебательная скорость не изменяет своей фазы колебаний и берутся нижние знаки.

В работе А.Р.Фазылова [60] решалась подобная задача методом теории упругости, когда движение изгибной волны рассматривалось как результат упругих деформаций конструкций. Как показал анализ экспериментальных исследований, описанных во второй главе, основную часть энергии переносят изгибные волны; это обстоятельство послужило основой модели (рис.3.9), которая позволила описать рас-

пространение упругих колебаний по элементам строительных конструкций, повысив точность аналитического расчета.

3.2.2. Расчетные значения коэффициентов прохождения изгибных колебаний через жесткое угловое соединение

Результаты измерения звукоизоляции в зданиях показывают, что перегородки, выполненные из легкого бетона, обуславливают значительную косвенную передачу звука. Для двух групп конструкций – из легкого и тяжелого бетонов, на основе формул (3.23), (3.24), (3.33) произведен расчет коэффициентов прохождения энергии колебаний в изгибной волне в угловом соединении.

При этом проанализированы варианты реальных конструкций для диапазона частот 100–6400 Гц. Практический интерес представляет вопрос о том, какими свойствами должны обладать легкие стеновые конструкции, чтобы обеспечить как можно меньшую косвенную звукопередачу.

На рис.3.10 представлено сопоставление изменения в значительном диапазоне двух свойств бетона – плотности и модуля упругости. Расчеты показывают, что незначительное увеличение модуля упругости (в пределах $0,5 \cdot 10^9$ н/м²) и плотности (~ 100 кг/м³) дают такие же малые результаты – в пределах $0,2 \div 0,25$ дБ/ок. увеличения коэффициента прохождения изгибных волн.

На рис.3.11 и 3.12 показано влияние изменения модуля упругости материала легкой перегородки E_1 и примыкающей конструкции E_2 . При увеличении модуля E_1 в полтора раза наблюдается изменение коэффициента звукопередачи $\tau_{\text{и}}$ в пределах 0,4 дБ/ок. Изменение модуля упругости массивной конструкции E_2 аналогичным образом окажет влияние на косвенную звукопередачу в сторону уменьшения при соответствующем росте модуля упругости E_2 .

На рис.3.13 изображен график, характеризующий эффект изменения толщины легкого бетонного ограждения на коэффициент прохождения энергии $\tau_{\text{и}}$ изгибных колебаний. Расчеты показывают, что увеличение толщины при неизменном модуле упругости E_1 приводит к значительному росту проходящей через угловой стык энергии. Так при изменении $h_1 = 0,07$ м до $h_1^1 = 0,1$ м снижение изоляции составляет примерно 4,5 дБ по всему исследуемому диапазону. Дальнейшее увеличение h_1 до 0,15 м снижает изоляцию примерно на ту же величину.

На рис.3.14 представлен график изменения изоляции изгибных колебаний жестким угловым соединением, когда изменяется толщина h_2 массивной конструкции, а плотность ρ_2 и модуль упругости остаются постоянными. При увеличении толщины в пределах $0,1 \div 0,15$ м рост изоляции составляет 5 дБ, а в пределах от 0,15 до 0,2 м – 3,5 дБ на всем частотном диапазоне.

На рис.3.15 проведено сопоставление характеристики облегченной перегородки толщиной 0,07 м и некоторой воображаемой перегородки той же толщины, у которой плотность, модуль упругости значительно ниже, чем у облегченной. Результаты расчетов показывают, что при данных значениях разность коэффициентов передачи составляет 6–7 дБ.

На рис.3.16 показано влияние относительно больших изменений модуля упругости E_1 у обычной перегородки, материал которой имеет плотность $\rho_1 = 300$ кг/м³. На основе сопоставления с результатами расчетов (рис.3.15) прослеживается интересная зависимость: когда модуль упругости исследуемой конструкции равен модулю упругости аналогичной перегородки с плотностью $\rho_1 = 500$ кг/м³, то и коэффициенты прохождения скорости колебаний и энергии так же равны.

Анализ графиков на рис.3.15 и 3.16 показывает, что для достижения достаточно существенного повышения изоляции изгибных колебаний в угловом соединении необходимо существенно изменить характеристики (ρ_1, E_1, h_1) материала легкого ограждения.

На рис.3.17 представлены результаты расчетов прохождения энергии в стыках панелей из тяжелого бетона. В этих расчетах толщина h_2 примыкающего элемента оставалась неизменной, а толщина исследуемого ограждения h_1 изменялась в пределах: $0,05 \div 0,1$ м и $0,1 \div 0,15$ м. Изменение коэффициента прохождения энергии τ_{II} весьма значительно при изменении соотношения толщин. В этом легко убедиться, сравнив расчетные значения при соотношениях 3:1 и 1,5:1 с теми результатами, что имеются при равных по толщине. Если в первом случае эта разница составляет 8–10 дБ по всем частотам, то во втором случае уменьшение коэффициента прохождения только на низких частотах составляет всего 2-3 дБ.

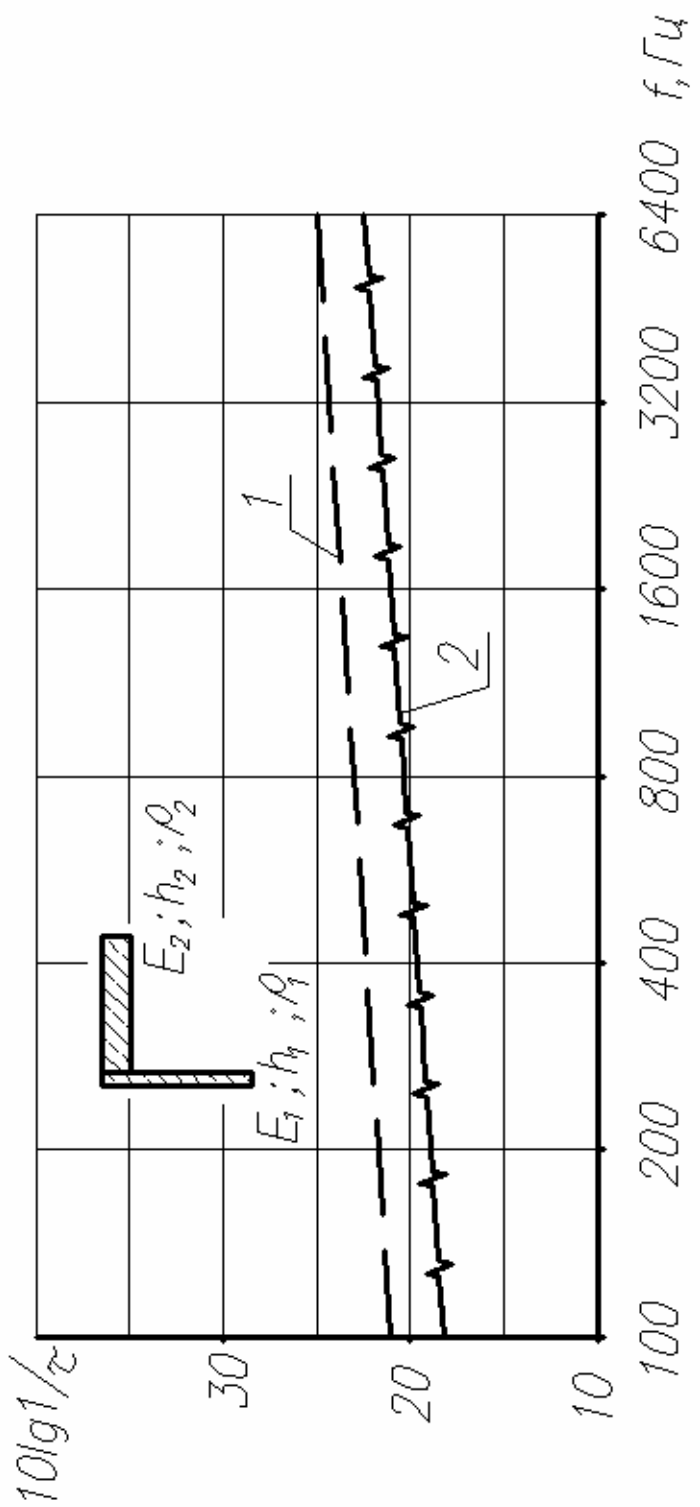


Рис.3.10. Изоляция изгибных колебаний угловым соединением:

панель № 1 – легкий бетон; $h_1 = 0,07 \text{ м}$;

панель № 2 – тяжелый бетон; $h_2 = 0,15 \text{ м}$; $\rho_2 = 2300 \text{ кг/м}^3$; $E_2 = 2,8 \cdot 10^{10} \text{ н/м}^2$

Эффект изменения изоляции от свойств легкого бетона:

1 – $\rho_1 = 500 \text{ кг/м}^3$; $E_1 = 1,35 \cdot 10^9 \text{ н/м}^2$; 2 – $\rho_1 = 600 \text{ кг/м}^3$; $E_1 = 1,7 \cdot 10^9 \text{ н/м}^2$

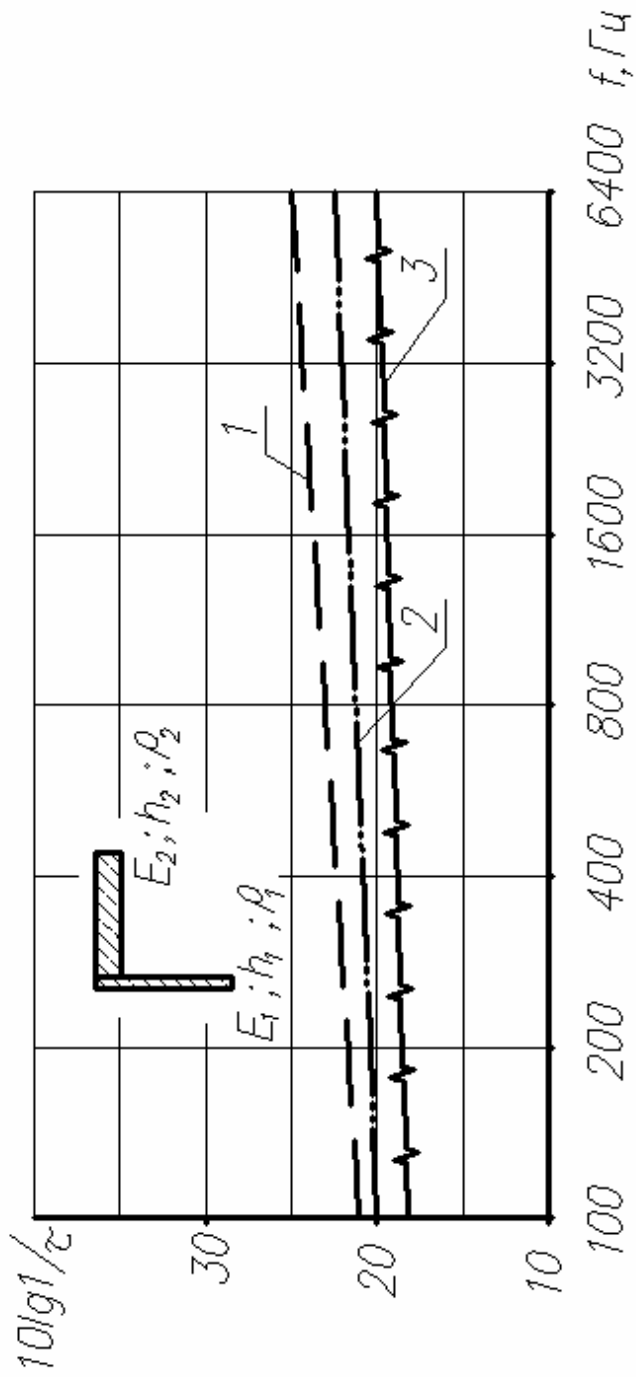


Рис.3.11. Изоляция изгибных колебаний угловым соединением:

панель № 1 – легкий бетон; $\rho_1 = 500 \text{ кг/м}^3$; $h_1 = 0,07 \text{ м}$;

панель № 2 – тяжелый бетон; $\rho_2 = 2300 \text{ кг/м}^3$; $E_2 = 2,8 \cdot 10^{10} \text{ н/м}^2$; $h_2 = 0,15 \text{ м}$

Эффект изменения изоляции от модуля упругости E_1 легкого бетона:

1 – $E_1 = 0,97 \cdot 10^9 \text{ н/м}^2$; 2 – $E_1 = 1,36 \cdot 10^9 \text{ н/м}^2$; 3 – $E_1 = 1,9 \cdot 10^9 \text{ н/м}^2$

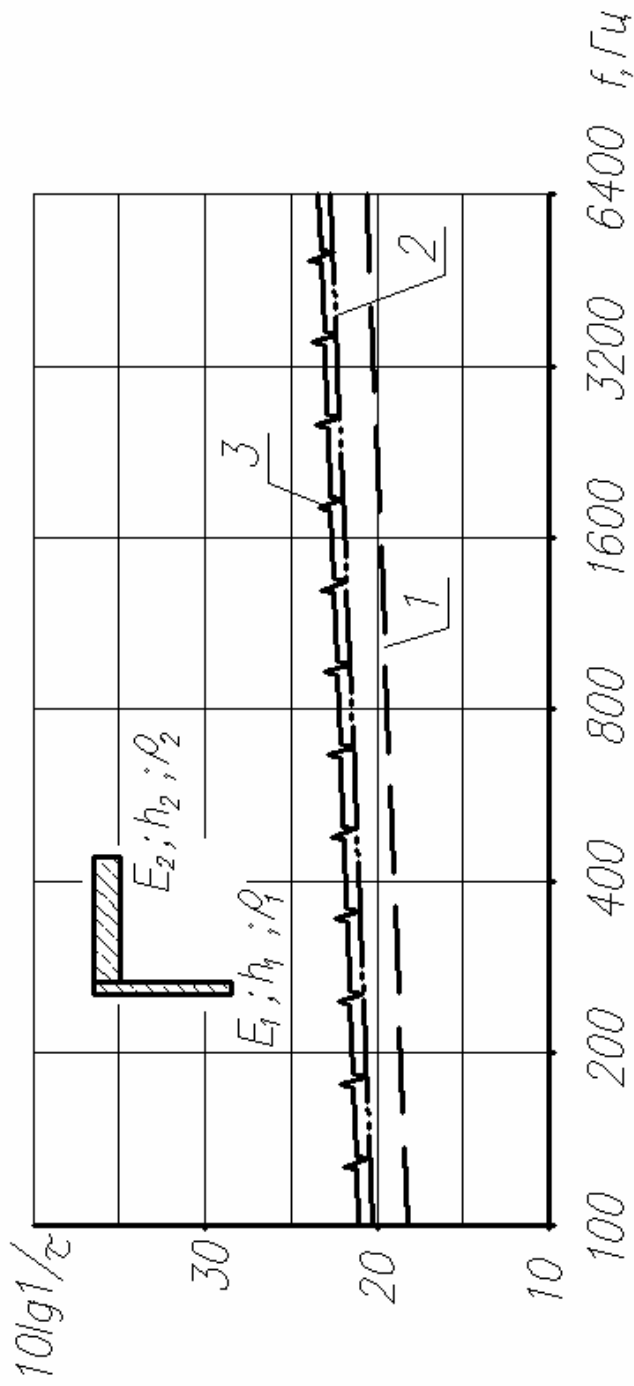


Рис.3.12. Изоляция изгибных колебаний угловым соединением:
 панель № 1 – легкий бетон; $\rho_1 = 500 \text{ кг/м}^3$; $E_1 = 1,35 \cdot 10^9 \text{ н/м}^2$; $h_1 = 0,07 \text{ м}$;
 панель № 2 – тяжелый бетон; $\rho_2 = 2300 \text{ кг/м}^3$; $h_2 = 0,15 \text{ м}$
 Эффект изменения изоляции от модуля упругости E_2 тяжелого бетона:
 1 – $E_2 = 2,0 \cdot 10^{10} \text{ н/м}^2$; 2 – $E_2 = 2,8 \cdot 10^{10} \text{ н/м}^2$; 3 – $E_2 = 3,8 \cdot 10^{10} \text{ н/м}^2$

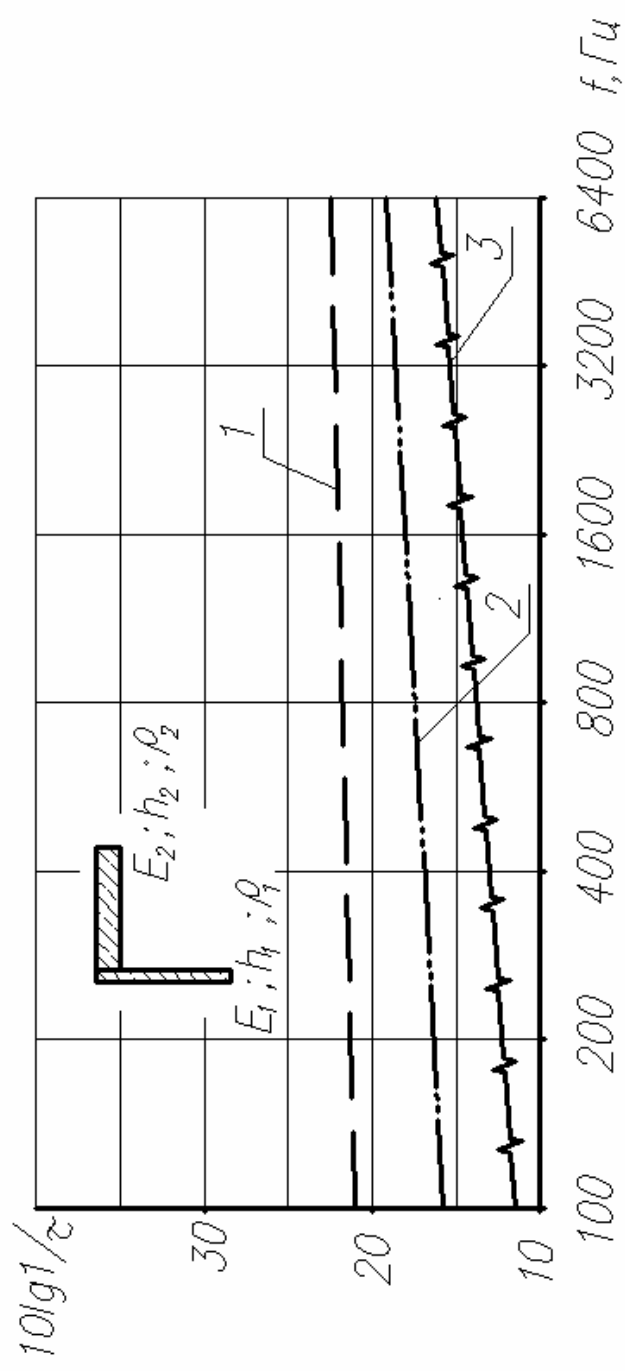


Рис.3.13. Изоляция изгибных колебаний угловым соединением:

панель № 1 – легкий бетон; $\rho_1 = 500 \text{ кг/м}^3$; $E_1 = 1,35 \cdot 10^9 \text{ н/м}^2$;

панель № 2 – тяжелый бетон; $\rho_2 = 2300 \text{ кг/м}^3$; $E_2 = 2,8 \cdot 10^{10} \text{ н/м}^2$

Эффект изменения изоляции от толщины h_1 :

1 – $h_1 = 0,07 \text{ м}$; 2 – $h_1 = 0,1 \text{ м}$; 3 – $h_1 = 0,15 \text{ м}$

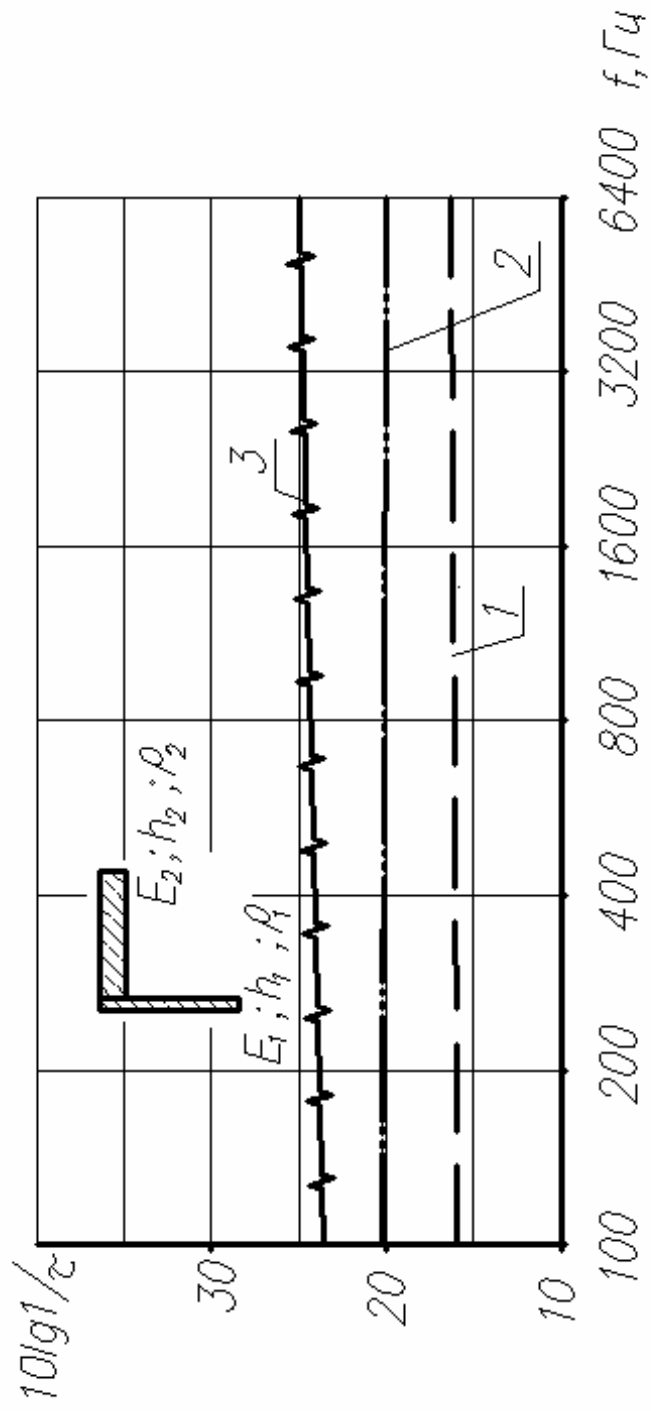


Рис.3.14. Изоляция изгибных колебаний угловым соединением:
 панель № 1 – легкий бетон; $\rho_1 = 500 \text{ кг/м}^3$; $E_1 = 1,35 \cdot 10^9 \text{ н/м}^2$; $h_1 = 0,07 \text{ м}$;
 панель № 2 – тяжелый бетон; $\rho_2 = 2300 \text{ кг/м}^3$; $E_2 = 2,8 \cdot 10^{10} \text{ н/м}^2$

Эффект изменения изоляции от толщины h_2 :

1 – $h_2 = 0,10 \text{ м}$; 2 – $h_2 = 0,15 \text{ м}$; 3 – $h_2 = 0,20 \text{ м}$

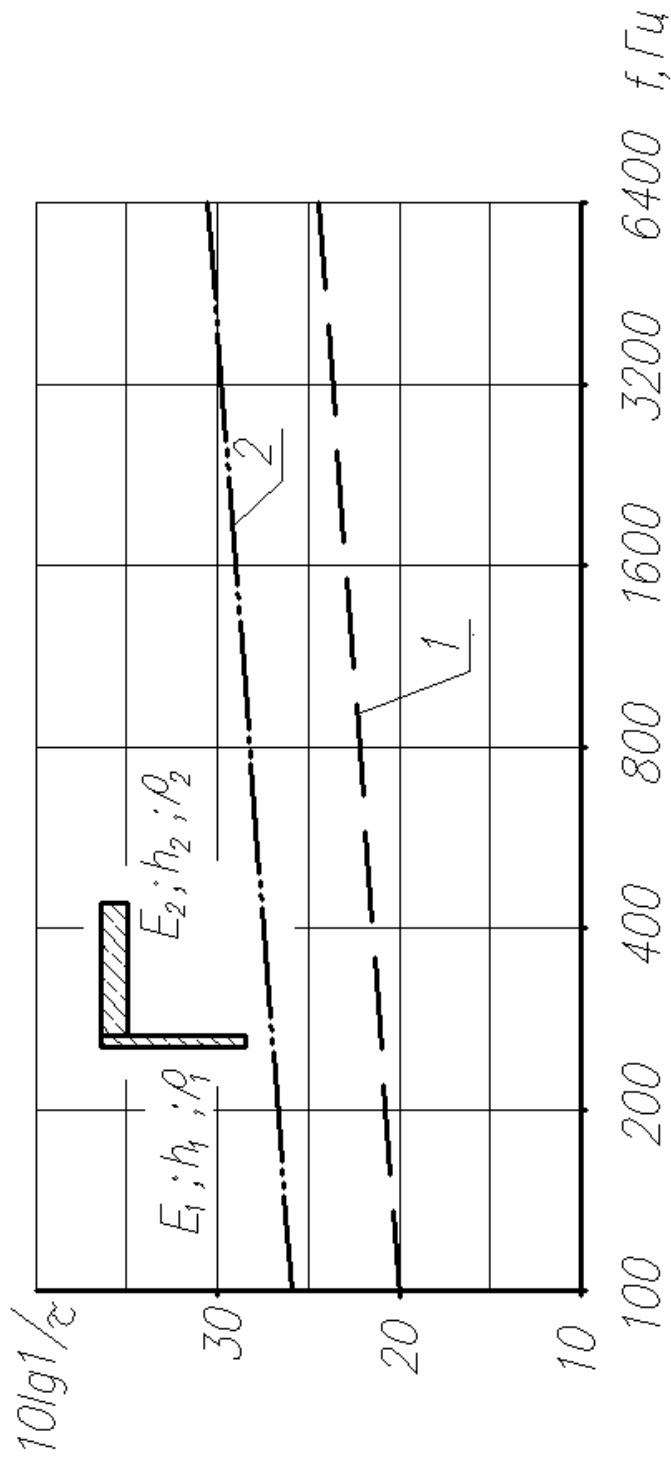


Рис.3.15. Изоляция изгибных колебаний угловым соединением:

панель № 1 – легкий бетон; $h_1 = 0,07$ м;

панель № 2 – тяжелый бетон; $\rho_2 = 2300$ кг/м³; $E_2 = 2,8 \cdot 10^{10}$ н/м².

Эффект изменения изоляции от свойств легкого бетона:

1 – $\rho_1 = 500$ кг/м³; $E_1 = 1,35 \cdot 10^9$ н/м²; 2 – $\rho_1 = 300$ кг/м³; $E_1 = 2,0 \cdot 10^8$ н/м².

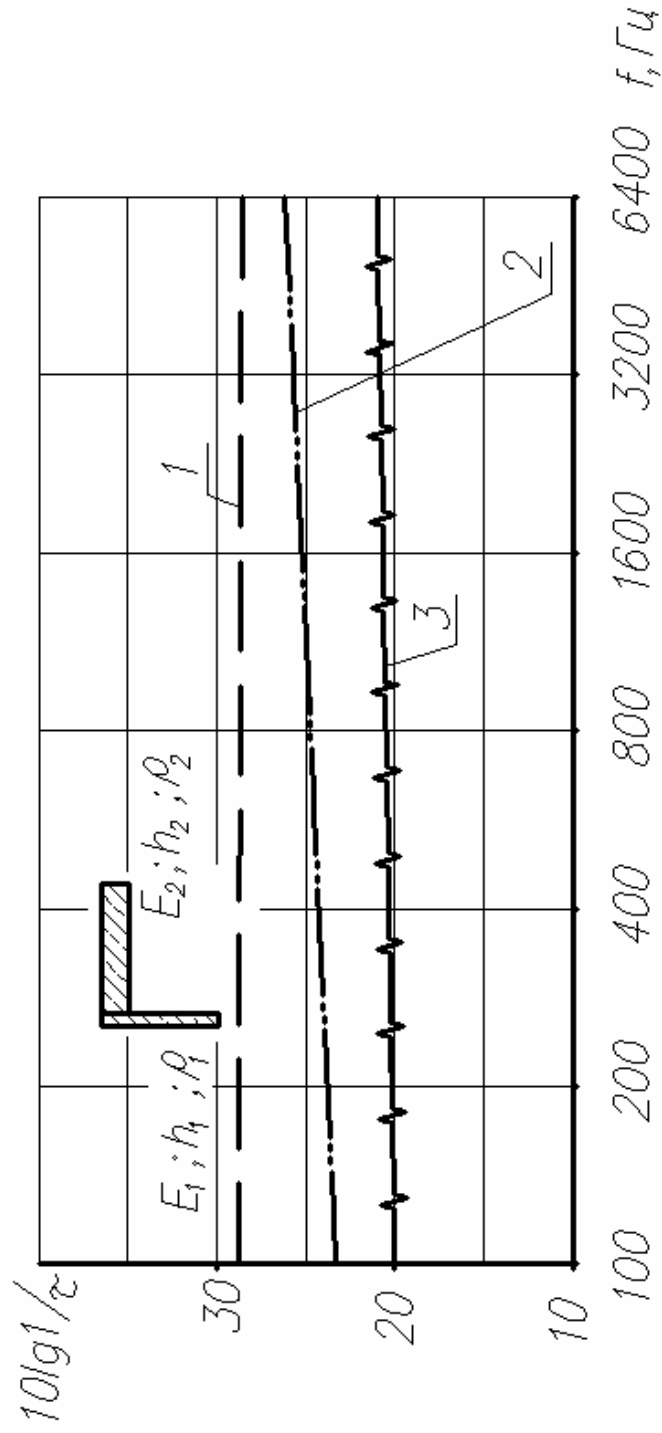


Рис.3.16. Изоляция изгибных колебаний угловым соединением:

панель № 1 – легкий бетон; $h_1 = 0,07 \text{ м}$; $\rho_1 = 300 \text{ кг/м}^3$;

панель № 2 – тяжелый бетон; $\rho_2 = 2300 \text{ кг/м}^3$; $E_2 = 2,8 \cdot 10^{10} \text{ н/м}^2$; $h_2 = 0,15 \text{ м}$

Эффект изменения изоляции от свойств легкого бетона:

1 – $E_1 = 2,0 \cdot 10^8 \text{ н/м}^2$; 2 – $E_1 = 5,0 \cdot 10^8 \text{ н/м}^2$; 3 – $E_1 = 1,35 \cdot 10^9 \text{ н/м}^2$

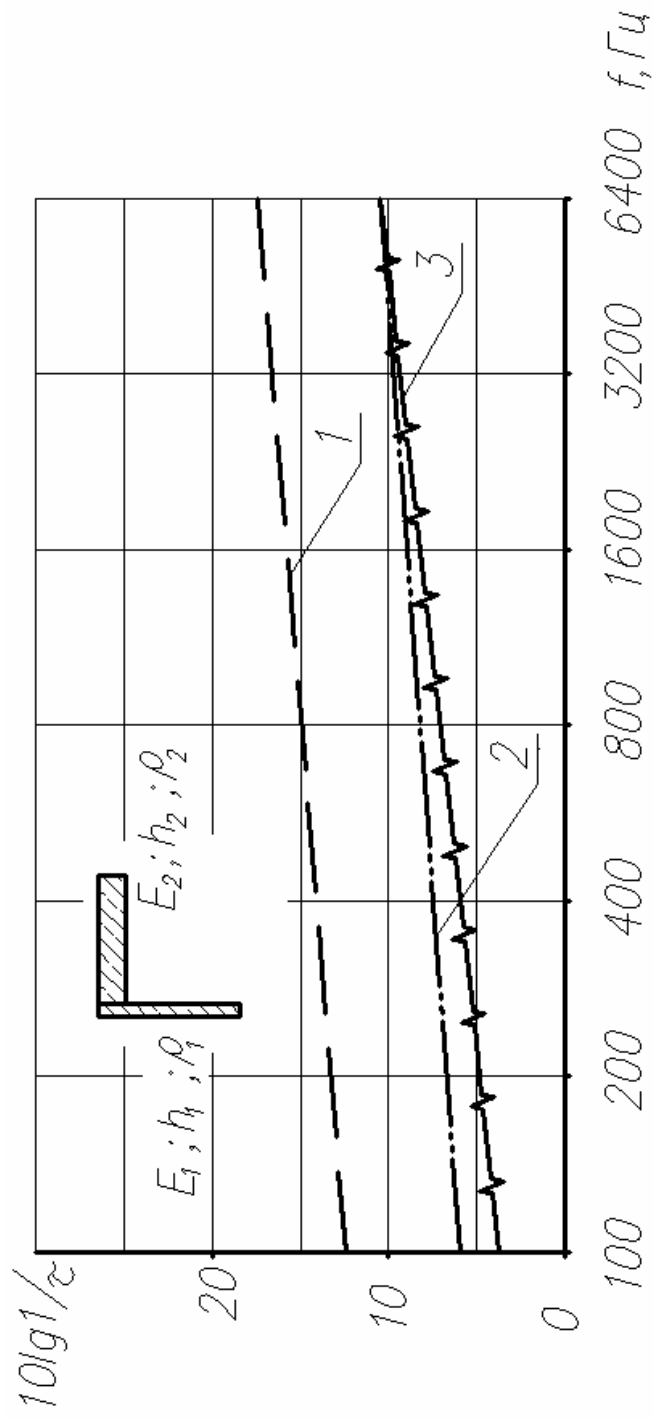


Рис.3.17. Изоляция изгибных колебаний угловым соединением:
 панель № 1 – тяжелый бетон; $\rho_2 = 2300 \text{ кг/м}^3$; $E_2 = 2,8 \cdot 10^{10} \text{ н/м}^2$;
 панель № 2 – тяжелый бетон; $\rho_2 = 2300 \text{ кг/м}^3$; $E_2 = 2,8 \cdot 10^{10} \text{ н/м}^2$; $h_2 = 0,15 \text{ м}$
 Эффект изменения изоляции от толщины h_1 :
 1 – $h_1 = 0,05 \text{ м}$; 2 – $h_1 = 0,1 \text{ м}$; 3 – $h_1 = 0,15 \text{ м}$

Степень соответствия расчетных моделей, а вместе с ними результатов приведенных выше расчетов с действительными физическими процессами (трансформация упругих волн из изгибных в продольные и наоборот при переходе через жесткие соединения элементов строительных конструкций), имеющими место быть при косвенной передаче звуковой энергии, может быть определена на основе сопоставления расчетных значений с экспериментальными.

Выводы

1. На основе модифицированного метода сосредоточенных параметров разработаны физические и математические модели прохождения звука через легкое ограждение и угловое соединение, как наиболее общее и характерное сопряжение строительных конструкций; оно включает все закономерности, присущие подобным сопряжениям двух и более элементов.

2. В ходе исследования резонансного режима колебаний пластин получена зависимость снижения изоляции шума легкими ограждениями при жестком и упругом (через прокладки) закреплении контура с учетом потерь энергии на трение в материале ограждения (η_m) и излучение ($\eta_{из}$). Последний фактор очевиден: чем тоньше колеблющаяся конструкция, тем интенсивнее происходит потеря энергии на преодоление трения о соприкасающийся с поверхностью слой воздуха.

3. Анализ эксперимента и расчетов показывает, что изоляция стыков зависит от направления распространения энергии колебаний, геометрических и физико-механических параметров сопрягаемых элементов.

4. Расчеты хорошо согласуются с результатами экспериментов. Это свидетельство того, что распространение упругих колебаний через соединение строительных конструкций возможно представлять на предложенных моделях из дискретных элементов.

4. ИНЖЕНЕРНЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ИЗОЛЯЦИИ ВОЗДУШНОГО ШУМА ЛЕГКИМИ ОГРАЖДЕНИЯМИ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ ЗАКРЕПЛЕНИЯ ПО КОНТУРУ, А ТАКЖЕ ЗВУКОВОЙ ВИБРАЦИИ УГЛОВЫМИ СОЕДИНЕНИЯМИ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

4.1. Изоляция воздушного шума легкими ограждениями с учетом влияния краевых условий

Звукоизолирующая способность, как было выяснено в работах [16, 54, 67, 78], определяется не только физико-механическими и геометрическими характеристиками, но и параметрами примыкающих конструкций и условий закрепления по контуру [27, 44].

В работах [12, 51, 52] были рассмотрены вопросы излучения и изоляции воздушного шума пластинами конечных размеров при их свободном, жестком, шарнирном, упругом опирании по контуру. Однако количественная сторона вопроса каждый раз оставалась за рамками исследований.

Как уже указывалось, в современном строительстве стыки сопряжения легких ограждений могут решаться в различных вариантах: от жесткого, монолитного до соединения через размещенные в них упругие материалы. Но введение упругих прокладок снижает собственную изоляцию ограждения в сравнении с монолитным соединением. Это необходимо учитывать при проектировании.

Основным критерием деления на упругое и жесткое соединения служит частота собственных колебаний системы типа «приведенная масса пластины – упругость – приведенная масса примыкающей конструкции» с линейной жесткостью $K = E \cdot F \cdot h^{-1}$ и вычисляемой по формуле (3.13).

Проведенная работа позволила разработать универсальный метод расчета для обоих случаев закрепления краев легкого ограждения на основе модифицированного метода сосредоточенных параметров.

Предполагаем, что звукоизоляция легких ограждений изменяется по закону массы с учетом потерь на внутреннее трение, излучение и условий закрепления по контуру. Тогда последовательность расчета спектра изоляции воздушного шума будет представляться в следующем виде:

1. Заносятся в таблицу исходные данные расчета: объемные массы материалов ограждения и примыкающей конструкции, их геометрические размеры (ширина, толщина), модули упругости обоих материалов, коэффициент потерь на внутреннее трение в материале ограждения.

2. Определяется режим работы (масса, упругость, волновод) каждого элемента на пути распространения колебаний по формуле (3.1).

3. Если соединение конструкций осуществляется через упругие элементы, то вычисляется частота собственных колебаний системы « приведенная масса ограждения – упругость – приведенная масса примыкающей конструкции » по формуле (3.13).

4. Диапазон частот следует разделить на области, в каждой из которых можно было бы выделить свой механизм прохождения звука через ограждение или примыкающие конструкции. В общем случае для легких ограждений, как и для массивных, выделяют две области:

- до граничной частоты $f_i \leq f_{гр}$;
- выше граничной частоты $f_i > f_{гр}$.

Это вызвано тем, что на частотах $f_i \leq f_{гр}$ падающая волна возбуждает колебания в ограждении; импульс движения передается массе ограждения и воздуха, соприкасающегося с ним. Это же определяет характер звукоизоляции, которая подчиняется весовому закону с некоторой поправкой ΔL , дБ на резонансы, вычисляемой по формуле (3.16).

Если частота собственных колебаний f_o и частота падающего звука f_i приходят в соответствие, при котором $1,4f_o \leq f_i < f_{гр}$, тогда необходимо внести изменения в расчетные коэффициенты согласно формулы (3.14).

5. На частотах $f_i > f_{гр}$ падающая звуковая волна возбуждает одновременно две волны: одну в ограждении, другую в среде за ним. Характер изоляции в этой области подчинен пространственно- частотным резонансам, плотность которых быстро возрастает с текущей частотой; снижение изоляции на резонансах учитывается поправкой ΔL , дБ, в которой коэффициенты отражения должны быть рассчитаны по формуле (3.15), а изолирующая способность ограждения – по формуле (3.9).

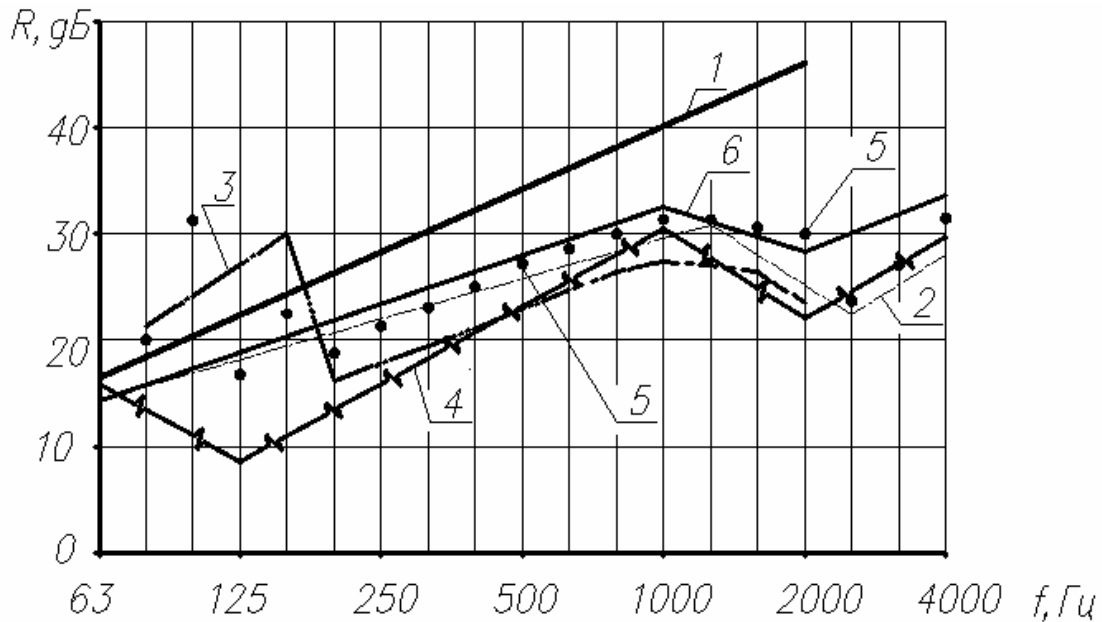
Пример расчета
изоляции воздушного шума ограждением из дюралюминия

Таблица 4.1

Материалы	ρ , кг/м ³	$m_{пр}$, кг/м ²	b , м	h , м	η_m	E , Н/м ²	$C_{пр}$, м/с
Дюралюминий	2800	14,0	1,08	0,005	0,003	$7 \cdot 10^{10}$	5000
Кирп. кладка	1800	684	1,08	0,38	0,01	$1,6 \cdot 10^{10}$	2981
Частота, Гц	63	125	250	500	1000	2000	4000
$\lambda_{пр}$, м	0,845	0,6	0,424	0,3	0,242	0,15	0,106
m/β	2/0,99	3/0,99	5/0,99	7/0,99	10/0,99	14/0,99	20/0,99
$\eta_m (f_i \leq f_{гр})$	0,102	0,0449	0,02	0,0085	0,0037		
$\eta_m (f_i > f_{гр})$						0,0146	0,0064
$a = e^{-\pi(\eta_m + \eta_{пр})}$	0,718	0,86	0,931	0,966	0,98	0,9460	0,971
ΔL , дБ	2,76	3,99	4,88	6,39	7,09	1,96	2,78
R , дБ	14,2	18,9	24,0	28,5	33,8	29,0	34,2

Частотной характеристики звукоизоляции рассмотренного примера представлена на рис.4.1а). Предлагаемый метод расчета позволяет строить октавные спектры изоляции воздушного шума, производить оценку звукоизолирующей способности легких ограждений (рис. 4.1б–4.9).

а



б

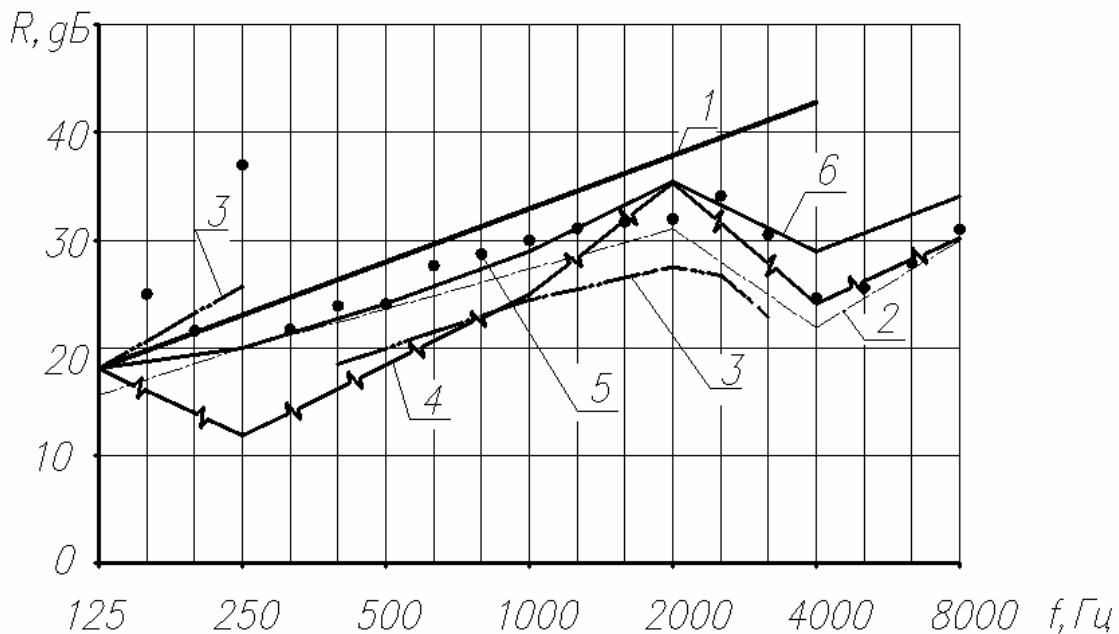
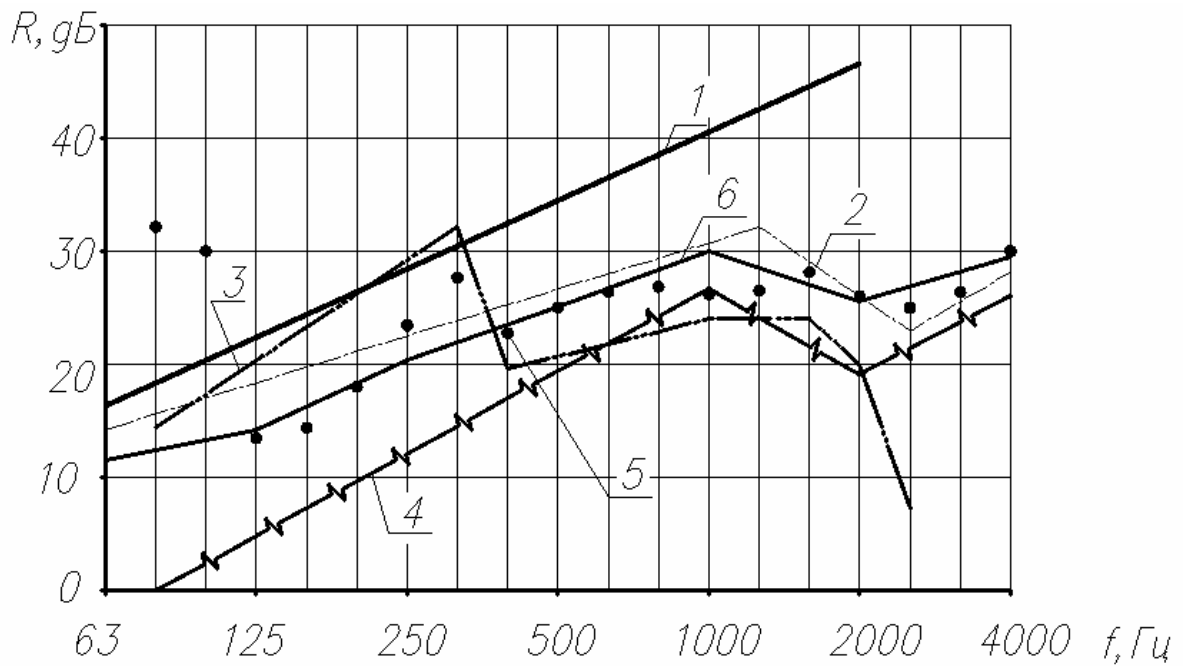


Рис.4.1. Изоляция воздушного шума пластиной из дюралюминия размерами $1,2 \cdot 1,08 \text{ м}^2$ толщиной $0,005 \text{ м}$ (а) и $1,02 \cdot 0,48 \text{ м}^2$ толщиной $0,003 \text{ м}$ (б):

1 – расчет по формуле (3.6); 2 – расчет по методике [55]; 3 – расчет по методике [53]; 4 – расчет по формулам (3.6) и (3.9) без учета потерь энергии на излучение; 5 – эксперимент [4]; 6 – расчет по предлагаемой методике: жесткое(а) и упругое(б) соединение периметра пластин при проведении экспериментов

а



б

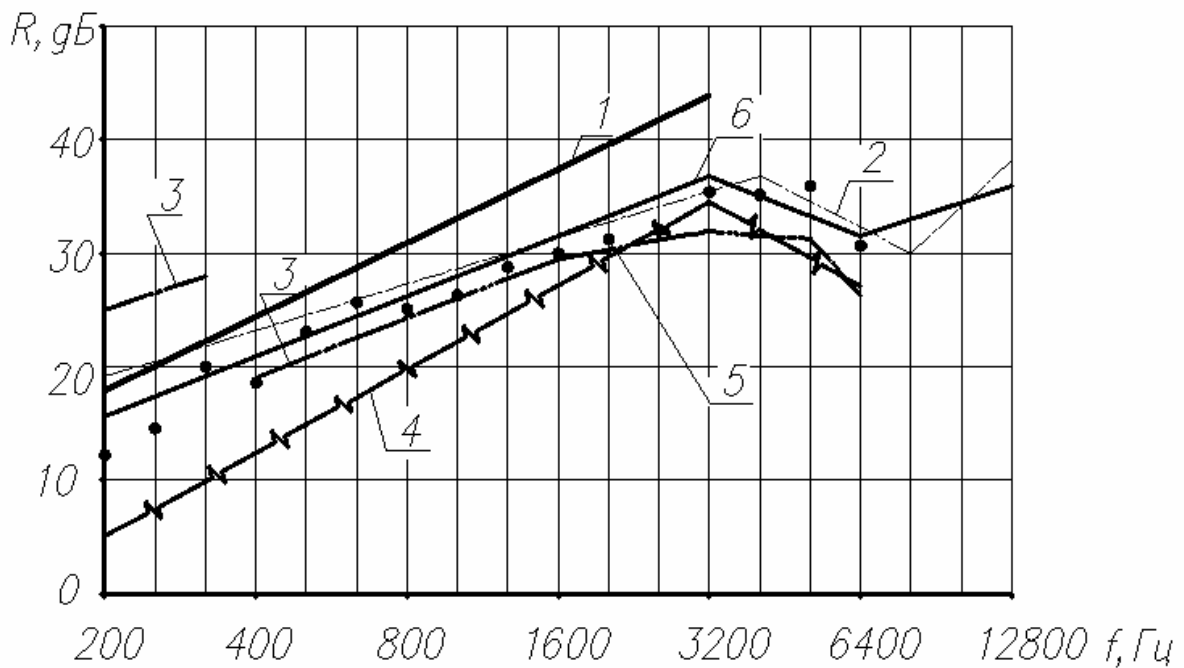
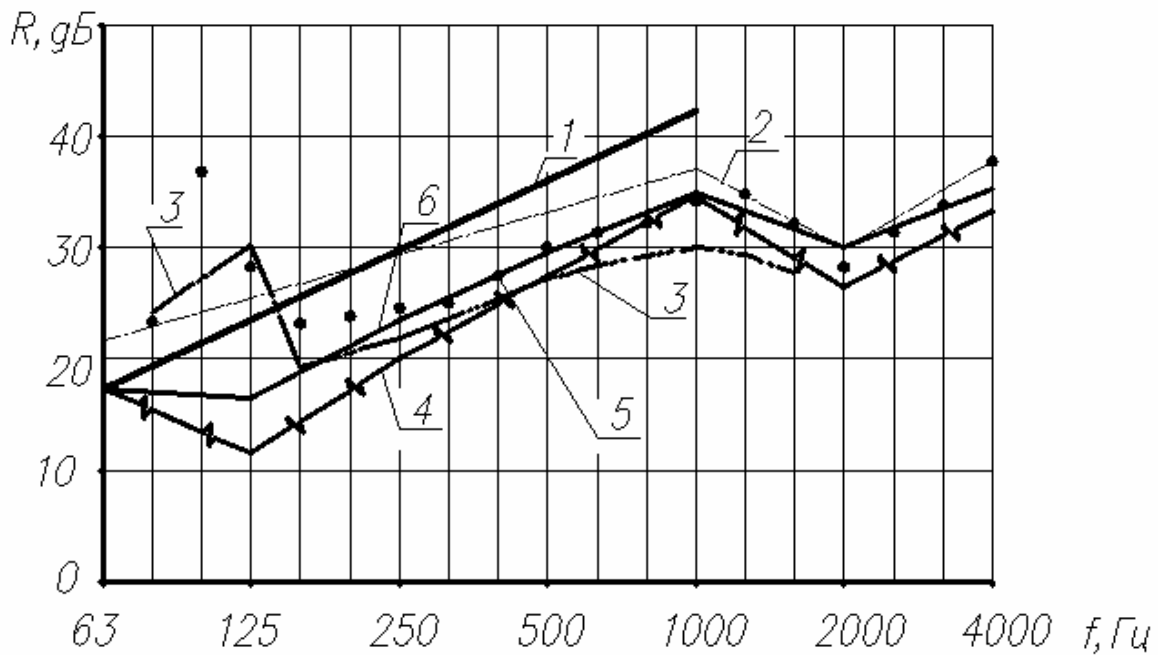


Рис.4.2. Изоляция воздушного шума пластиной из дюралюминия размерами $0,54 \cdot 0,5 \text{ м}^2$ толщиной $0,005 \text{ м}$ (а) и пластиной из оргстекла $1,02 \cdot 0,48 \text{ м}^2$ толщиной $0,0042 \text{ м}$ (б):

1 – расчет по формуле (3.6); 2 – расчет по методике [55]; 3 – расчет по методике [53]; 4 – расчет по формулам (3.6) и (3.9) без учета потерь энергии на излучение; 5 – эксперимент [4] (а) и [54](б); 6 – расчет по предлагаемой методике: жесткое соединение периметра пластин для обоих экспериментов

а



б

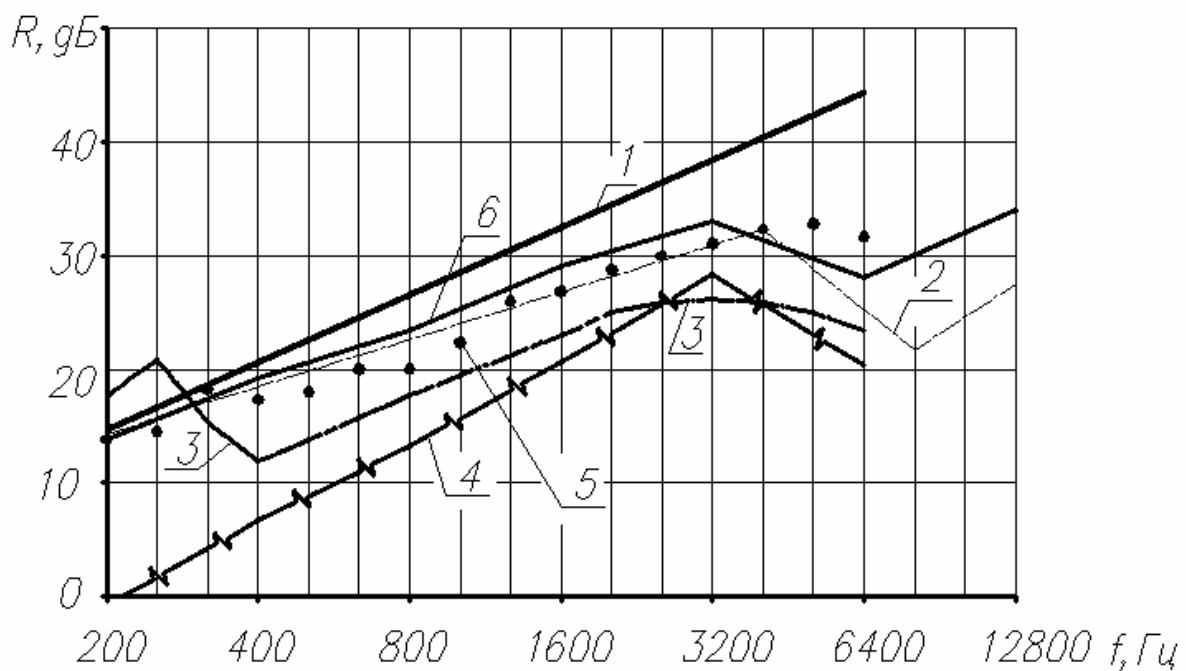
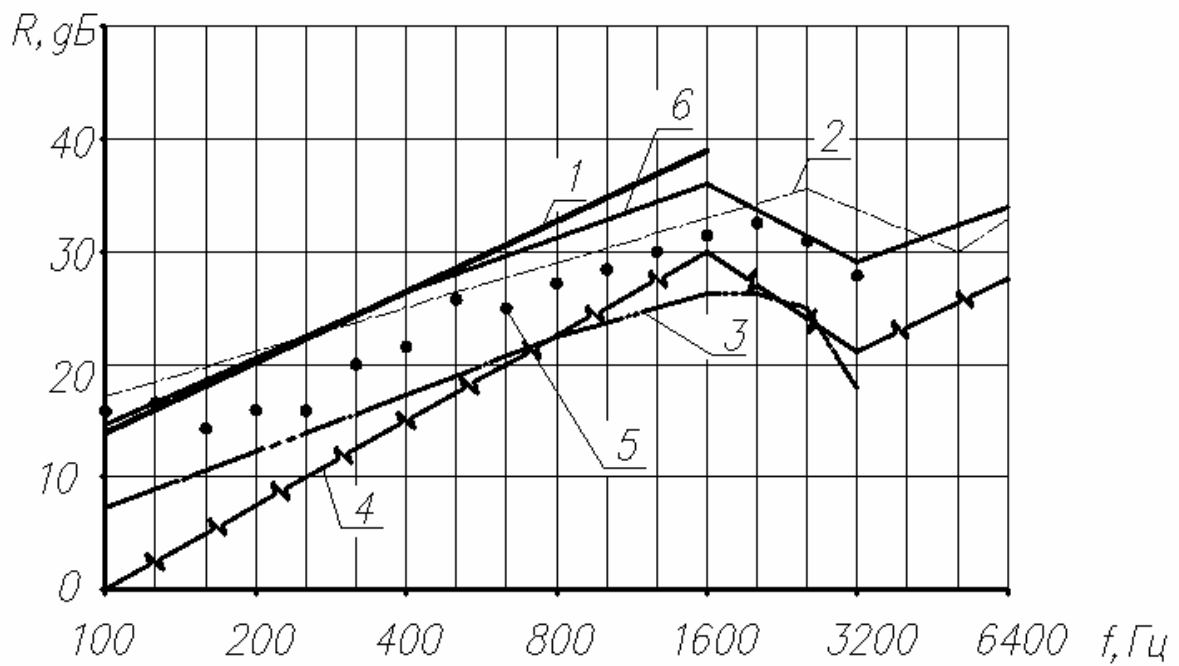


Рис.4.3. Изоляция воздушного шума пластиной из оргстекла размерами $1,2 \cdot 1,08 \text{ м}^2$ толщиной $0,015 \text{ м}$ (а) и пластиной из алюминия $1,02 \cdot 0,48 \text{ м}^2$ толщиной $0,0015 \text{ м}$ (б):

1 – расчет по формуле (3.6); 2 – расчет по методике [55]; 3 – расчет по методике [53]; 4 – расчет по формулам (3.6) и (3.9) без учета потерь энергии на излучение; 5 – эксперимент [4] (а) и [54] (б); 6 – расчет по предлагаемой методике: жесткое соединение периметра пластин для обоих экспериментов

а



б

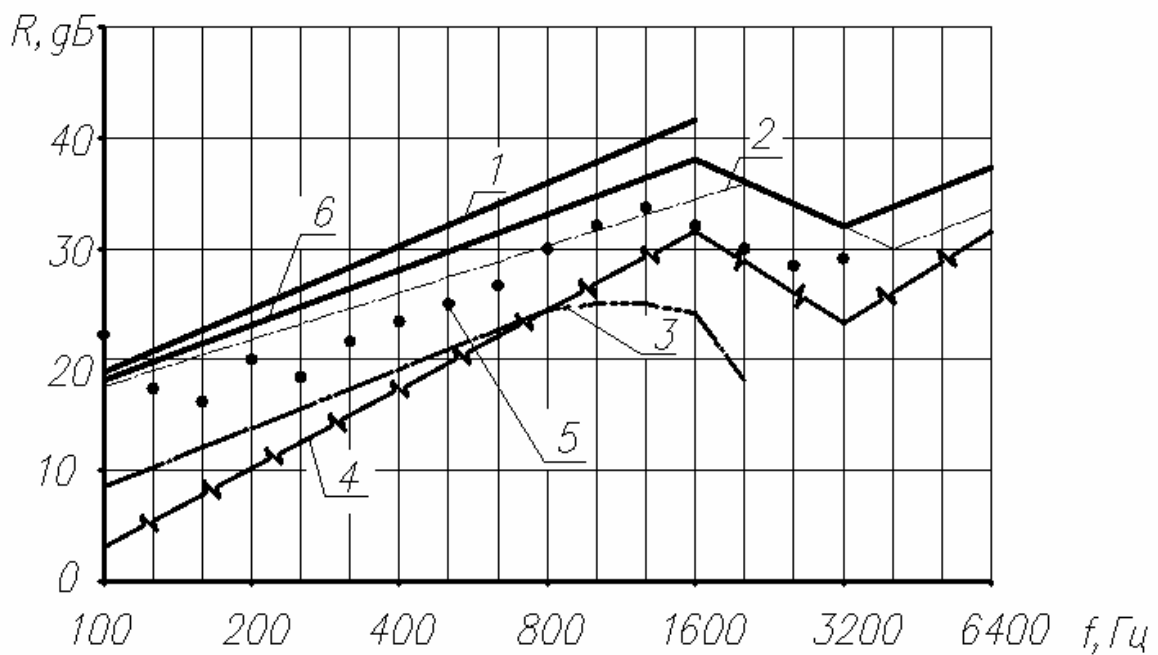
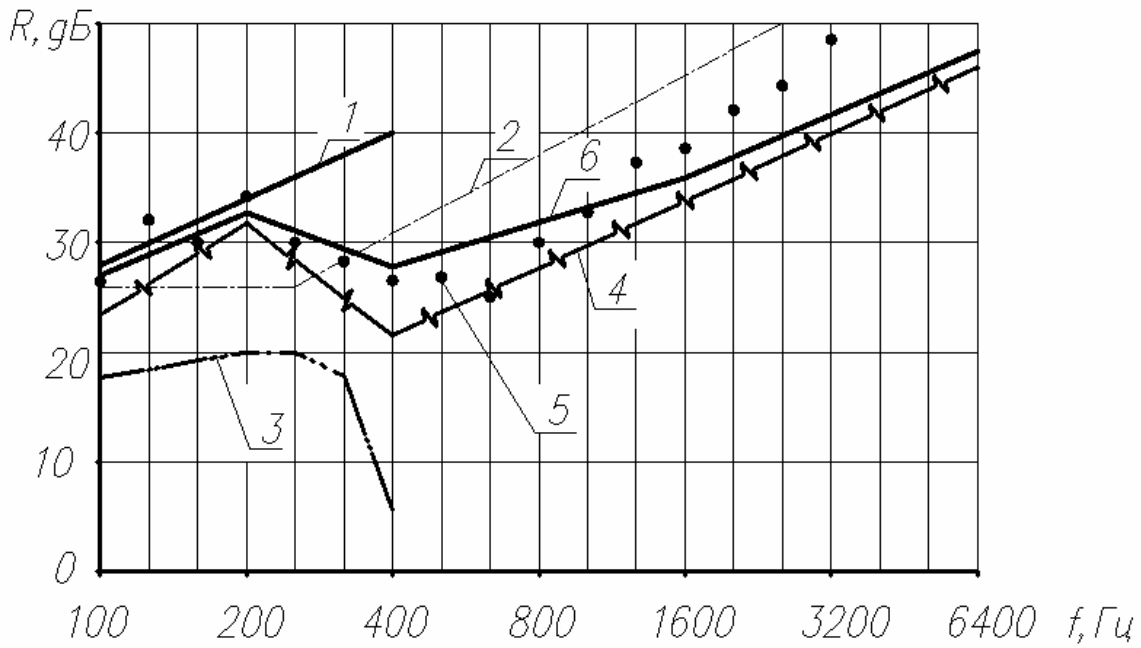


Рис.4.4. Изоляция воздушного шума пластиной из гипса
толщиной 0,007 м(а) и толщиной 0,01 м(б):

1 – расчет по формуле (3.6); 2 – расчет по методике [55]; 3 – расчет по методике [53]; 4 – расчет по формулам (3.6) и (3.9) без учета потерь энергии на излучение; 5 – эксперимент [61] (а) и [61](б); 6 – расчет по предлагаемой методике: жесткое соединение периметра пластин для обоих экспериментов

а



б

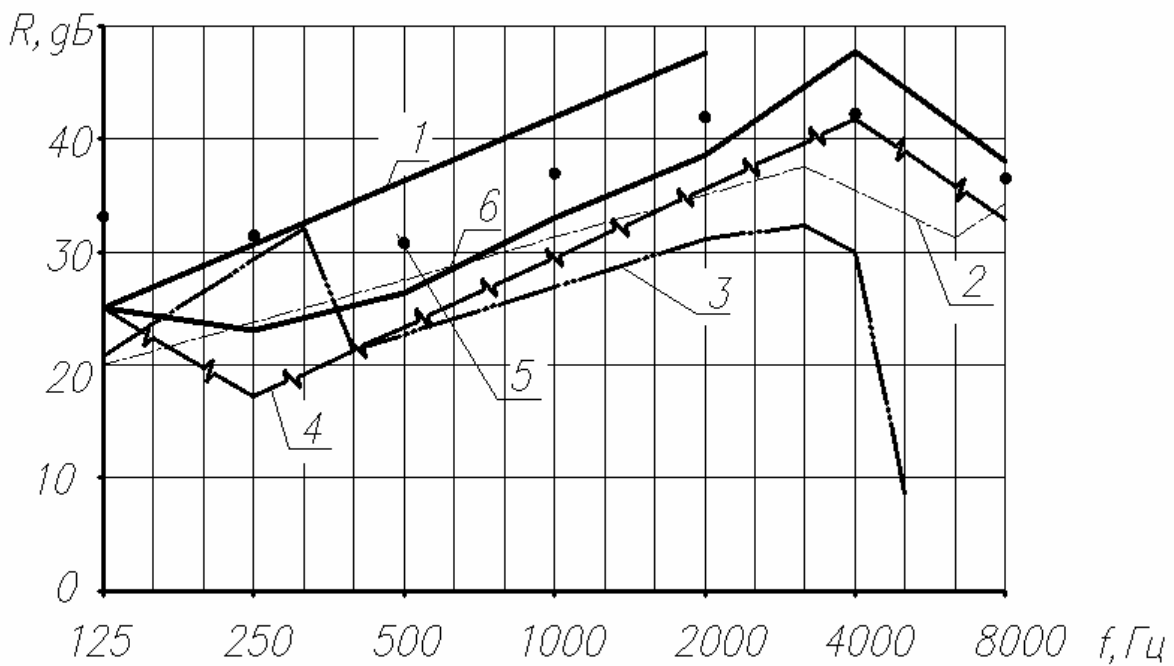
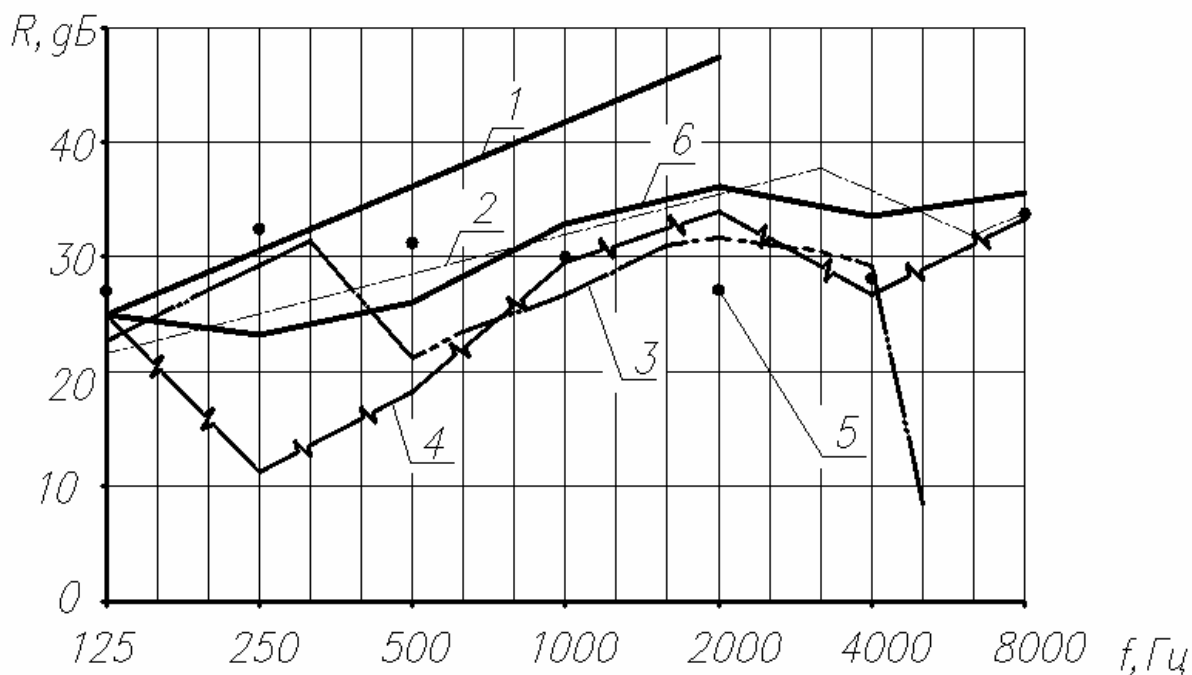


Рис.4.5. Изоляция воздушного шума пластиной из гипса толщиной 0,07 м(а) и из стали размерами 0,74 · 0,47 м² толщиной 0,0021 м(б):
 1 – расчет по формуле (3.6); 2 – расчет по методике [55];
 3 – расчет по методике [53]; 4 – расчет по формулам (3.6) и (3.9) без учета потерь энергии на излучение; 5 – эксперимент [61] (а) и [27](б);
 6 – расчет по предлагаемой методике: жесткое соединение периметра пластин для обоих экспериментов

а



б

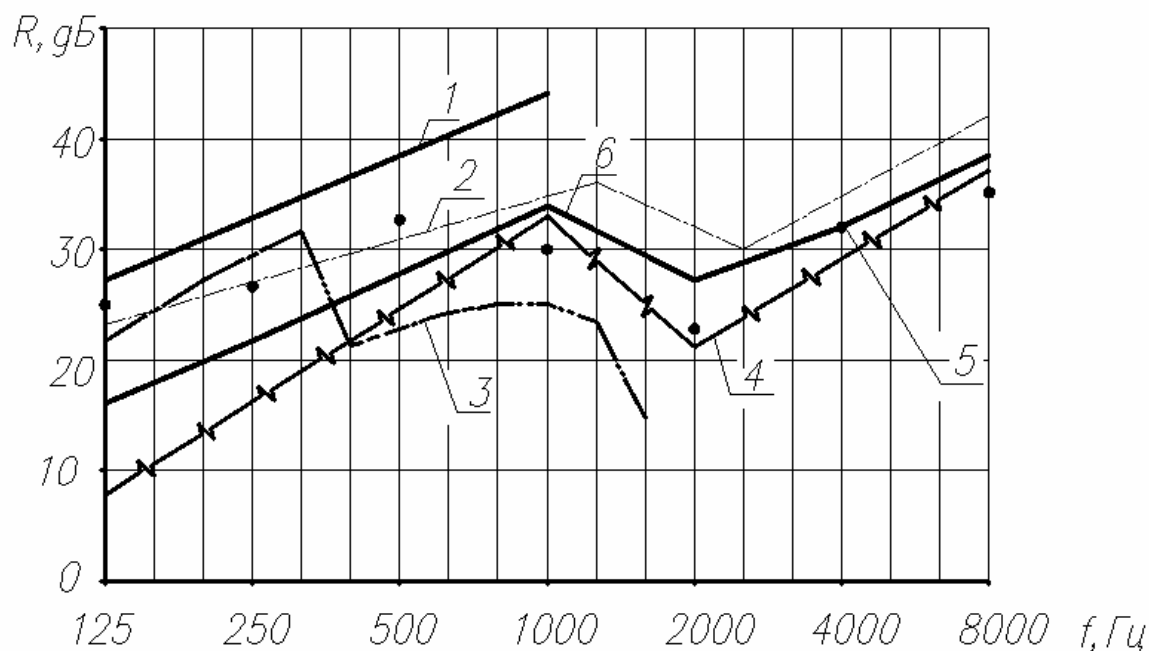
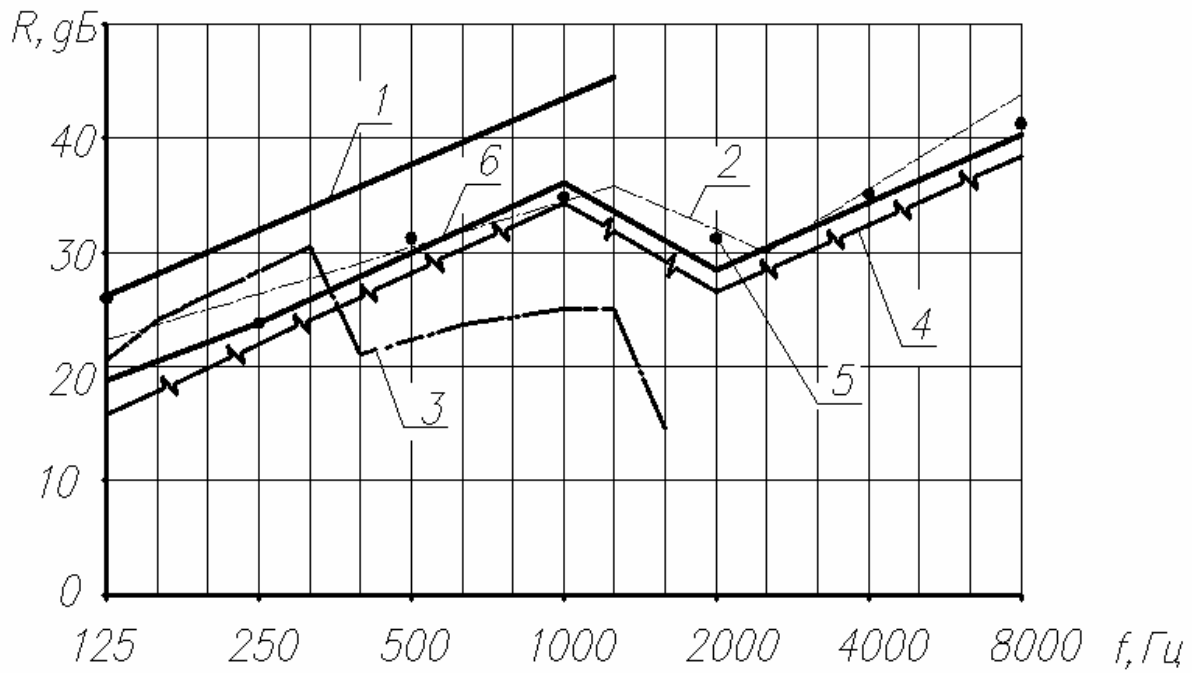


Рис.4.6. Изоляция воздушного шума пластиной из стали размерами $0,74 \cdot 0,47 \text{ м}^2$ толщиной $0,0021 \text{ м}$ (а) и из асбестоцемента размерами $0,74 \cdot 0,47 \text{ м}^2$ толщиной $0,009 \text{ м}$ (б):

1 – расчет по формуле (3.6); 2 – расчет по методике [55]; 3 – расчет по методике [53]; 4 – расчет по формулам (3.6) и (3.9) без учета потерь энергии на излучение; 5 – эксперимент [27] (а) и [27](б); 6 – расчет по предлагаемой методике: упругое соединение периметра пластин для обоих экспериментов

а



б

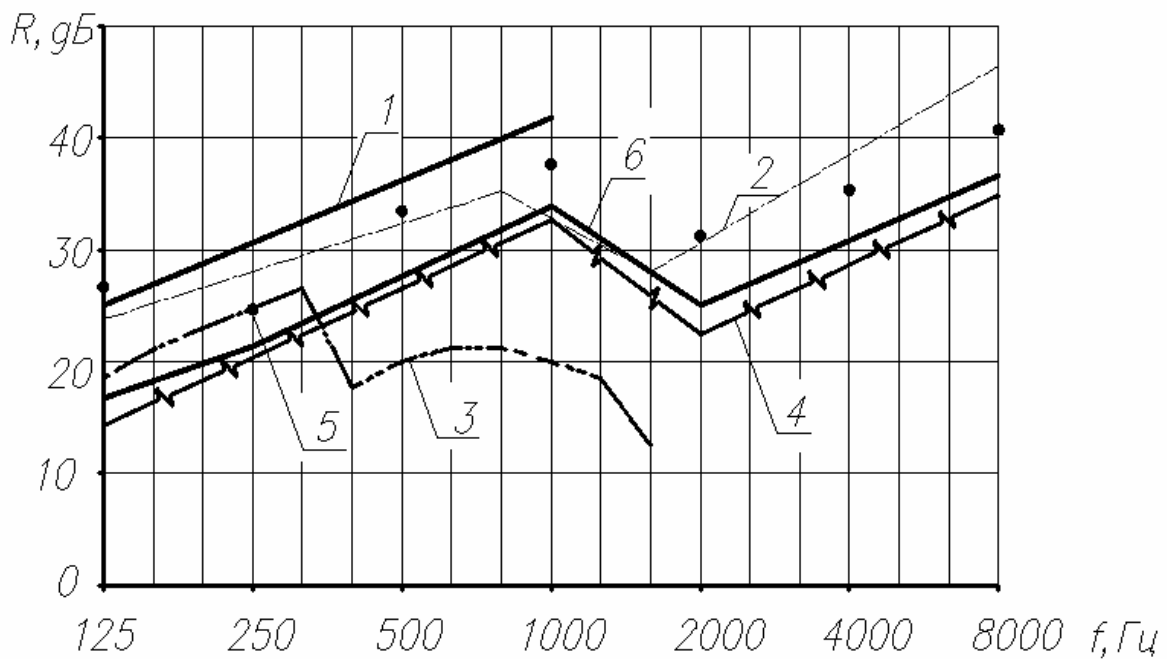
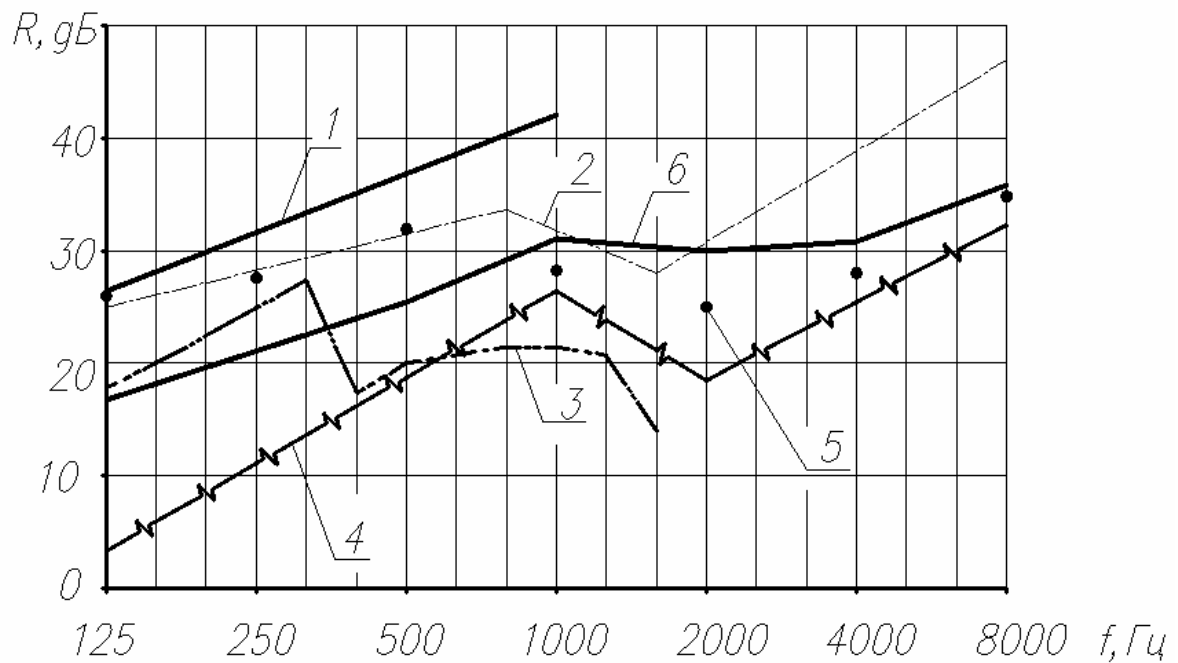


Рис.4.7. Изоляция воздушного шума пластиной из асбестоцемента размерами $0,74 \cdot 0,47 \text{ м}^2$ толщиной $0,009 \text{ м}$ (а)

и из стекла размерами $0,74 \cdot 0,47 \text{ м}^2$ толщиной $0,0071 \text{ м}$ (б):

1 – расчет по формуле (3.6); 2 – расчет по методике [55]; 3 – расчет по методике [53]; 4 – расчет по формулам (3.6) и (3.9) без учета потерь энергии на излучение; 5 – эксперимент [27] (а) и [27](б); 6 – расчет по предлагаемой методике: жесткое соединение периметра пластин для обоих экспериментов

а



б

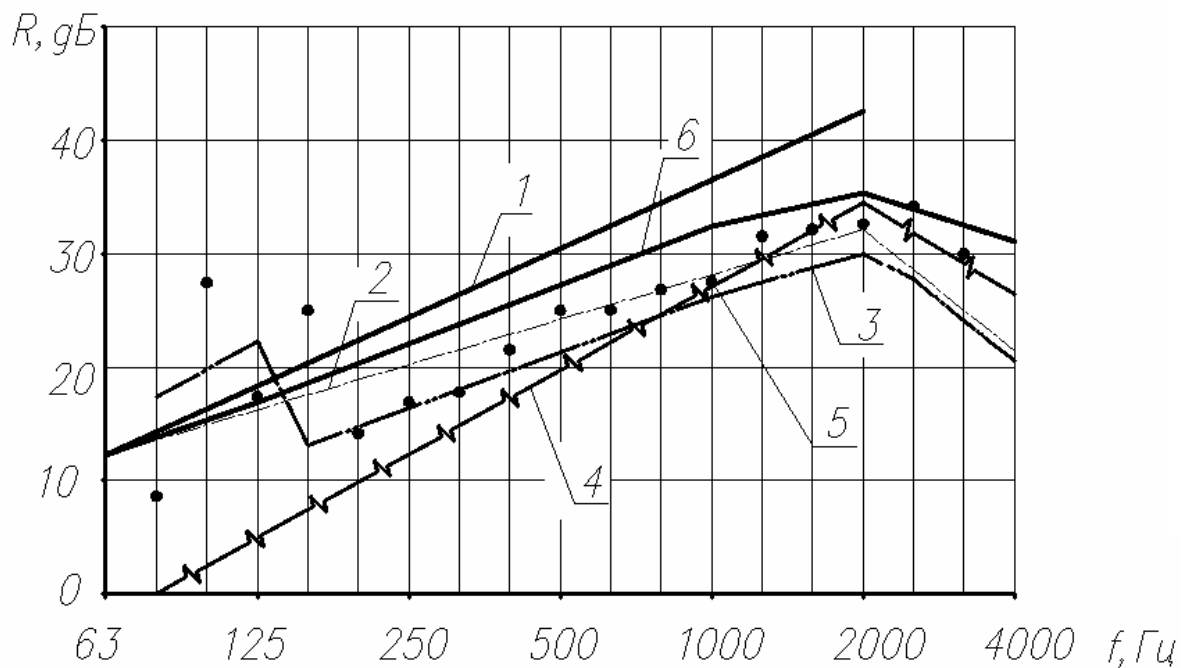
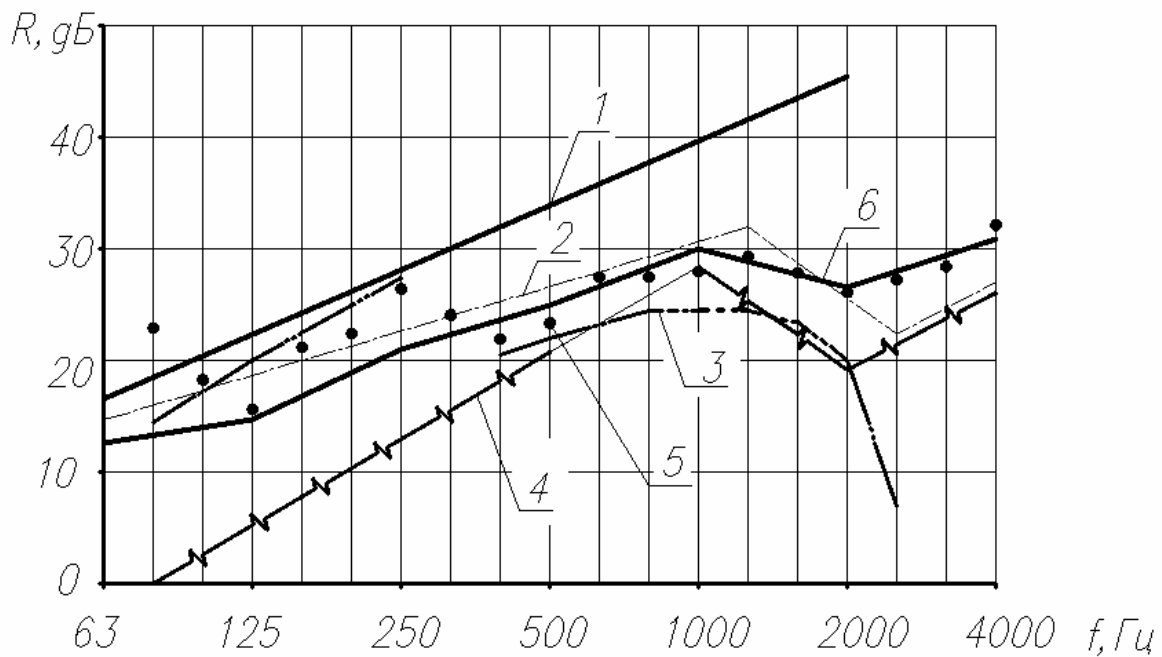


Рис.4.8. Изоляция воздушного шума пластиной из стекла
размерами $0,74 \cdot 0,47 \text{ м}^2$ толщиной $0,0071 \text{ м}$ (а)

и из стекла размерами $0,74 \cdot 0,47 \text{ м}^2$ толщиной $0,0071 \text{ м}$ (б):

1 – расчет по формуле (3.6); 2 – расчет по методике [55]; 3 – расчет по методике [53]; 4 – расчет по формулам (3.6) и (3.9) без учета потерь энергии на излучение; 5 – эксперимент [27] (а) и [4](б); 6 – расчет по предлагаемой методике: упругое (а) и жесткое(б) соединение периметра пластин при проведении экспериментов

а



б

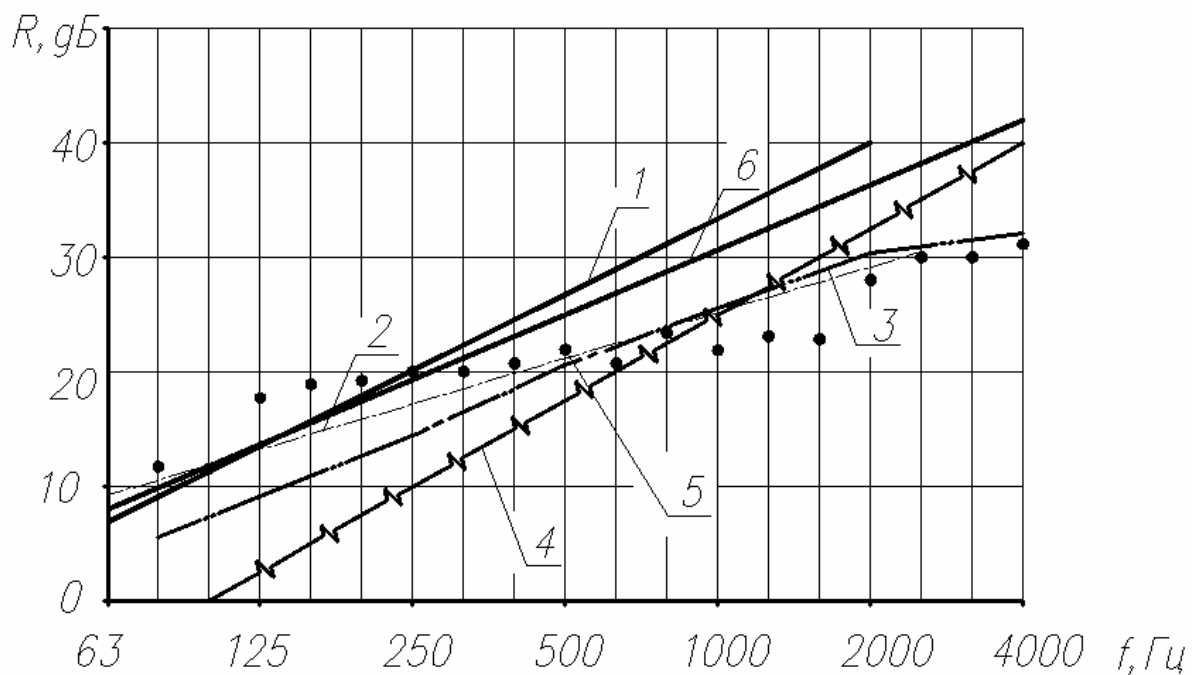


Рис.4.9. Изоляция воздушного шума пластиной из дюралюминия размерами $1,0 \cdot 0,5 \text{ м}^2$ толщиной $0,005 \text{ м}$ (а) и из алюминия размерами $2,5 \cdot 2,5 \text{ м}^2$ толщиной $0,002 \text{ м}$ (б):

1 – расчет по формуле (3.6); 2 – расчет по методике [55]; 3 – расчет по методике [53]; 4 – расчет по формулам (3.6) и (3.9) без учета потерь энергии на излучение; 5 – эксперимент [4] (а) и [42](б); 6 – расчет по предлагаемой методике: жесткое соединение периметра пластин для обоих экспериментов

4.2. Область применения расчетного метода

В настоящей работе рассматриваются однослойные ограждения, удовлетворяющие условию: $\lambda_{и} > 6h$, т.е. легкие ограждения, колебательное движение которых определяют изгибные волны. Однако с увеличением поверхностной плотности ограждения снижается влияние потерь энергии на излучение. Это естественно для массивных конструкций, колебания которых даже в резонансном режиме гораздо слабее, чем у легких ограждений. Поэтому естественная граница этими категориями конструкций может определяться способностью к излучению и характеризоваться величиной погрешности измерений прецизионной аппаратуры, равной 2 дБ. Она может быть получена из следующего выражения:

$$\Delta L (\eta_{и}, \eta_{и}) - \Delta L (\eta_{и}) \leq 2 \text{ дБ}, \quad (4.1)$$

где $\Delta L (\eta_{и}, \eta_{и})$ – снижение изоляции воздушного шума за счет потерь на трение в материале ограждения ($\eta_{и}$) и потерь на излучение ($\eta_{и}$);

$\Delta L (\eta_{и})$ – снижение изоляции воздушного шума за счет потерь на внутреннее трение в материале ограждения ($\eta_{и}$).

Верхняя граница расчетного метода соответствует поверхностной плотности ограждения $m_{и} = 100 \text{ кг/м}^2$. Для массивных конструкций $m_{и} \geq 100 \text{ кг/м}^2$ (рис.4.10–4.13) на частотах $f > f_{гр}$ не учитывается снижение изоляции, которое вычисляется при резонансных колебаниях по формуле (3.16); в то же время для легких ограждений ($m_{и} < 100 \text{ кг/м}^2$) эта величина существенная (см. рис. 4.1–4.9).

Применимость предлагаемого инженерного метода расчета практически не ограничена по частоте колебаний, так как для любого звукового диапазона частот можно подобрать расчетные модели передачи движения.

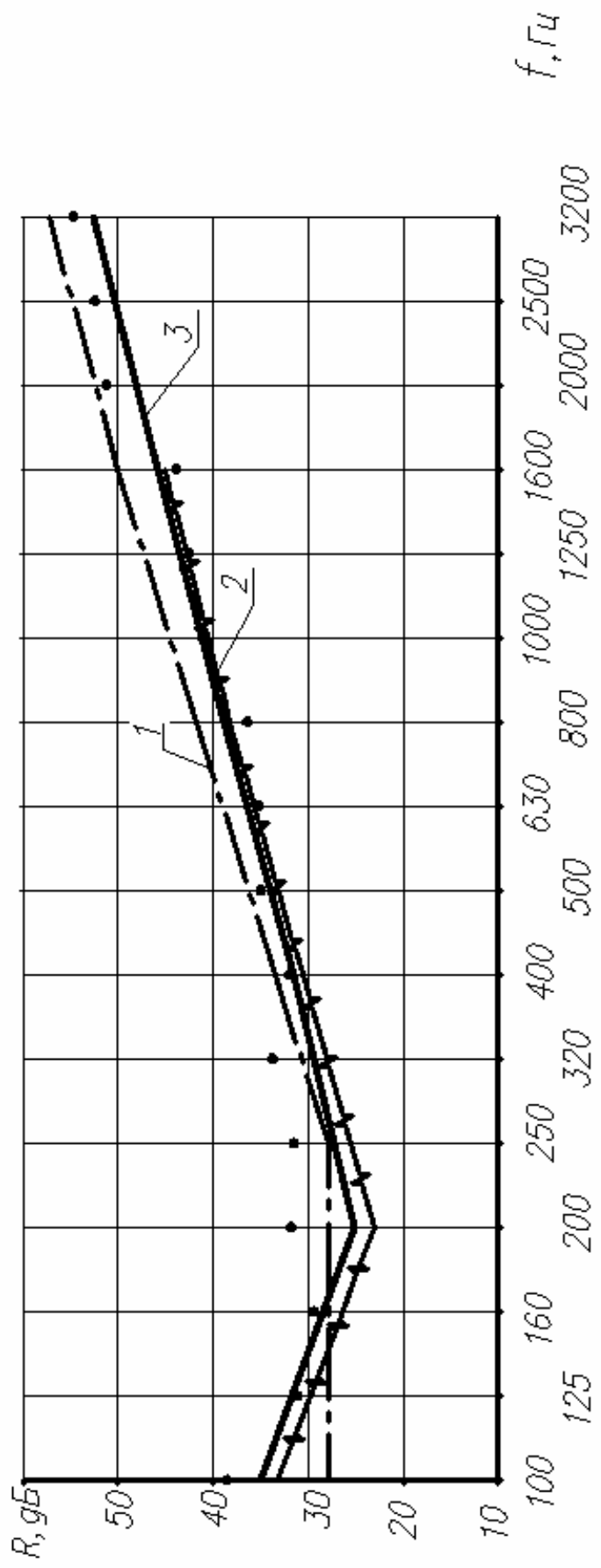


Рис.4.10. Изоляция воздушного шума стеновой панелью из газосиликатного бетона [61]
 при следующих характеристиках $m_n = 100 \text{ кг/м}^2$, $f_{гр} = 220 \text{ Гц}$:
 1 – расчет по методике (55); 2 – расчет по методике [25]; 3 – расчет по предлагаемой методике

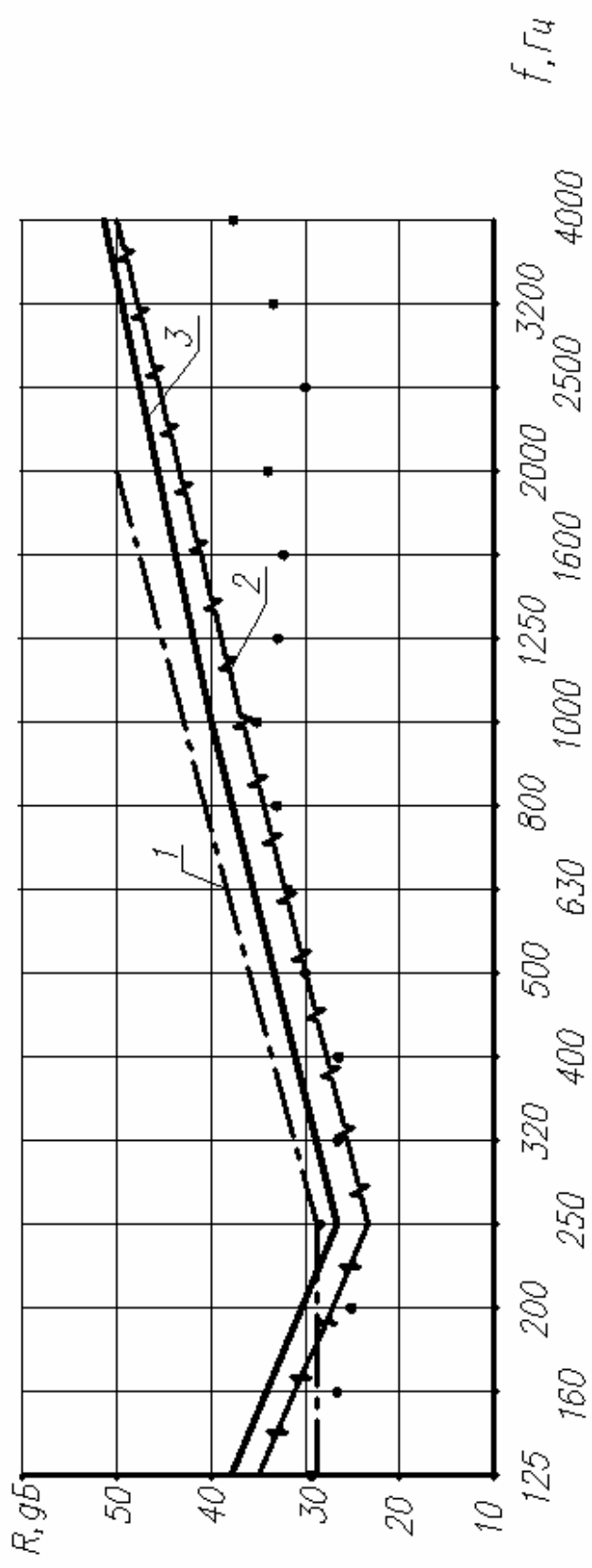


Рис.4.11. Изоляция воздушного шума стеновой панелью из гипсобетона [41] при следующих характеристиках $m_n = 104 \text{ кг/м}^2$, $f_{гр} = 328 \text{ Гц}$:
 1 – расчет по формуле (3.6); 2 – расчет по методике [55]; 3 – расчет по предлагаемой методике

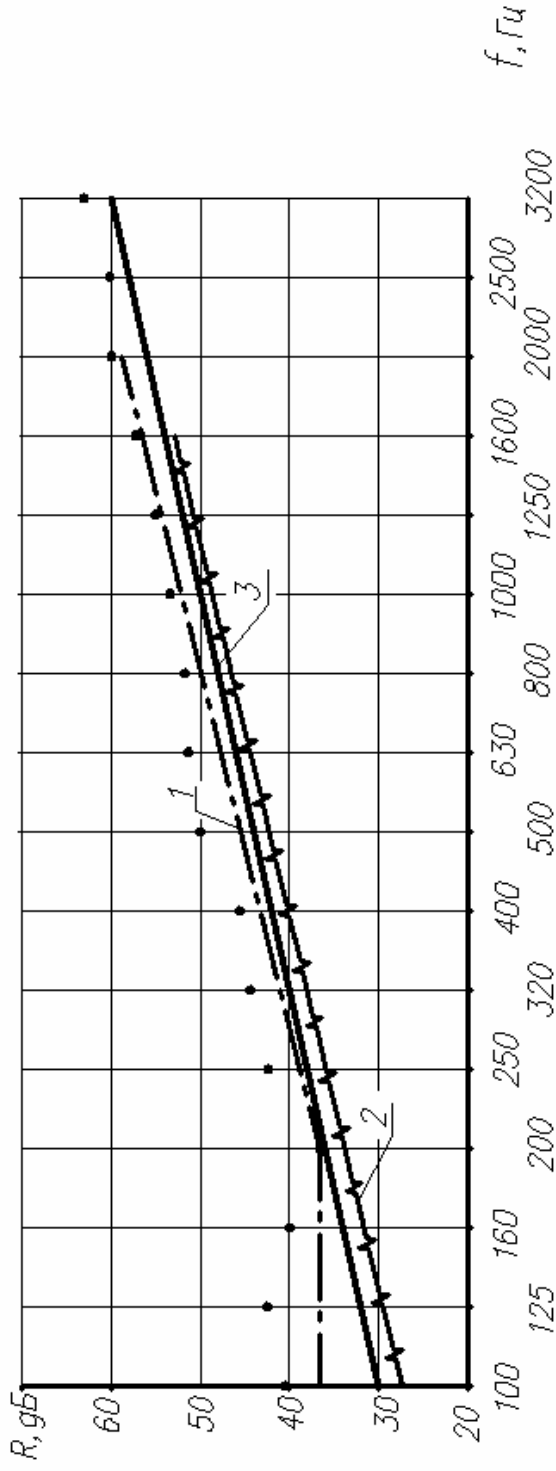


Рис.4.12. Изоляция воздушного шума стеновой панелью из керамзитобетона [31] при следующих характеристиках $m_n = 280 \text{ кг/м}^2$, $f_{гр} = 128 \text{ Гц}$:
 1 – расчет по методике (55); 2 – расчет по методике [25]; 3 – расчет по предлагаемой методике

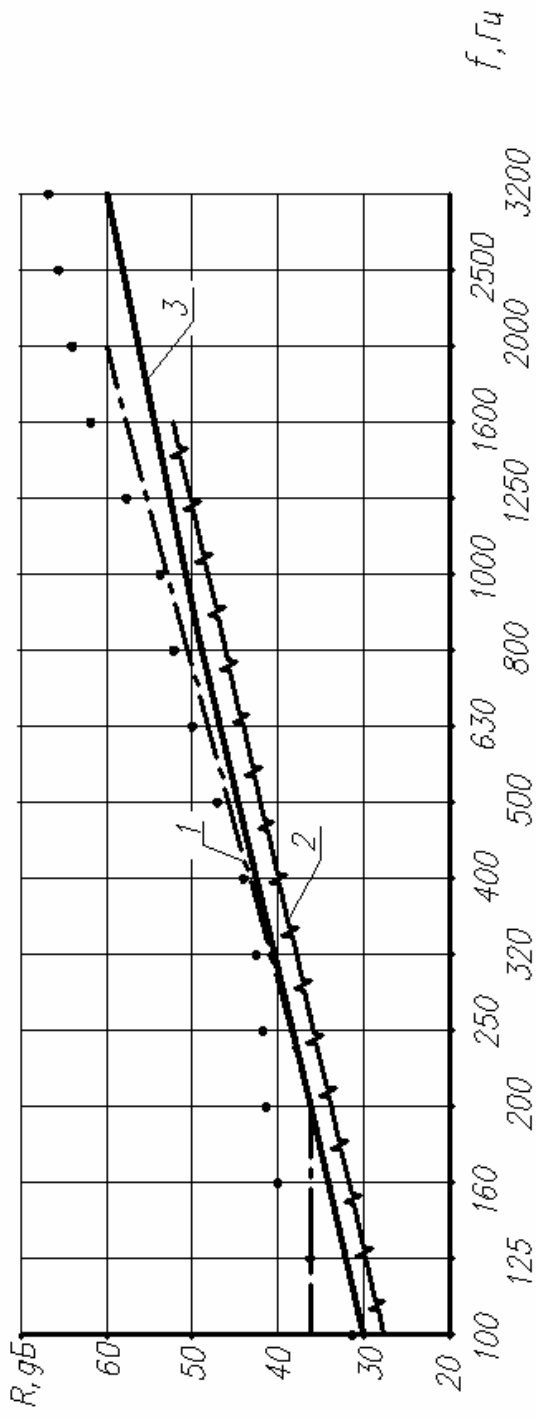


Рис.4.13. Изоляция воздушного шума стеновой панелью из легкого бетона [46]
 при следующих характеристиках $m_n = 270 \text{ кг/м}^2$, $f_{гр} = 132 \text{ Гц}$:
 1 – расчет по формуле (3.6); 2 – расчет по методике [55]; 3 – расчет по предлагаемой методике

4.3. Точность расчетного метода

Предлагаемый метод базируется на основополагающих законах сохранения энергии, импульса, момента количества движения. Исходя из этого, степень точности решений определяется тем, насколько полно и точно в уравнениях законов сохранения отождествлены параметры движения и величины масс, совершающих это движение.

В соответствии с рекомендациями [9] проведена статистическая обработка результатов лабораторных и натурных измерений на рис.4.1–4.9; её аналитическая часть представлена в табл.4.2.

Т а б л и ц а 4 . 2

Диапазон частот, Гц	Метод [53], %	Метод [55], %	Предлагаемый метод, %	Объем выборки (количество точек)
1	2	3	4	5
$f < 320$	30	54	60	76
$320 < f < 800$	20	48	61	54
$f > 800$	36	58	64	53

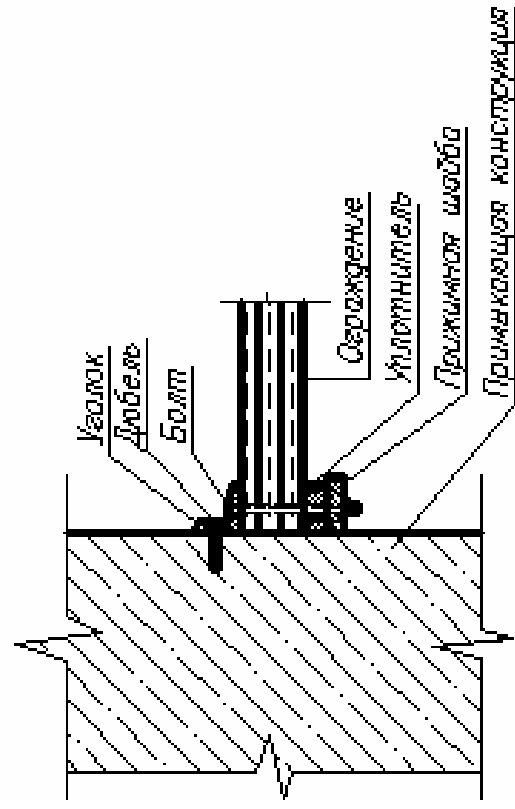
4.4. Рекомендации по конструированию узлов сопряжения легких ограждений

В практике конструирования узлов сопряжения легких ограждающих конструкций сложилось несколько вариантов, которые можно разделить на два основных – жесткий и через упругие прокладки.

Жесткое сопряжение характеризуется геометрической неизменяемостью; его линейная жесткость $K \rightarrow \infty$. Упругое сопряжение отличается податливостью и низкой (от 10 до 100 Гц) частотой собственных колебаний f_0 ; при колебаниях пластины её края также будут подвергаться перемещению. Имеющая место виброизоляция стыковочного узла будет способствовать «запиранию» энергии падающей звуковой волны в ограждении. Это естественным образом приведет к усилению колебаний, что тождественно снижению звукоизолирующей способности. Вывод следует из экспериментальных исследований М.С.Седова [51]. Поэтому рекомендуется использовать упругие прокладки исключительно в качестве уплотнителей, герметизирующих жесткие соединения легких ограждений с примыкающими конструкциями.

Конструктивное решение одного типа узлов сопряжения легкого ограждения представлено в работе [45], а возможные варианты показаны на рис. 4.14.

1.



2.

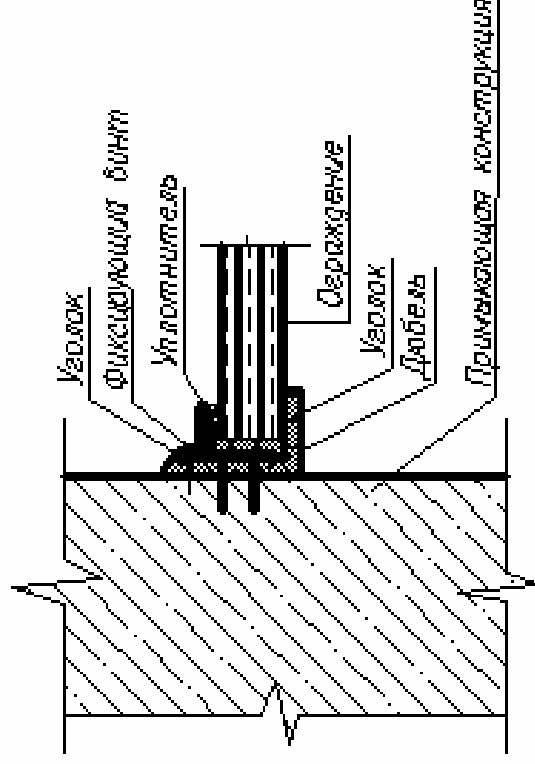
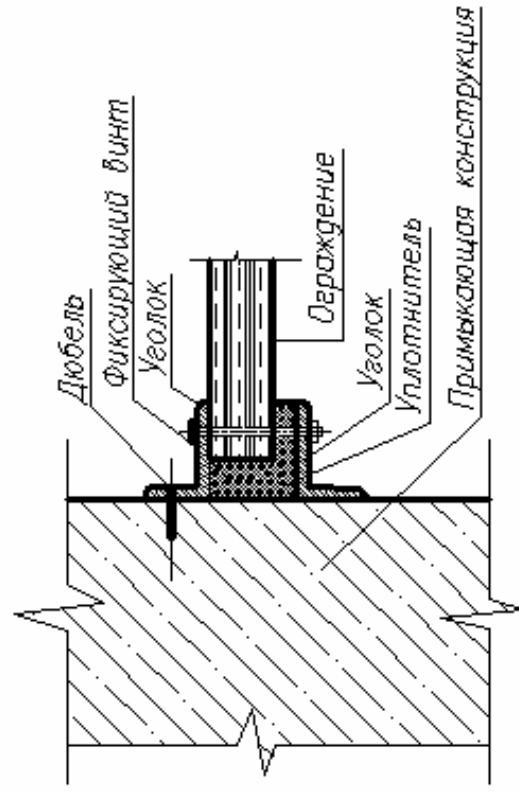


Рис.4.14. Варианты соединения легкого ограждения (начало)

3.



4.

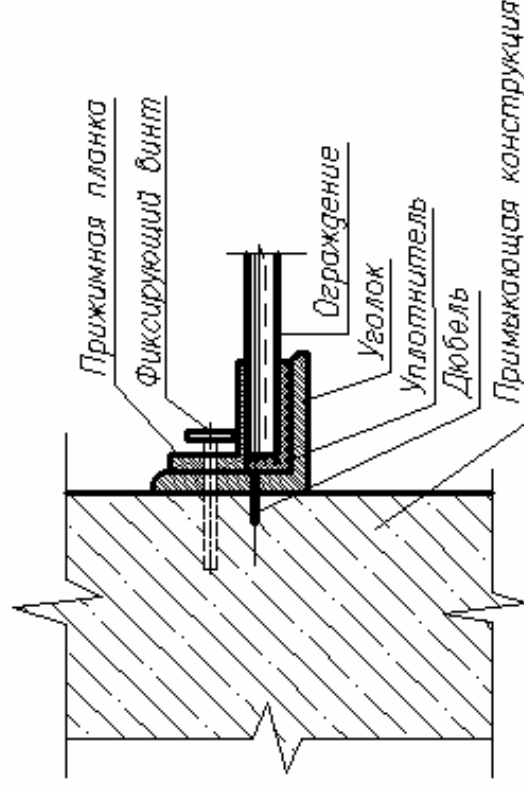
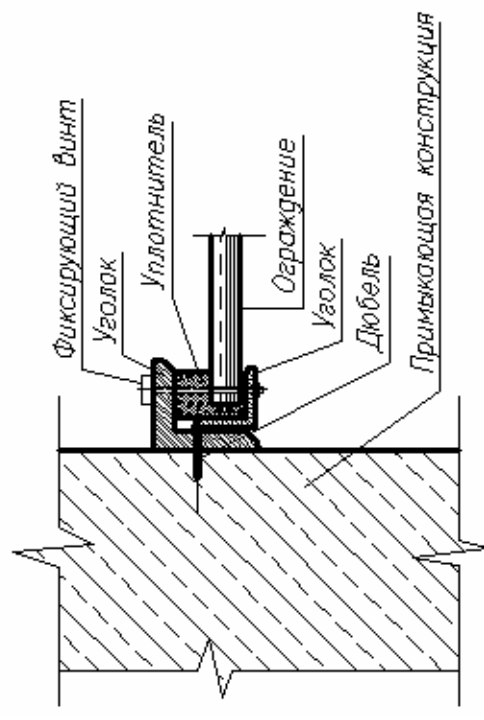


Рис.4.14. Варианты соединения легкого ограждения (продолжение)

5.



6.

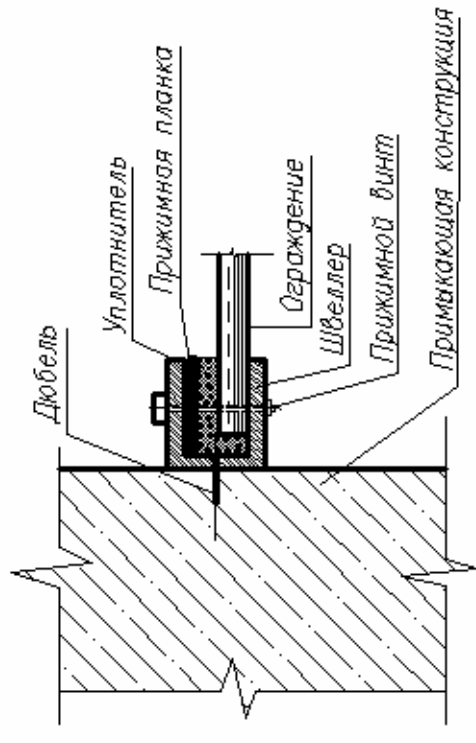


Рис.4.14. Варианты соединения легкого ограждения (окончание)

4.5. Изоляция звуковой вибрации угловыми соединениями строительных конструкций

Для выбора средств снижения звуковой вибрации, распространяющейся по элементам строительных конструкций зданий, прежде всего необходимо произвести оценку конструктивного решения по комплексу параметров, среди которых наиболее важными являются коэффициенты отражения и прохождения энергии звуковой вибрации через стыки. Эти величины являются определяющими в распределении энергии вибрационного поля на каждом элементе. Величина уровней колебаний может быть точно рассчитана методами энергетической теории [6, 8, 90, 91]. В настоящей работе ставится задача выбора расчетных схем, позволяющих наглядно представить физический процесс трансформации упругих колебаний, а уже затем на основе модифицированного метода сосредоточенных параметров [17–26] предполагается аналитически выразить коэффициенты отражения и прохождения энергии упругих колебаний в прямоугольных стыках конструкций. При этом необходимо четко представлять конструктивное решение стыка: от полного замоноличивания до введения в соединение вставок из упругих материалов.

Расчетная схема для углового соединения принимается в соответствии с условиями (3.13) по табл. 3.1. Для жесткого соединения элементов характерны статическая и геометрическая неизменяемость прямого угла при прохождении упругих колебаний: изгибных, продольных и сдвиговых; последние появляются вследствие эксцентриситета приложения силы в падающей изгибной волне. Однако это не снизит точность инженерных расчетов жесткого соединения, если использовать расчетную схему рис.3.1, которая устанавливает физическую зависимость между прошедшими и отраженными волнами. Аналитическое выражение для коэффициентов прохождения и отражения по скорости (3.21)–(3.24) и энергии (3.29)–(3.32) изгибных и продольных волн приведены в третьей главе работы.

Расчет изоляции звуковой вибрации для жесткого углового соединения элементов производится в следующей последовательности:

1. Определяется величина приведенной массы для каждого элемента соединения при распространении по нему изгибной и продольной волн по формуле (3.2).

Рассчитывается значение поправки для каждого из коэффициентов, которая учитывает вращательное движение в изгибной волне по формуле

$$\gamma_{1,2} = (\pi^2 \cdot h_{1,2}^2) / 3 \cdot \lambda_{и1,2}^2.$$

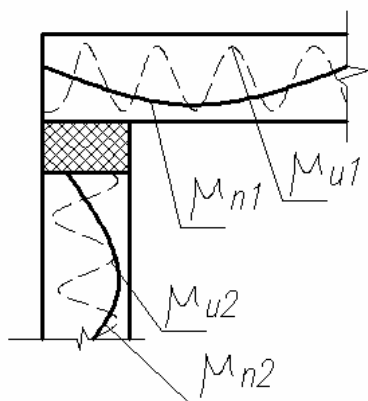
3. По формулам (3.21)–(3.24) производится расчет коэффициентов отражения и прохождения изгибных колебаний.

4. Определяется изоляция жесткого соединения по формуле:

$$R = 10 \cdot \lg(1 / \tau_{и}).$$

Устройство упругой прокладки между элементами углового стыка значительно усложняет принятую для жесткого соединения схему преобразования упругих волн. Это связано с тем, что передача поперечных колебаний приведенной массы $\mu_{и1}$ (рис. 4.15а) происходит с некоторым отклонением «В» от геометрического центра тяжести упругой прокладки, величина которого входит в коэффициент $t = a / \lambda_{и}$; им корректируется частота собственных колебаний системы «масса-упругость-масса». В этой системе упругость представляет изолирующую прокладку шириной «а» с продольной жесткостью $K = E \cdot F \cdot h^{-1}$.

а



б

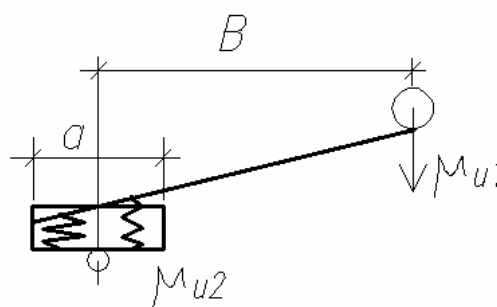


Рис.4.15. Физическая модель углового соединения

Как результат этого – появление сдвиговых волн в изолирующем материале, которые снижают изоляцию всякий раз, когда размеры прокладки становятся соизмеримыми с 1/2 длины сдвиговой волны.

Этим же волнам обязано появление парных продольных и изгибных прошедших и отраженных волн, образующих соединения.

Волновой процесс начинается с частоты $f_{пр}$:

$$f_{пр} = C_{сдв} / 6 \cdot h,$$

где h – толщина прокладки, м;

$C_{сдв} = [E / 2\rho \cdot (1 + \sigma)]^{0.5}$ – скорость распространения сдвиговой волны в материале, плотность которого ρ , кг/м³, модуль упругости E , МПа и коэффициент Пуассона σ .

Модель прохождения упругих волн в такого рода соединениях на частотах $f > f_{пр}$ представлена на рис.3.3.

Расчет изоляции звуковой вибрации угловым соединением элементов с упругой прокладкой производится в следующей последовательности:

1. Вычисляются скорости изгибных волн $C_{и1}$ и $C_{и2}$ по формуле

$$C_{иi} = (1,8 \cdot C_{п} \cdot h \cdot f_i).$$

2. Вычисляются значения скорости сдвиговой волны $C_{сдв}$ и предельной частоты $f_{пр}$ для прокладки.

3. Вычисляются значения приведенных масс $\mu_{и1}$, $\mu_{и2}$, $\mu_{п1}$, $\mu_{п2}$, $\mu_{сдв.пр}$ элементов, сопрягаемых в стыке по формуле (3.2).

4. Вычисляется частота собственных колебаний системы «масса – упругость – масса» с учетом коррекции на эксцентриситет приложения поперечных колебаний в изгибной волне к прокладке:

$$f_o = (1/2\pi) \cdot [(\mu_{и1} + \mu_{и2}) \cdot K / (\mu_{и1} \cdot \mu_{и2})]^{0.5} \cdot t.$$

5. Вычисляется дополнительная изоляция за счет введения в угловое соединение упругой прокладки:

$\Delta R_1 = 20 \cdot \lg|1 - (f / f_o)^2|$ – для перехода колебаний из элементов равной толщины и из тонкого в толстый;

$\Delta R_1 = 20 \cdot \lg|1 - (f / f_o)^2| \cdot \mu_{и1} / (\mu_{и1} + \mu_{и2})$ – для перехода колебаний из толстого элемента в тонкий.

6. Величина изоляции углового стыка с прокладкой из упругого материала рассчитывается на частотах $f < f_{пр}$ по формуле

$$R_y = R_{ж} + \Delta R_1.$$

7. На частотах $f > f_{пр}$ первая расчетная модель преобразуется в модель упругого взаимодействия приведенных масс (рис.3.1), а изоляция рассчитывается по формуле

$$\Delta R_2 = [10 \cdot \lg(\mu_{и1} + \mu_{сдв.пр})^2 / (4 \cdot \mu_{и1} \cdot \mu_{сдв.пр})] + [10 \cdot \lg(\mu_{сдв.пр} + \mu_{пр2})^2 / (4 \cdot \mu_{пр2} \cdot \mu_{сдв.пр})].$$

8. Изоляция на частотах $f > f_{пр}$ представляется суммарной величиной изоляции для жесткого прямоугольного стыка и дополнительной изоляции (п.7) за счет упругой прокладки:

$$R_y = R_{ж} + \Delta R_2.$$

На рис. 4.16–4.23 показаны результаты сравнения лабораторных и натуральных исследований с расчетными графиками согласно предлагаемой методике, а так же рассчитанных по рекомендациям [1, 6, 72, 73, 82, 83].

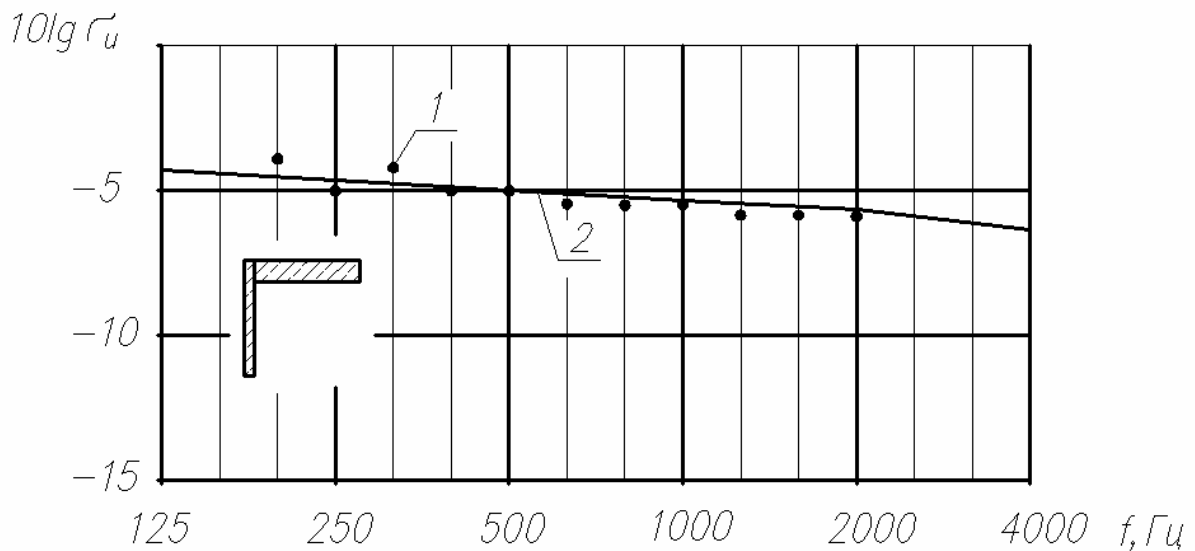


Рис.4.16. Коэффициенты прохождения τ и отражения r энергии упругих волн в жестком стыке пластин:
1 – эксперимент; 2 – расчет по предлагаемой методике

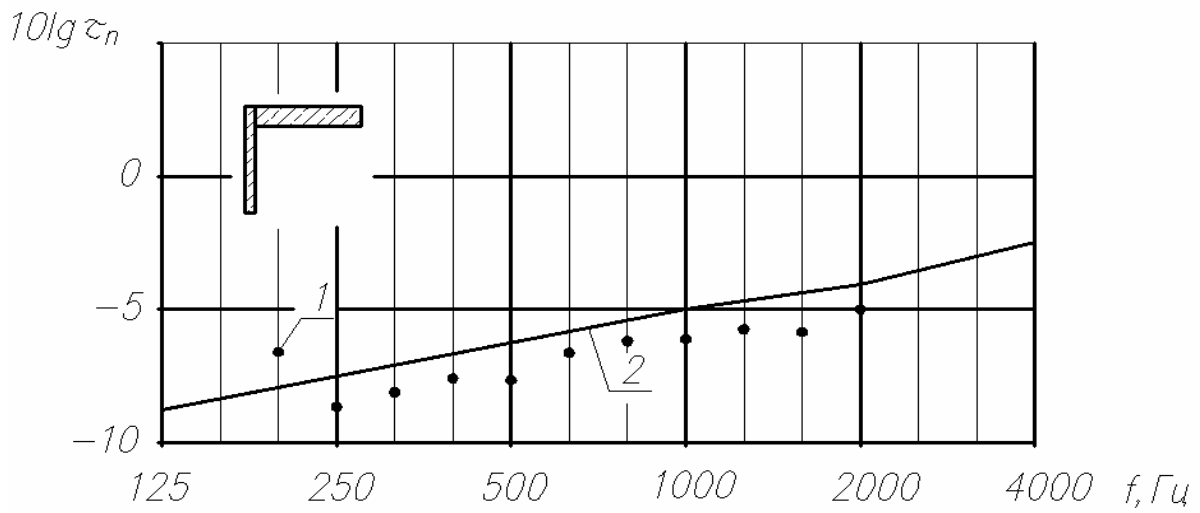
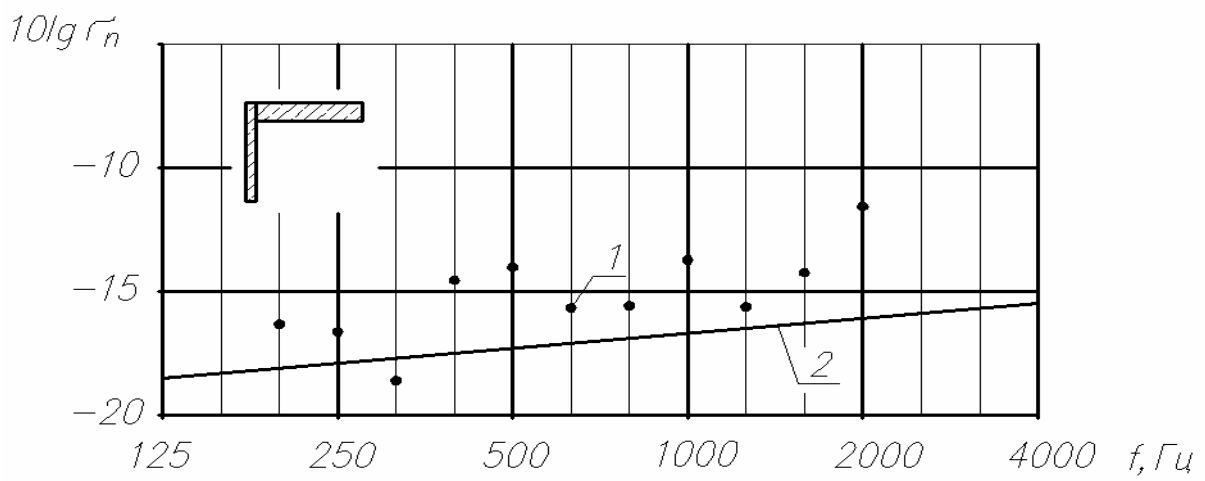
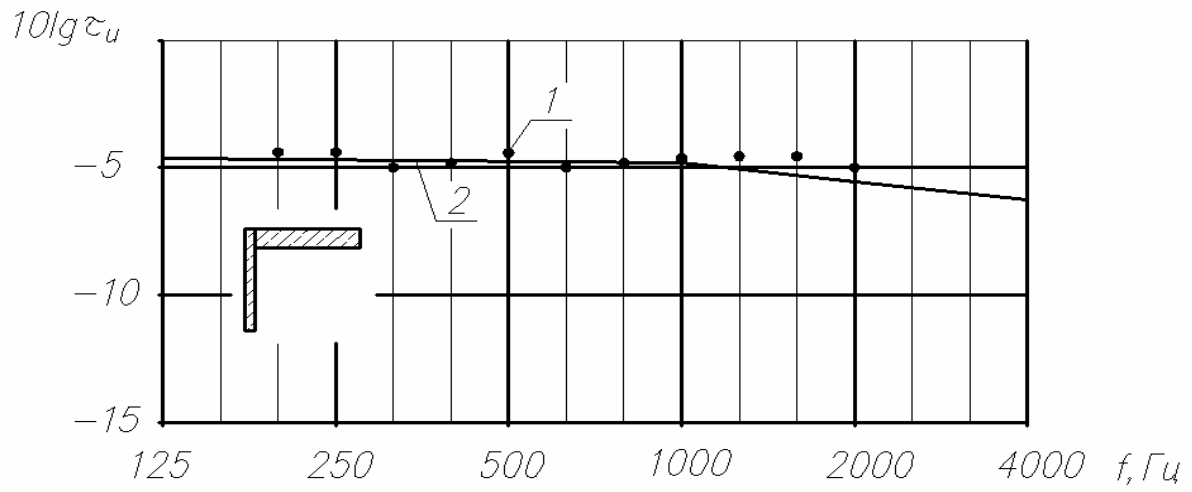


Рис.4.17. Коэффициенты прохождения τ и отражения r энергии упругих волн в жестком стыке пластин:
 1 – эксперимент; 2 – расчет по предлагаемой методике

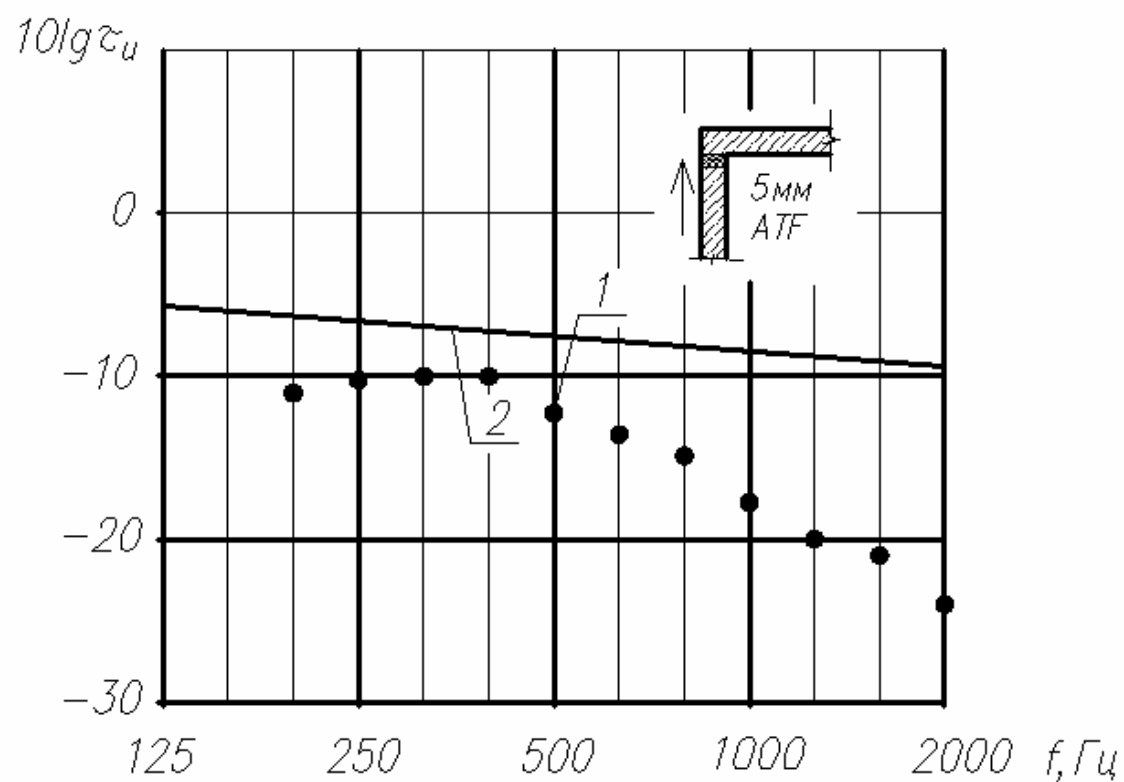
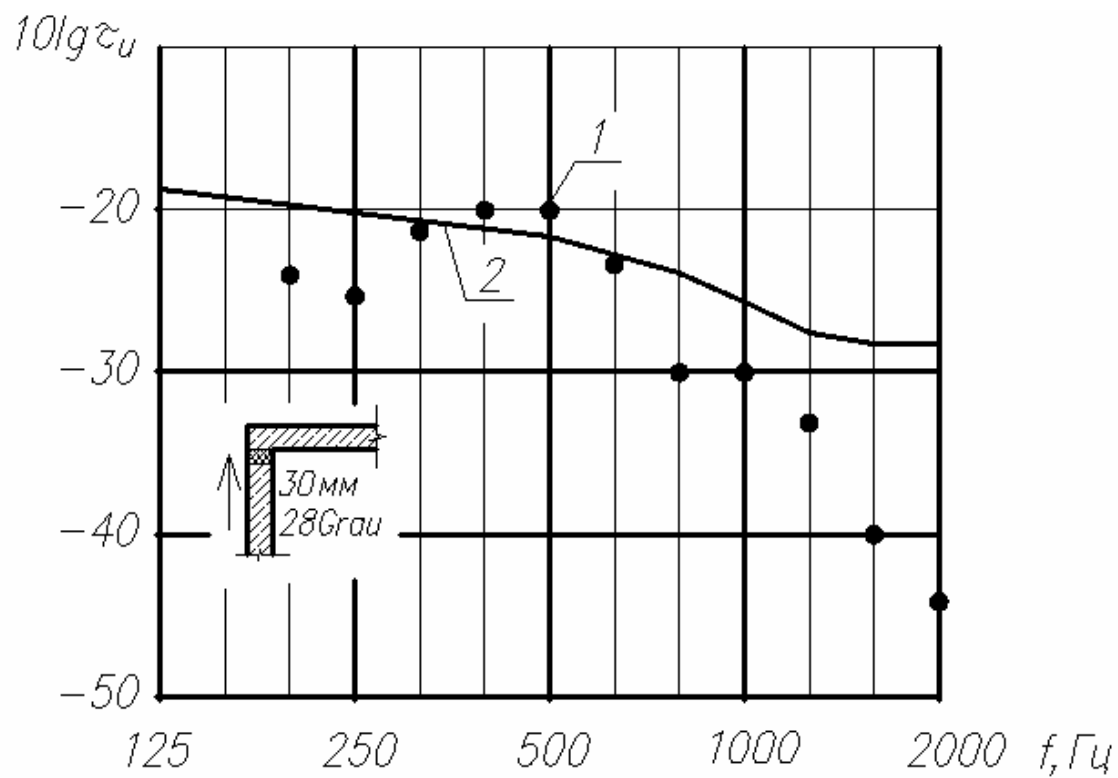


Рис.4.18. Прохождение изгибных колебаний через угловой стык пластин из оргстекла с упругой вставкой:
 1 – эксперимент[83]; 2 – расчет по предлагаемой методике

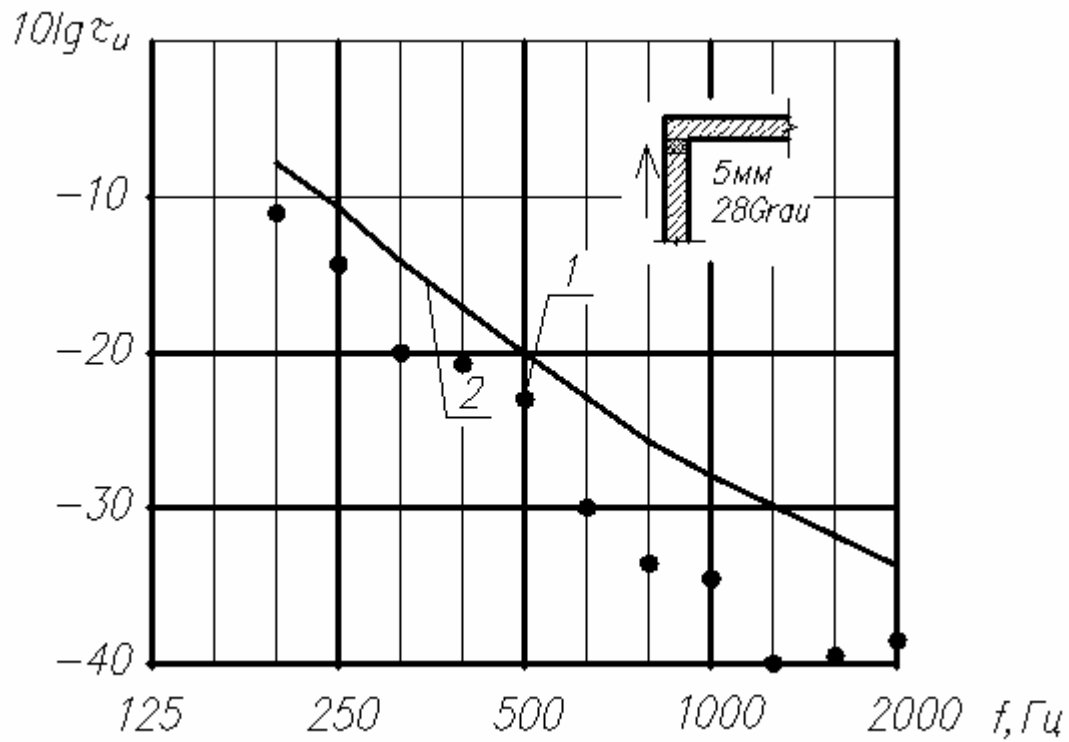


Рис.4.19. Прохождение изгибных колебаний через угловой стык пластин из оргстекла с упругой вставкой:
1 – эксперимент[83]; 2 – расчет по предлагаемой методике

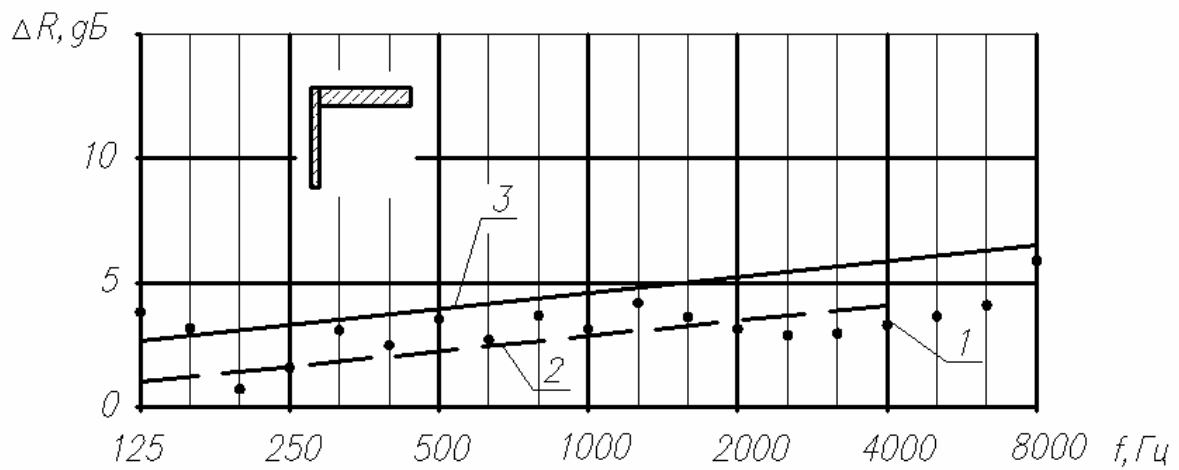


Рис.4.20. Изоляция упругих колебаний жестким угловым соединением бетонных панелей разной толщины:
1 – эксперимент[1]; 2 – расчет [56]; 3 – расчет по предлагаемой методике

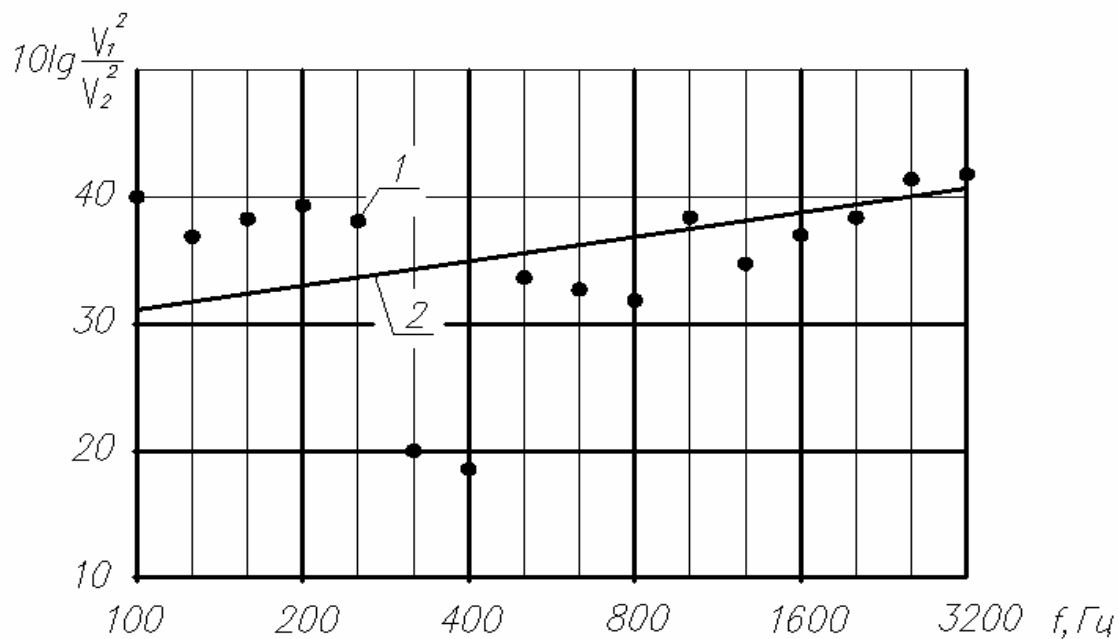


Рис. 4.21. Прохождение изгибных колебаний из легкобетонной плиты $h_1=0,07$ м в бетонную плиту $h_2=0,16$ м; возбуждение производилось вибратором:
1 – эксперимент [82]; 2 – расчет по предлагаемой методике

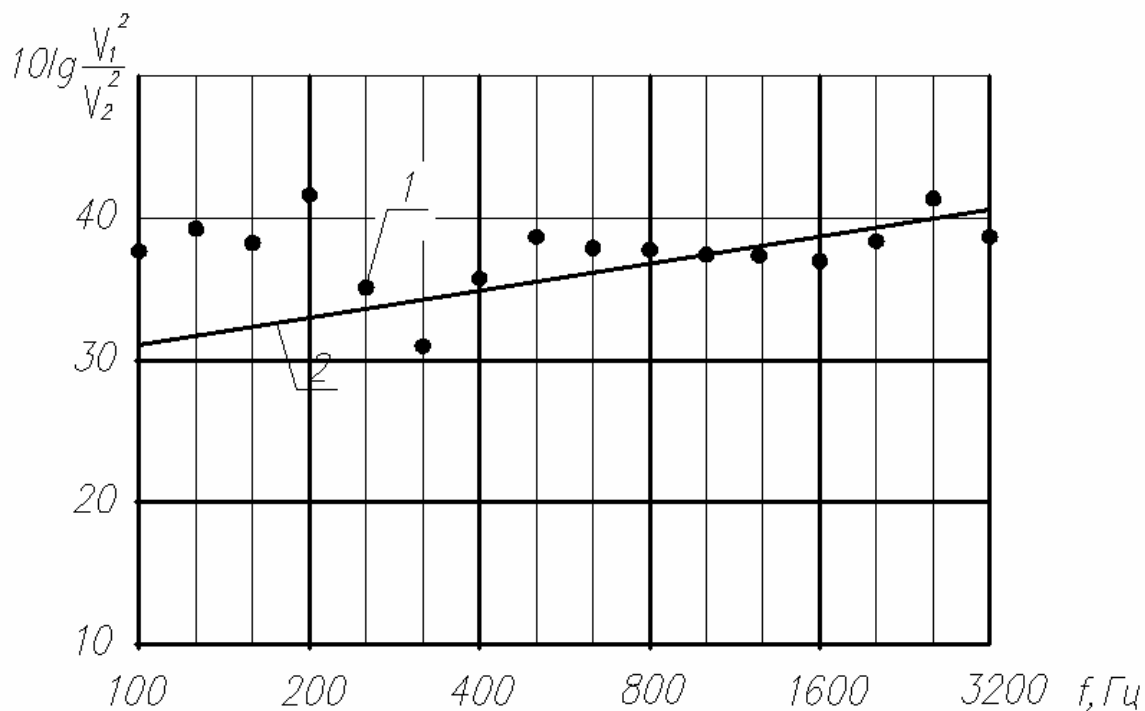


Рис. 4.22. Прохождение изгибных колебаний из легкобетонной плиты $h_1=0,07$ м в бетонную плиту $h_2=0,15$ м; возбуждение производилось вибратором:
1 – эксперимент [82]; 2 – расчет по предлагаемой методике

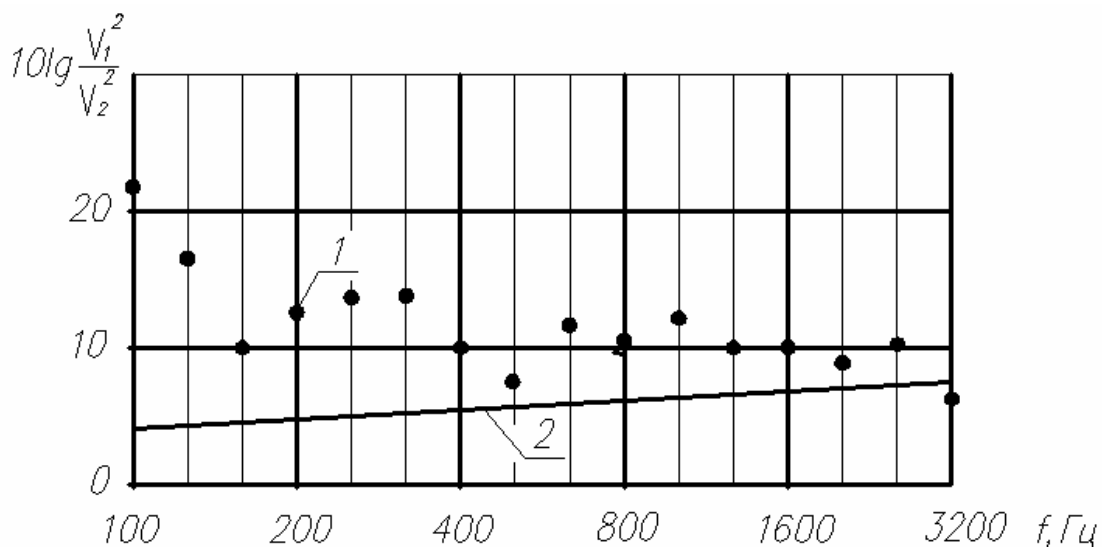


Рис. 4.23. Прохождение изгибных колебаний из легкогобетонной плиты $h_1=0,15$ м в бетонную плиту $h_2=0,16$ м; возбуждение производилось вибратором:
1 – эксперимент [82]; 2 – расчет по предлагаемой методике

Сопоставление экспериментальных и расчетных данных показывают удовлетворительную сходимость, что подтверждает правильность выбора расчетных моделей и возможность их использования на стадии проектирования для определения изоляции звуковой вибрации на путях её распространения по конструкциям зданий.

4.6. Практическая реализация расчетного метода изоляции воздушного шума легкими ограждениями на ЭВМ

Применение средств вычислительной техники делает возможным вариантное проектирование акустического режима помещений исходя не только материалов ограждения, но и способов их соединения с несущими элементами здания. Алгоритм расчета, блок – схема которого представлена на рис.4.24 реализован в виде программы на любом из известных языков программирования. Точность результатов расчета достаточна для практической деятельности инженеров – проектировщиков. Ввод исходных данных производится согласно табл. 4.3, п.1–11 с указанием интервала частот i , Гц спектра изоляции.

Данные для расчета: $\rho_{\text{п}} = 1000$ кг/м³; $h_{\text{п}} = 0,10$ м; $b_{\text{п}} = 3,0$ м;
 $E_{\text{п}} = 7 \cdot 10^9$ Н/м²; $\eta_{\text{м}} = 0,00095$; $\rho_{\text{к}} = 2350$ кг/м³; $h_{\text{к}} = 0,16$ м; $b_{\text{к}} = 3,0$ м;
 $E_{\text{к}} = 2,35 \cdot 10^{10}$ Н/м²; $i = 100, 200, 400, 800, 1600, 3200, 6400$ (Гц).

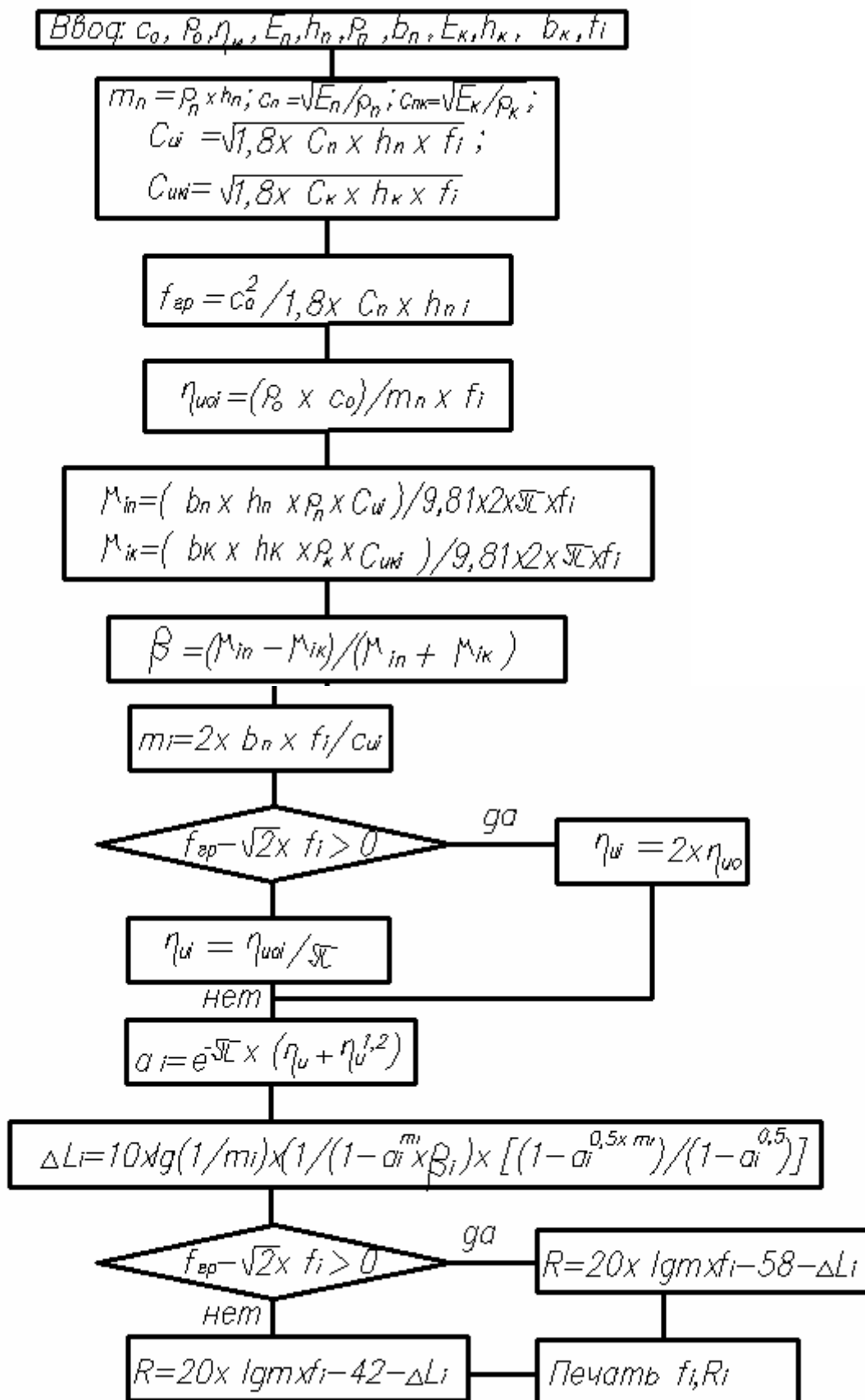


Рис.4.24. Блок-схема

Таблица 4.3

№ п/п	Условные обозначения	Соответствие в программе	Наименование	Размерность
1	2	3	4	5
1	C_o	PSO const	Скорость звука в воздухе	м/с
2	ρ_o	RO const	Плотность воздуха	кг/м ³
3	$\rho_{п}$	RP F 4.0	Плотность материала ограждения	100-900 кг/м ³
4	$h_{п}$	HP F4.3	Толщина ограждения	0,001-0,5 м
5	$b_{п}$	BP F4.1	Ширина ограждения	0,1-5,0 м
6	$E_{п}$	EP F10.3	Модуль упругости материала ограждения	$2 \cdot 10^4 - 2 \cdot 10^{12}$ Н/м ²
7	$\eta_{м}$	TR F4.3	Коэффициент потерь на внутреннее трение	0,001-0,1
8	$\rho_{к}$	RK F4.0	Плотность материала примыкающей конструкции	100-3000 кг/м ³
9	$h_{к}$	HK F4.3	Толщина примыкающей конструкции	0,001-0,7 м
10	$b_{к}$	BK F4.1	Ширина примыкающей конструкции	0,1-5,0 м
11	$E_{к}$	EK F10.3	Модуль упругости материала примыкающей конструкции	$2 \cdot 10^4 - 2 \cdot 10^{12}$ Н/м ²
12	f	F	Текущая частота	45-6000 Гц

Окончание табл. 4.3

1	2	3	4	5
13	$m_{\text{п}}$	РМР	Поверхностная плотность ограждения	10-100 кг/м ²
14	$C_{\text{п}}$	PSP	Скорость продольной волны в ограждении	500-4000 м/с
15	$C_{\text{пнк}}$	PSPK	Скорость продольной волны в примыкающей конструкции	500-4000 м/с
16	$C_{\text{и}}$	PS	Скорость изгибной волны в ограждении	5,0-2000 м/с
17	$C_{\text{пнк}}$	PSK	Скорость изгибной волны в примыкающей конструкции	5,0-2000 м/с
18	$f_{\text{гр}}$	FGR	Граничная частота	50-5000 Гц
19	$\eta_{\text{по}}$	ТО	Удельные потери на излучение	0,0001-0,9
20	$\mu_{\text{п}}$	PMUP	Приведенная масса ограждения	5,0-1000 кг/м ³
21	$\mu_{\text{к}}$	PMUK	Приведенная масса примыкающей конструкции	5,0-1000 кг/м ³
22	β	BT	Коэффициент отражения от краев	0,001-1,0
23	m	PM	Количество полуволен изгиба	1-30
24	α	PA	Затухание на длину волны	0,01-1,0
25	$\eta_{\text{и}}$	T	Общие потери на излучение	0,0001-0,9
26	ΔL	PDL	Снижение изоляции	0,1-25 дБ
27	R	R	Изоляция воздушного шума	0,1-60 дБ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теория и практика звукоизоляции в настоящее время получила значительное развитие. В нормативной литературе содержатся методы расчета массивных и легких ограждающих конструкций. Точность методов подтверждает большая статистика натурных измерений. В разделе 3 [55] предусматривается расчет только для наиболее массовых строительных материалов. Расчеты по предлагаемым в [55] методикам для ограждений, имеющих промежуточные (в сравнении с легкими и массивными ограждениями) значения поверхностной плотности, дают различные спектры изоляции. Способы закрепления конструкций в [55] не оговариваются, хотя они существенно влияют на изолирующую способность. Указанные недостатки ограничивают проектирование легких ограждений из различных материалов и способах закрепления.

Экспериментально установлено, что построенная графо-аналитическим методом [55] кривая изоляции соответствует жесткому условию закрепления контура легких ограждений. При устройстве упругого закрепления на частотах проявления виброизолирующего эффекта в прокладочных элементах экспериментальные результаты оказываются гораздо ниже расчетных.

Исследования на моделях изоляции воздушного шума легкими ограждениями при упругом опирании контура показали, что на частотах, предшествующих проявлению виброизолирующего эффекта, звукоизоляция соответствует жесткому закреплению контура, а на частотах, превышающих эту величину – наблюдается её понижение. Поэтому применение прокладочных материалов необходимо только в целях герметизации при обеспечении жесткости соединения элементов.

Установлено влияние излучения энергии колеблющимися поверхностями легких ограждений на их звукоизоляцию. Величина потерь на излучение характеризует конструкцию как легкую или массивную, что позволяет обосновать принятую в нормативной литературе классификацию.

На основе комплексных исследований предложен единый инженерный метод расчета изоляции воздушного шума для массивных и легких однослойных конструкций с точностью, не уступающей методам, изложенным в Своде правил по проектированию звукоизоляции ограждающих конструкций жилых и общественных зданий [55].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алексеев, С.П. Борьба с шумом и вибрацией в машиностроении [Текст] / С.П.Алексеев, А.М.Казаков, Н.Н.Колотилов. – М.: Машиностроение, 1970. – 208 с.
2. Бернулли, И. Избранные сочинения по механике [Текст] / И. Бернулли; пер. с нем. – М.; Л.: ГИТТЛ, 1937. – С.80 – 143.
3. Блинова, Л.П. Акустические измерения / Л.П.Блинова, А.Е.Колесников, Л.Б.Ланганс. – М.: Изд-во стандартов, 1971. – 271 с.
4. Бобылев, В.Н. Звукоизоляция однослойных ограждающих конструкций на частотах, ниже граничной [Текст]: автореф.дис. ... канд. техн. наук: 05.23.10 / В.Н. Бобылев. – Горький, 1974. – С.8-17.
5. Боголепов, И.И. Звукоизоляция на судах [Текст]/ И.И. Боголепов, Э.И. Авферинок. – Л.: Судостроение, 1970. – 192 с.
6. Бородинский, А.С. Снижение структурного шума в судовых помещениях [Текст]/ А.С.Бородинский, В.М. Спиридонов. – Л.: Судостроение, 1974. – 218 с.
7. Борьба с шумом [Текст] / под ред. Е.Я.Юдина. – М.: Стройиздат, 1964. – 701 с.
8. Будрин, С.Б. Прохождение волн через различные соединения пластин [Текст] / С.Б. Будрин, А.С. Никифоров // Акустический журнал. – 1963. – Т.IX, вып.4. – С.408 – 412.
9. ГОСТ 15116-79. Шум. Методы измерения звукоизоляции внутренних ограждающих конструкций зданий [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 1979. – 9 с.
10. ГОСТ 11.004-74. Прикладная статистика. Правила определения оценок и доверительных интервалов для параметров нормального распределения [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 1974. – 20 с.
11. Гутин, Л.Я. Избранные труды. Структурный шум [Текст] / Л.Я.Гутин. – Л.: Судостроение, 1977. – С.422-428.
12. Заборов, В.И. Передача вибраций через сопряжения плит конечных размеров [Текст] / В.И. Заборов, Л.П. Тюменцева // Сб.трудов НИИСФ «Успехи строительной физики». Акустика. – 1962. – Вып.2. – 25 с.
13. Заборов, В.И. Звукоизоляция крупнопанельных зданий [Текст] / В.И. Заборов, В.Н.Никольский. – М.: Стройиздат, 1964. – С.10-41.
14. Заборов, В.И. Теория звукоизоляции ограждающих конструкций [Текст] / В.И.Заборов. – М.: Стройиздат, 1969. – 179 с.

15. Заборов, В.И. О косвенных путях распространения звука в зданиях [Текст]/ В.И.Заборов // Акустический журнал. – 1967. – Т.ХШ, вып.4. – С.575-578.

16. Заборов, В.И. Звукоизоляция в жилых и общественных зданиях [Текст] / В.И. Заборов, Э.М. Лалаев, В.Н. Никольский. – М.: Стройиздат, 1979. – 254 с.

17. Захаров, А.В. Практический метод расчета прохождения волн через соединения стержней и пластин (метод волнонов) [Текст]/ А.В.Захаров // Доклады VI Всесоюзной акустической конференции. – М., 1968. – С.68-72.

18. Захаров, А.В. Расчет прохождения звука через различные соединения стержней и пластин [Текст] / А.В.Захаров // «Борьба с шумами в городах и на производстве. – Волгоград: Нижне-волжское книжное изд-во, 1969. – С.166-174.

19. Захаров, А.В. Исследования прохождения звука по строительным конструкциям на моделях [Текст] / А.В.Захаров, В.Т.Мартынов // Исследования по строительной механике и расчету сооружений: сб. – Томск: ТИСИ, 1969. Вып.VIII. – С.130 – 142.

20. Захаров, А.В. Метод расчета изоляции ограждающих конструкций от воздушного шума [Текст] / А.В. Захаров // Тезисы докладов VII Всесоюзной акустической конференции. – Л., 1971. – С.127-128.

21. Захаров, А.В. Передача звуковых вибраций в узлах конструкций многоэтажных каркасных зданий [Текст] / А.В. Захаров, В.В. Калюжный // В сборнике тезисов докладов «Вопросы архитектуры» VII научной конференции кафедр архитектуры. – М., Стройиздат, 1972. – С.48-50.

22. Захаров, А.В. Упрощенный метод расчета виброизоляции узлов строительных конструкций [Текст] / А.В. Захаров, В.В. Калюжный // В сборнике реф. информ. о законченных НИР в вузах УССР, вып.8. – 1974. – С.7-8.

23. Захаров, А.В. Расчет изоляции воздушного шума однородными ограждающими конструкциями [Текст] / А.В. Захаров // Доклады III Национальной конференции по борьбе с шумом. – Болгария, Варна, 1974. – С.63-68.

24. Захаров, А.В. О возможности упрощения задач строительной акустики [Текст] / А.В.Захаров // В сборнике тезисов докладов Кемеровского НТО, Новокузнецк. – 1978. – С.42-45.

25. Захаров, А.В. Практический метод расчета изоляции воздушного шума однослойными ограждающими конструкциями [Текст] / А.В. Захаров, Р.Х. Пирматов // Известия АН Тадж.ССР, отдел физ.-мат. и геолого-хим. наук. – 1983. – №2. – С.115-121.
26. Захаров, А.В. Звуковые колебания стержней и пластин [Текст] / А.В. Захаров, А.Р. Фазылов, Р.Х. Пирматов // Известия АН Тадж.ССР, отдел физ.-мат. и геолого-хим. наук. – 1984. – №2. – С.28-33.
27. Захаров, А.В. Влияние способов закрепления на изоляцию воздушного шума легкими ограждениями [Текст] / А.В. Захаров, В.М. Разживин // Информ. Лист Пенз. ЦНТИ. – 1985. – № 172-85. – 6 с.
28. Ковригин, С.Д. Борьба с шумами в гражданских зданиях [Текст] / С.Д.Ковригин, А.В.Захаров, А.И.Герасимов. – М.: Стройиздат, 1969. – 326 с.
29. Ингерслев, Ф. Акустика в современной строительной практике [Текст] / Ф. Ингерслев: пер. с англ. – М.: Стройиздат, 1957. – 295 с .
30. Клячко, Л.Н. О расчете звукоизоляции однослойных стальных и деревянных ограждений [Текст] / Л.Н. Клячко // Борьба с шумами и вибрациями: сб. – М., Стройиздат, 1966. – С.284-286.
31. Крейтан, В.Г. Звукоизолирующая способность акустически однородных плит. Обеспечение звукоизоляции при конструировании жилых зданий [Текст]/ В.Г.Крейтан // Сборник трудов ЦНИИЭП жилища. – М.: Стройиздат, 1980. – 164с.
32. Клюкин, И.И. Влияние на погрешность показаний виброметра, его реакции на колеблющуюся поверхность [Текст] / И.И. Клюкин // Измерительная техника. – 1959. – №6. – С.20-23.
33. Клюкин, И.И. Акустические измерения в судостроении [Текст] / И.И. Клюкин, А.Е.Колесников. – Л.: Судостроение, 1968. – 254 с.
34. Ковригин, С.Д. О звукоизоляции крупнопанельных зданий [Текст] / С.Д.Ковригин // Известия вузов «Строительство и архитектура». – 1961. – №3. – С.142-150.
35. Ковригин, С.Д. Архитектурно-строительная акустика [Текст] / С.Д.Ковригин. – М.: Стройиздат, 1980. – 184 с.
36. Ларшин, У.Я. Исследования по методике измерений звукоизоляции строительных конструкций [Текст] / У.Я. Ларшин // Вопросы звукоизоляции и архитектурно-строительной акустики. – М.: Госстройиздат, 1959. – С.5-48.

37. Лукьянович, К.В. Учет косвенной звукопередачи при определении звукоизоляции помещений [Текст] / К.В.Лукьянович// Научные труды НИИСФ. Акустика. – 1969. – Вып.№2 (X). – С.30-37.
38. Лямшев, Л.М. Отражение звука тонкими пластинками и оболочками в жидкости [Текст] / Л.М.Лямшев – М.: Изд-во АН СССР, 1955. – 73 с.
39. Ляпунов, В.Т. Виброизоляция в судовых конструкциях [Текст] / В.Т.Ляпунов, А.С.Никифоров. –Л.: Судостроение, 1975. – 232 с.
40. Методические указания по расчету звукоизоляции однослойными ограждающими конструкциями [Текст]. – Челябинск: Изд-во «Чермет», 1976. – 8 с.
41. Отчет о НИР № 11442. Расчет звукоизоляции опытной легкой перегородки. НИИСФ [Текст]. – М., 1979. –С.40- 67.
42. Отчет о НИР. Исследование звукоизолирующих свойств тепловозных ограждающих конструкций. Шифр НИ-1004. МНИИТЭП [Текст]. – М., 1970. –С.14-55.
43. Осипов, Г.Л. Акустические измерения в строительстве [Текст] / Г.Л.Осипов, Д.З Лопашов, Е.Е.Федосеева. – М.: Стройиздат, 1978. – 212 с.
44. Разживин, В.М. Расчет изоляции воздушного шума легкими ограждениями [Текст] / В.М.Разживин // Информ. лист Пенз. ЦНТИ. – 1985. – № 216-85. – 4 с.
45. Разживин, В.М. Снижение уровня шума методом звукоизоляции [Текст] / В.М.Разживин, В.Т.Веслополов// Информ. лист Пенз. ЦНТИ. – 1985. – № 240-85. – 4 с.
46. Рассохин, И.А. Исследование изоляции акустически однородных межквартирных стен из легкого бетона. Звукоизоляция элементов жилых зданий [Текст]/ И.А. Рассохин // Сб. тр. ЦНИИЭП жилища. – М.: Стройиздат, 1980. – С.101-116.
47. Рэлей, Дж. Теория звука [Текст] / Дж.Рэлей. – Т.1,2. – Гостехтеориздат, 1955. – 476 с.
48. Руководство по расчету и проектированию звукоизоляции ограждающих конструкций зданий. НИИСФ Госстроя СССР [Текст]. – М.: Стройиздат, 1983. – 64 с.
49. Седов, М.С. Звукоизоляция тонких однослойных пластин ограниченных размеров [Текст]/ М.С.Седов // Известия вузов «Строительство и архитектура». – 1964. – №5. – С.130-134.

50. Седов, М.С. Механизм прохождения звука через тонкую пластину ограниченного размера [Текст]/ М.С.Седов // Известия вузов «Строительство и архитектура». – 1964. – №7. – С.67-73.

51. Седов, М.С. Звукоизоляция облегченных ограждающих конструкций зданий [Текст]: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.10 / М.С. Седов. – М., 1972. – С.6-20.

52. Седов, М.С. Звукоизоляция ограждений на средних и низких частотах [Текст] / М.С.Седов // Архитектура, градостроительство и графика: материалы научной конференции ГИСИ им. Чкалова. – Горький, 1972. – С.26-27.

53. Седов, М.С. Расчет звукоизоляции однослойных ограждений на низких частотах [Текст] / М.С. Седов, В.Н. Бобылев // Курс лекций ГИСИ им. Чкалова. – Горький, 1976. – 45 с.

54. Седов, М.С. Звукоизоляция конструкций зданий [Текст]/ М.С. Седов, В.Н. Бобылев // Труды ГИСИ им. Чкалова, вып.71. – Горький, 1974. – С.26-29, 65.

55. СП 23-103-2003. Свод правил по проектированию и строительству. Проектирование звукоизоляции ограждающих конструкций жилых и общественных зданий [Текст]. – М.: Госстрой России, ФГУП ЦПП. – 2004.

56. Спиридонов, В.М. Применение энергетического метода для расчета уровней звуковой вибрации в инженерных конструкциях [Текст]/ В.М.Спиридонов // Борьба с шумом на судах: сб. –Л.: Судостроение, 1970.– С.3 – 29.

57. Справочник проектировщика. Защита от шума [Текст]/ под редакцией Е.Я.Юдина. – М., Стройиздат, 1974. – 128 с.

58. Тимошенко, С.П. Колебания в инженерном деле [Текст]/ С.П.Тимошенко. – Физматгиз, 1959. – С.34-57.

59. Уотерхауз, Р.В. Интерференция в реверберационном поле [Текст] / Р.В.Уотерхауз // Проблемы современной физики. – 1956. – №8. – С.204-223.

60. Фазылов, А.Р. Распространение звуковой вибрации в гражданских зданиях [Текст]: автореф.дис. ... канд. техн. наук: 05.23.10 / А.Р. Фазылов. – М., 1979. – С.8-14.

61. Шильд, Е. Строительная физика [Текст] / Е. Шильд; пер. с нем. – М.: Стройиздат, 1982. – С.130-218.

62. Beranek L.L. Nois Reduccion MCgraw Hill Book Company Inc.New York, Toronto, London, 1960. p.898 – 991.
- 63.Cachura I. Komplexhi hodnoceni objekto z hlediska akustiky / I. Cachura. – 1971. – CFUT. Praha. P.24-35.
64. Constable I. The transmission of sound in a building by indirect paths/ I.Constable // Pros. Phys. Soc. – 1938.-Vol. 50. – P.368 – 373.
65. Constable I. Transmission of sound Between Neighbouring Rooms in a Brick building / I.Constable // Pros. Phys. Soc. – 1935.- Vol. 51. – P.53 – 61.
66. Cremer L. Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik / L.Cremer // Wellentheorie Raumakustik. – 1950.- Band III. Leipzig.
67. Cremer L. Theorie der Schalldammung dunner Wande bei schragen Einfalle/ L.Cremer // Akustische Zeitschrift. – 1942. – B.7. №3. P. 81 – 104.
68. Cremer L. Theorie des Klopfschalls bei Decken mit schwimmenden Estrich / L.Cremer // Acustica. – 1952. – V.2. №4. -P.167 – 178.
69. Cremer L. Naherungsweise Berechnung der von einem schwimmenden Estrich zur erwarten den Verbesserung. Forschung und Fortschritte in Bauweisen / L.Cremer // Reihe D. -1952. B.1.
70. Cremer L. The propagation of structureborne sound / L.Cremer // Department of civil and Industrial Research. – 1953.- Rep. №1(series 13) 1v. Acustica 3. – P.137.
71. Cremer L. Calculation of sound propagation in structuren Acustica / L.Cremer // Acustica .- 1953.-Vol.3. №5. – P.317 – 335.
72. Cremer L. Berechnung der Wirkung von Schallbrucken / L.Cremer// Acustica. – 1954. -Vol.4.- P.273 – 276.
73. Cremer L. Berechnung von Korperschallvorgangen / L.Cremer// Acustica. – 1956. -Vol. 6, №1.- P.59 – 66.
74. Cremer L., Heckl M. Korperschall physikalische Grundlagen und technische Anwendung / L.Cremer, M.Heckl. //Springer – Verlag. – 1957.-Berlin. New – York.
75. Gosele K. Schallschutz, Forschung und Fortschritt im Bauwesen / K.Gosele // Reihe D. Stuttgart. – 1952. – B. 2.
76. Gosele K. Luftschalldammung / K.Gosele // Proc. 3-rd Inter. Cong. Acust. – Stuttgart, 1959. – Vol.II. -P.389 – 399.
77. Gosele K. Zur Luftschalldammung von einschaligen Wanden und Decken / K.Gosele// Acustica. – 1968. –Vol.20. – P.334 – 342.

78. Hekl M. Die Schalldämmung von homogenen in Fachwänden endlicher Fläche / M. Hekl // *Acustica*. – 1960.- 10, 2. P.98 – 108.

79. Hekl M. Einige Anwendungen des Reziprozitätsprinzips in der Akustik / M. Hekl // *Frequenz*. – 1964.- 18. P.239 – 242.

80. ISO/TC 43/SC 2 № 299 Measurement of sound insulation in buildings and of building elements. P.13.

81. Ingemanson S. Calculation of sound insulation in a building. – Stockholm / S. Ingemanson // *National Swedish Buildings Research*. – 1970.

82. Kihlman T. Transmission of structureborne sound in buildings / T.Kihlman // *A theoretical and experimental investigation Research, Report. 9. Stockholm*. – 1967. P.91.

83. Kurtze G., Tamm K., Vogel S. Modellversuchen zur Biegewellendämmungen Ecken / G.Kurtze, K. Tamm, S.Vogel // *Acustica*. – 1955. – №4. vol.5. P.223 – 233.

84. Meyer E., Parkin P., Oberst H., Purkis H. A tentative method for the measurement of Indirect Sound transmission in buildings/ E.Meyer, P.Parkin, H.Oberst, H.Purkis // *Acustica*. – 1951. – №17. P.17.

85. Reisner H. Der senkrechte und schräge Durchtritt einer in einem flüssiger Medium erzeugten ebenen Dilatations-(Longitudinal) Welle durch eine in diesem Medium befindliche planparallele feste Platte Helv / H.Reisner // *Acta*. – 1938. – 11. S.140.

86. Schoch A. Die physikalischen und technischen Grundlagen der Schalldämmung im Bauwesen / A.Schoch // *Leipzig*. -1937.

87. Schoch A. Der Schalldurchgang durch Platten / A.Schoch // *Acustica*. – 1952. -Vol.2 №1.P.1-17.

88. Schoch A., Fenner K. The mechanism of sound transmission through single leaf partitions, investigated using small scale models / A.Schoch, K. Fenner // *Acustica*. – 1952.- Vol.2.№5. P. 189.

89. Schoch A. Zum Einfluss der seitlichen Begrenzung auf die Schalldurchlassigkeit einfacher Wände / A.Schoch // *Acustica*. – 1954.- Vol.4. P.288.

90. Westphal W. Körperschall- Leitung in Reckenhäusern und in Hochhäusern/ W. Westphal // *Acustica*.- 1957. Vol.7.

91. Westphal W. Ausbreitung von Körperschalldämmung an Ecken und krenzformigen Stoss-stellen/ W.Westphal // *Akustische Beihefte*. - 1960.P.54-60.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Графический метод расчета изоляции воздушного шума с учетом условий закрепления по контуру

Частотная характеристика изоляции воздушного шума изображается в виде ломаной линии $ABCD$ (рис.1 П1). Координата граничной частоты f_c определяется по графику 1 в зависимости от толщины ограждения $h(m)$ и скорости распространения продольной волны $c_n(m/c)$. Эта частота приравняется к ближайшей среднегеометрической частоте октавной полосы, в пределах которой она находится. Ордината R_c определяется по графику 2 в зависимости от поверхностной плотности m_n ($кг/м^2$), частоты волнового совпадения с учетом разницы на величину снижения изоляции ΔL (график 3). Последняя величина оказывается зависимой от коэффициента отражения изгибных волн β от краев ограждения, количества полуволн изгиба m , затухания колебаний a от потерь на внутреннее трение в материале ограждения η_m и излучение $\eta_{и}$ (график 2).

Построение частотной характеристики производится следующим образом: из точки C влево проводится отрезок CB с наклоном 4 дБ на октаву; далее из точки B влево проводится отрезок BA с наклоном 6 дБ на октаву, а из точки C вправо проводится отрезок CD с наклоном 6 дБ на октаву до точки D с ординатой равной 60 дБ.

Например, для пластины из дюралюминия ($\rho_1 = 2880$ $кг/м^2$; $c_n = 5000$ $м/с$; $\eta_m = 0,003$; $h_1 = 0,003$ $м$; $b = 0,48$ $м$), раскрепленной в бетонной плите ($\rho_2 = 2350$ $кг/м^2$; $h_2 = 0,075$ $м$) ордината R_c определяется в следующей последовательности:

- по графику 1 находим $f_c = 4200$ Гц;
- по графику 2 определяется $R_c = 32,5$ дБ; $\eta_{и} = 0,002$;
- по графику 3 устанавливается значение $\Delta L = 1,5$ дБ ($\beta = 0,91$; $m = 7$).

Тогда ордината $R_c = 31$ дБ.

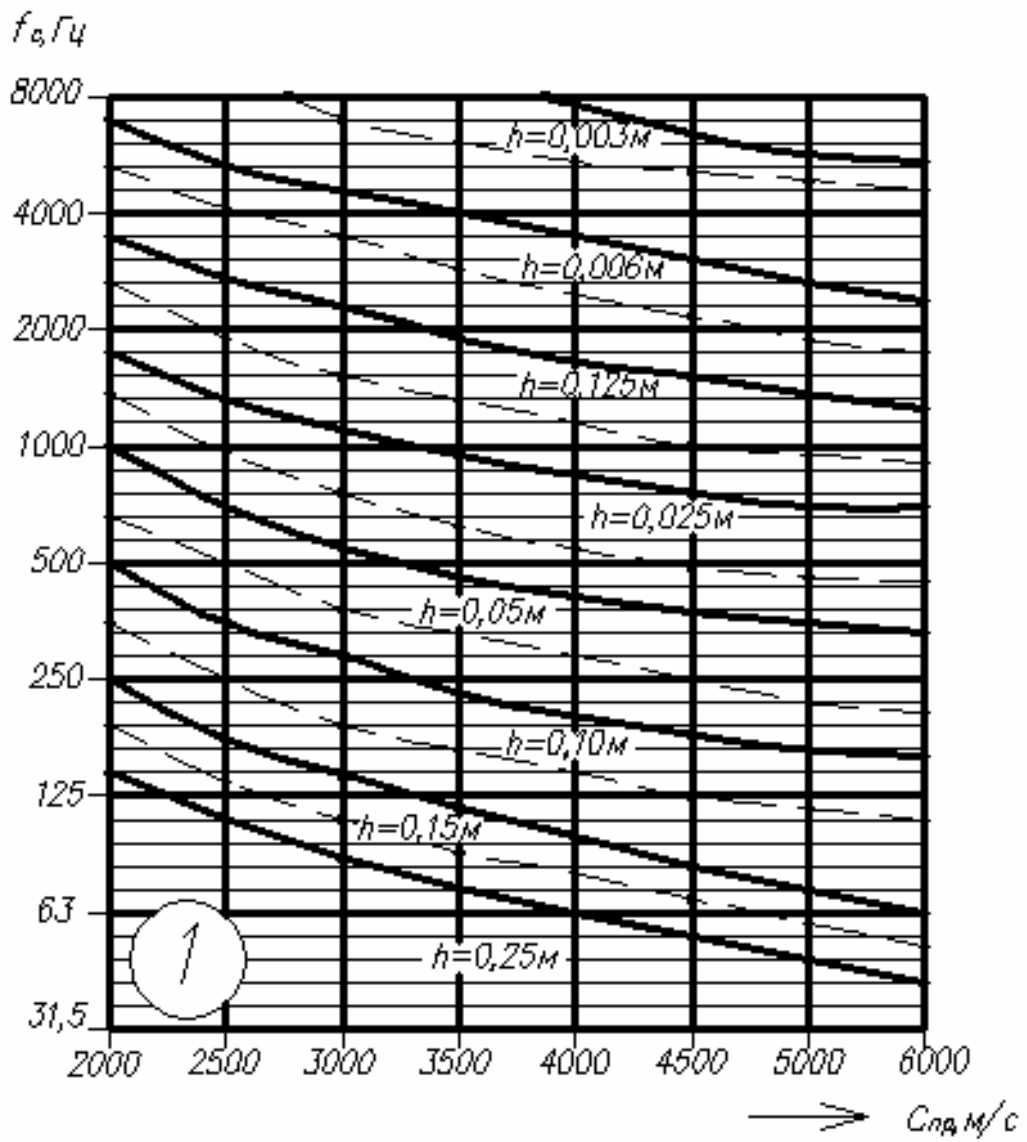


Рис.1III. Номограмма определения граничной частоты f_c

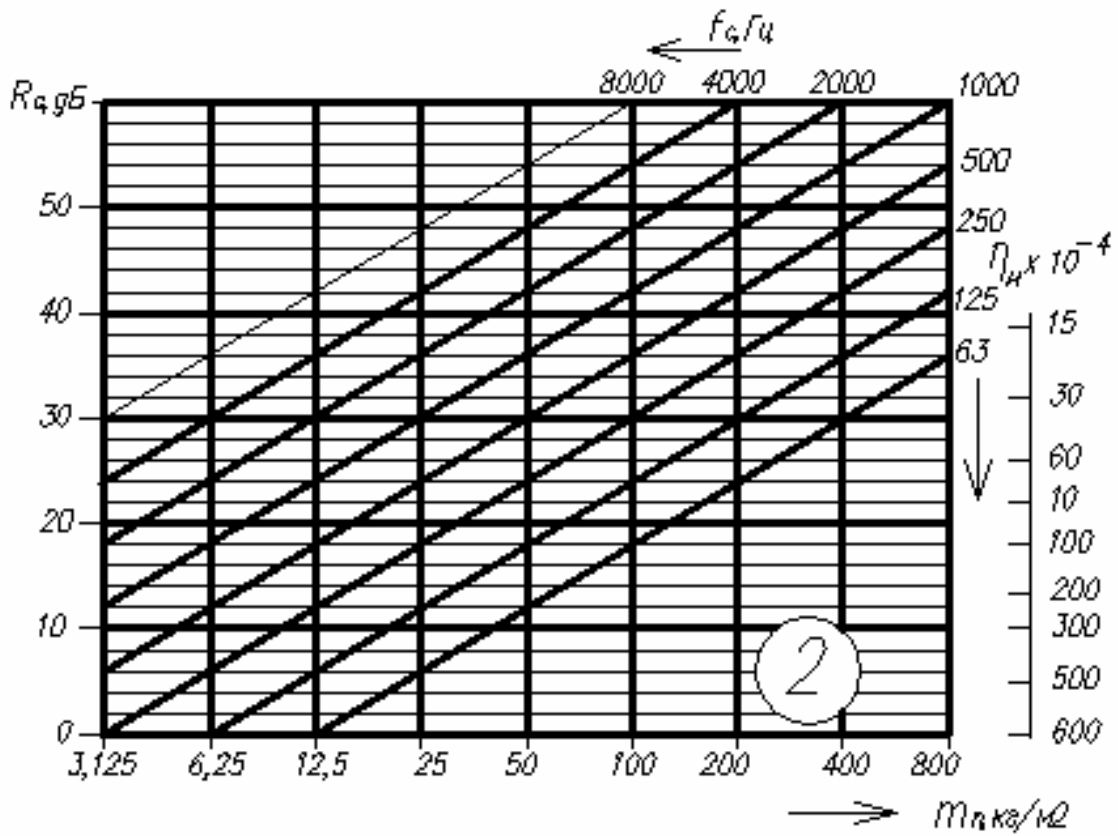


Рис. 1П2. Номограмма определения ординаты граничной частоты R_c

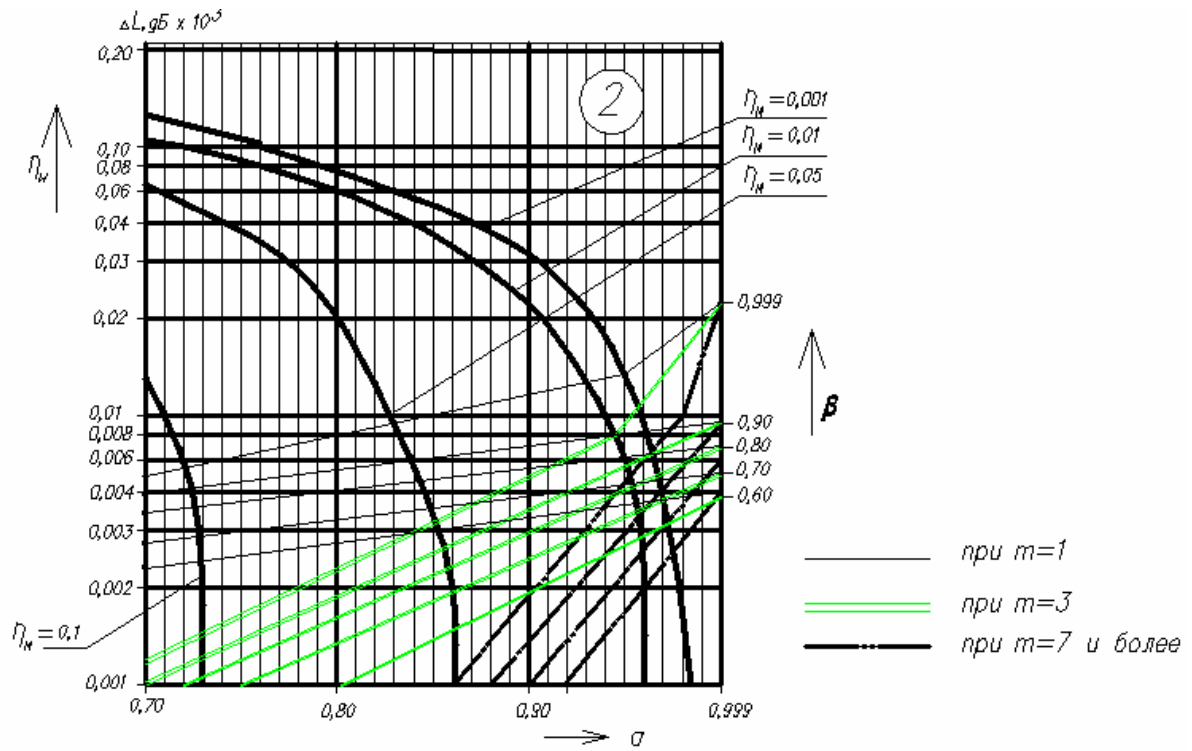


Рис. 1П3. Номограмма определения величины снижения изоляции ΔL

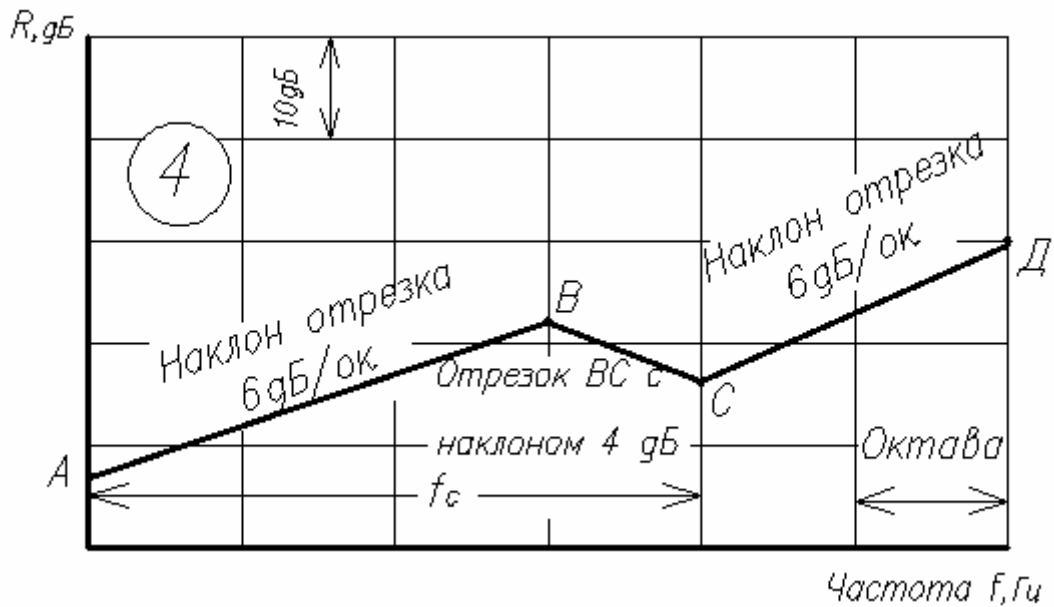


Рис. 1П4. Частотная характеристика изоляции воздушного шума однослойной конструкцией

**Пример статистической обработки результатов
экспериментальных исследований**

1. Отсеивание погрешностей измерений.

а) вычисляются наибольшие отклонения по формуле

$$2d_{\max} = |y_{\max(\min)} - \hat{y}|; d_{\max} = 4,045;$$

б) по таблице определяются процентные точки распределения Стьюдента $\tau_{(5\%; 9)} = 1,8331$; $\tau_{(0,1\%; 9)} = 4,2968$

$$\tau_{(5\%; 9)} = (1,8331 \cdot \sqrt{10}) / (9 + 1,8331^2)^{0,5} = 1,649;$$

$$\tau_{(0,1\%; 9)} = (4,2968 \cdot \sqrt{10}) / (9 + 4,2968^2)^{0,5} = 2,59;$$

Так как $\tau_1 = d_{\max} / S = 4,045 / 4,481 = 0,903 < \tau_{(5\%; 9)}$, то выборку (табл. прил. 2П1) оставляем без изменения.

2. Проверка нормальности распределения.

а) проверка по размаху варьирования:

$$\max = 31; \min = 16; R = 15; R/S = 3,348.$$

При вероятности ошибки в 10 % и $n=11$ назначаются границы:

нижняя граница = 2,84; верхняя граница = 3,68.

Как видно, выборка находится в указанных пределах.

б) для удобства сравнения эмпирического распределения и нормального используются показатели:

– асимметрии $g_1 = m_3 / m_2^{1,5} = 0,67$;

– эксцесса $g_2 = m_4 / m_2^2 - 3 = -0,54$.

в) несмещенные показатели асимметрии и эксцесса определяются по формулам:

$$G_1 = \{[n \cdot (n - 1)] / (n - 2)\} \cdot g_1 = [(11 \cdot 10)^{0,5}] \cdot 0,67 = 0,78,$$

$$G_2 = [(n + 1) + 6] \cdot \{ (n - 1) \} / [(n - 2) \cdot (n - 3)] = \\ = [10 / (9 \cdot 8)] \cdot \{ 12 \cdot (-0,54) + 6 \} = -0,067.$$

Продолжение прил. 2

Таблица 2П1

№ п/п	X_i	ΔX_i	Y_i	$\Delta X_i * Y_i$	ΔX_i^2	ΔY_i	ΔY_i^2	$\hat{Y}(X_i)$	$Y_i - \hat{Y}_i$	\tilde{x}_i	$(X_i - \tilde{x}_i)$	$(X_i - \tilde{x}_i)^2$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	1	-5	20	-100	25	-4,09	16,728	20,457	0,457	4,52	-3,52	12,3904
2	2	-4	31	-124	16	6,91	47,748	21,184	9,816	8,502	6,502	42,276
3	3	-3	16	-48	9	-8,09	65,448	21,911	-5,910	3,072	0,072	0,0052
4	4	-2	23	-46	4	-1,09	1,1881	22,638	0,362	5,606	1,606	2,5790
5	5	-1	19	-19	1	-5,09	25,908	23,365	-4,370	4,158	-0,840	0,7090
6	6	0	22	0	0	-2,09	4,368	24,092	-2,090	5,244	0,756	0,5720
7	7	1	24	24	1	-0,09	0,0081	24,819	-0,820	5,968	1,032	1,0650
8	8	2	25	50	4	0,91	0,8281	25,546	-0,550	6,330	1,670	2,7889
9	9	3	27	81	9	2,91	8,468	26,273	0,727	7,054	1,946	3,7870
10	10	4	28	112	16	3,91	15,288	27,000	1,010	7,416	2,584	6,6770
11	11	5	30	150	25	5,91	34,928	27,727	2,273	8,140	2,860	8,1796
Σ	66	0	265	80	110	0,01	220,91					81,029
$\bar{x} = 6; \bar{y} = 24,09; S = 4,481; \hat{S} = 4,7; m_1 = 0,01; m_2 = 20,08; m_3 = 59,96; m_4 = 992,33; V = 20,65 \%$												

Таблица 2П2

№ п/п	Сред. интерв. X_i	Част. B_i	X_i^2	$B \cdot X_i$	$B \cdot X_i^2$	$ X_i - \bar{x} $	$ X_i - \bar{x} /S = z$	$f(z)$	$f(z) \cdot k$	F_B	F_E
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	17,5	1	306,25	17,5	306,25	-6,545	1,745	0,0863	0,0759	1	0,759
2	20,5	2	420,25	41	840,5	-3,545	0,945	0,2541	2,236	3	2,994
3	23,5	4	552,25	94	2209	-0,545	0,145	0,3945	3,471	7	6,466
4	26,5	2	702,25	53	1404,5	2,455	0,654	0,3230	2,840	9	9,305
5	29,5	2	870,25	59	1740,5	5,455	1,454	0,1394	1,3	11	10,54
$\bar{x} = 24,045; S = 3,751; k = 8,798; \hat{D} = 0,063; n(0,10;11) = 0,352$											

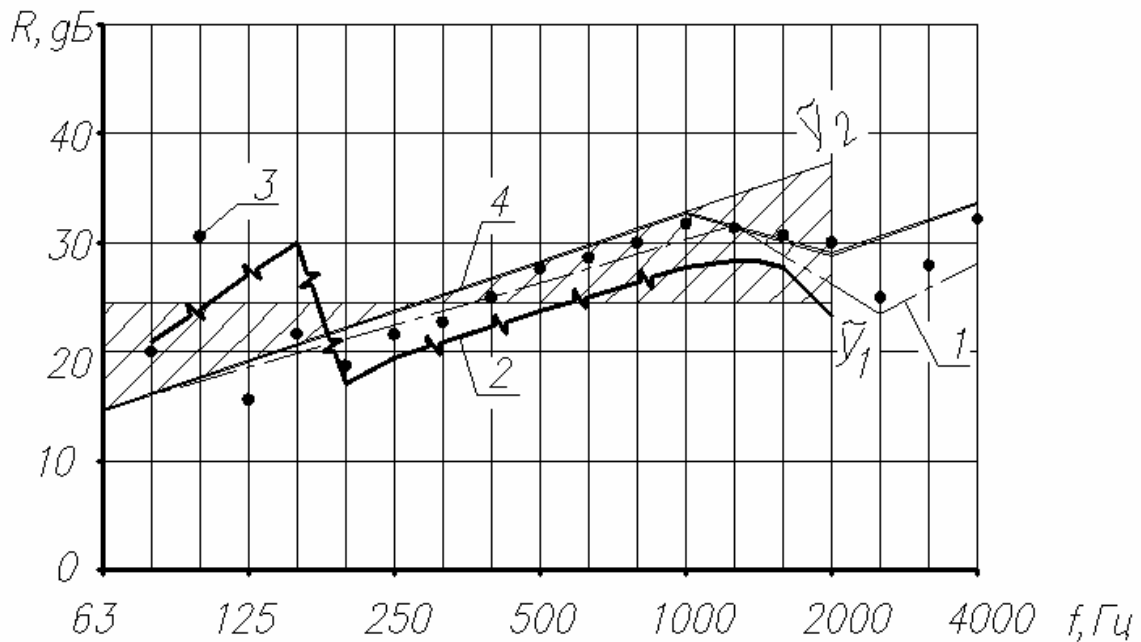


Рис. 2П1. Статистическая оценка методик расчета изоляции воздушного шума пластиной из дюралюминия 1,2·1,08 м² толщиной 0,005 м:
 1 – расчет по методике [55]; 2 – расчет по методике [53]; 3 – эксперимент [4];
 5 – расчет по предлагаемой методике

г) для проверки возможности гипотезы нормального распределения следует вычислить среднее квадратическое отклонение для показателей асимметрии и эксцесса:

$$S_{G_1} = \{[6n \cdot (n - 1)] / [(n - 2) \cdot (n + 1) \cdot (n + 5)]\}^{0.5} = \{(6 \cdot 11 \cdot 10) / (9 \cdot 12 \cdot 14)\} = 0,661,$$

$$S_{G_2} = \{[24n \cdot (n - 1)^2] / [(n - 3) \cdot (n - 2) \cdot (n + 3) \cdot (n + 5)]\}^{0.5} = \\ = \{(24 \cdot 11 \cdot 10^2) / (8 \cdot 9 \cdot 14 \cdot 16)\} = 1,279.$$

Если $|G_1| = 0,78 < 3S_{G_1} = 1,983$ и $|G_2| = -0,067 < 5S_{G_2} = 6,395$, то гипотеза нормального распределения верна и может быть принята.

д) для проверки гипотезы нормальности распределения используется критерий Колмогорова – Смирнова, построится кумулятивная линия, гистограмма и полигон распределения.

По таблице критических значения критерия Колмогорова – Смирнова следует, что $D_{(10\%,11)} = 0,352 \gg \hat{D} = 0,063$. Таким образом, гипотеза нормальности распределения на 10 % уровне принимается.

Массив исходных данных разбивается на классы по правилу Штюргесса; число классов $L = 1 + 3,32n \approx 5$.

Таблица 2 ПЗ

№ п/п	Классы	Середина интервала	Частоты		
			Абсолют.	Относит.	Относ.накопл.
1	2	3	4	5	6
1	от 16 до 19	17,5	1	0,091	0,091
2	от 19 до 22	20,5	2	0,182	0,273
3	от 22 до 25	23,5	4	0,363	0,636
4	от 25 до 28	26,5	2	0,182	0,818
5	от 28 до 31	29,5	2	0,182	1,000

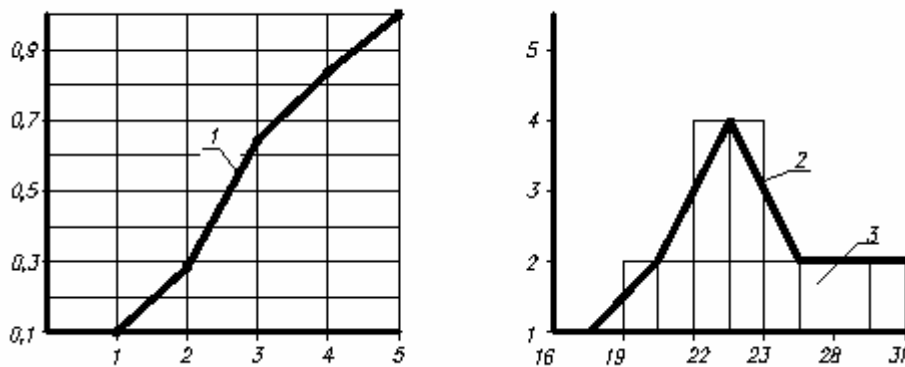


Рис. 2П2. Полигон распределения и графическое распределение частот:
1 – кумулятивная линия; 2 – гистограмма распределения; 3 – полигон
распределения

3. Статистическое оценивание парной регрессии и корреляции.

а) вычисляются промежуточные значения:

$$Q_x = \sum_{n=1}^{11} x_i^2 - [1/n] \left(\sum_{n=1}^{11} x \right)^2 = 506 - (4356 / 11) = 110,$$

$$Q_y = \sum_{n=1}^{11} y_i^2 - [1/n] \left(\sum_{n=1}^{11} y \right)^2 = 6605 - (70225 / 11) = 220,91,$$

$$Q_{xy} = \sum_{n=1}^{11} x_i y_i - [1/n] \cdot \left(\sum_{n=1}^{11} x_i \right) \cdot \left(\sum_{n=1}^{11} y_i \right) = 1670 - 1590 = 80$$

$$\text{Проверка: } \sum_{n=1}^{11} (x_i + y_i)^2 - [1/n] \cdot \left\{ \sum_{n=1}^{11} (x_i + y_i)^2 \right\} = Q_x + Q_y + 2Q_{xy};$$

$$490,911 = 490,911$$

б) вычисляются коэффициенты регрессии $b_{0(yx)}$; $b_{1(yx)}$; $b_{0(xy)}$; $b_{1(xy)}$, коэффициент корреляции r , Q_{yx} , стандартные ошибки \dot{S}_x , \dot{S}_y , \dot{S}_{xy} , \dot{S}_{yx} , $\dot{S}_{b0(yx)}$, $\dot{S}_{b1(xy)}$.

$$b_{1(yx)} = 80/110 = 0,727; b_{0(yx)} = \bar{y} - b_{1(yx)} \cdot \bar{x} = 24,09 - 0,727 \cdot 6 = 19,73;$$

$$b_{1(xy)} = 80/220,9091 = 0,362; b_{0(xy)} = \bar{x} - b_{1(xy)} \cdot \hat{y} = 6 - 0,362 \cdot 24,09 = -2,72;$$

$$r = Q_{xy} / (Q_x \cdot Q_y)^{0,5} = 80 / (110 \cdot 220,91)^{0,5} = 0,513;$$

$$Q_{yx} = Q_y - b_{1(yx)} \cdot Q_{xy} = 220,91 - 0,727 \cdot 80 = 162,75;$$

$$\dot{S}_x = [Q_x / (n - 1)]^{0,5} = 3,317; \dot{S}_y = [Q_y / (n - 1)]^{0,5} = 4,7;$$

$$\dot{S}_{xy} = Q_{xy} / (n-1) = 8; \dot{S}_{yx} = [Q_{yx} / (n - 2)]^{0,5} = 4,2525.$$

$$\text{Проверка вычислений: } r = Q_{xy} / (Q_x \cdot Q_y)^{0,5} = \dot{S}_{xy} / (\dot{S}_x \cdot \dot{S}_y) = (b_{1(yx)} \cdot b_{1(xy)});$$

$$0,513 = 0,513$$

$$\dot{S}_{b0(yx)} = \dot{S}_{xy} \cdot [(1/n) + (\bar{x}^2 / Q_x)]^{0,5} = 2,75;$$

$$(\dot{S}_{b0(yx)} / \dot{S}_{b1(yx)}) = \left(\sum_{n=1}^{11} X_i^2 \right)^{0,5};$$

$$6,782 = 6,782;$$

$$\dot{S}_{y_{\text{ост}}}^2 = \left[\sum_{n=1}^{11} (y_i - \tilde{y})^2 \right] / (n - 2) = 18,081;$$

$$\dot{S}_{x_{\text{ост}}}^2 = \left[\sum_{n=1}^{11} (x_i - \tilde{x}_i)^2 \right] / (n - 2) = 9,003.$$

В решении имеют место два уравнения регрессии:

$$- \text{ прямое } \tilde{y} = b_{0(yx)} + b_{1(yx)} \cdot X = 19,73 + 0,727 \cdot X;$$

$$- \text{ обратное } \tilde{x} = b_{0(xy)} + b_{1(xy)} \cdot Y = 0,362 - 2,72 \cdot Y.$$

Значимость коэффициентов регрессии проверяем по t -критерию

Стьюдента:

$$\tilde{t}_{b1(yx)} = b_{1(yx)} / \dot{S}_{b1(yx)} = 0,727 / 0,4055 = 1,79;$$

$$t_{b0(yx)} = b_{0(yx)} / \dot{S}_{b0(yx)} = 19,73 / 2,75 = 7,17.$$

Табличное значение $t_{(11; 5\%)}^T = 1,77$, следовательно коэффициенты регрессии статистически значимы.

4. Построение линии регрессии.

а) координаты центра тяжести $\bar{x} = \sum X_i / n = 6$; $\hat{y} = \sum Y_i / n = 24,09$.

б) уравнение прямой на плоскости в декартовых координатах записывается в следующем виде:

$$\hat{y} = 0,727 \cdot x + 19,73;$$

в) оценка дисперсии ошибки и доверительный интервал при 2,5 % уровне значимости определяется по формуле

$$\sigma^2 = S^2 = [1 / (n-2)] \cdot \sum [y_i - \hat{y}(x)_i]^2; S^2 = 162,727 / 9 = 18,081;$$

$$\text{Откуда } S = 4,252, \text{ а } Z = \sum_{n=1}^{11} (\Delta X_i)^2 = 110.$$

$$I(a) = \tilde{a} \pm t_{\beta(n-2)} \cdot S / Z^{0.5} = 0,727 \pm 2,2622 \cdot 4,252 / 110 = [1,835; -0,0008].$$

Часть плоскости (рис. 2П1), отсекаемая «ножницами» линий регрессии $\hat{y}_1 = 24,08 - 0,0008 \cdot x$ и $\hat{y}_2 = 13,074 + 1,835 \cdot x$ будет отвечать условиям вероятности 97,5 %. Интервальная оценка производится по 1/3 – октавным или октавным полосам частот пропускания в указанной области.

Точность методов расчета изоляции воздушного шума пластиной из дюралюминия (рис. 4.1) оценивается в процентах и представлена в табл. 2П4.

Таблица 2 П 4

Диапазон частот	Предлагаемый метод расчета	Метод СНиП	Метод М.С.Седова
1	2	3	4
$f < 320$ Гц	100 %	43 %	28,5 %
$320 < f < 800$ Гц	100 %	100 %	50 %
$f > 800$ Гц	100 %	100 %	100 %

Процентное отношение, как видно из рис.2П1, дает наглядное представление о том, какая часть расчетной кривой звукоизоляции попадает в область доверительного интервала при $p=97,5$ %.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	5
2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ВОЗДУШНОГО ШУМА ЛЕГКИМИ ОГРАЖДЕНИЯМИ И ЗВУКОВОЙ ВИБРАЦИИ В УГЛОВЫХ СОЕДИНЕНИЯХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СПОСОБА ЗАКРЕПЛЕНИЯ	15
2.1. Разработка методики исследования звукоизоляции легкими ограждениями	15
2.1.1. Экспериментальная установка.	15
2.1.2. Методика измерений.....	20
2.1.3. Обобщение результатов экспериментальных исследований.	22
2.2. Разработка методики экспериментальных исследований распространения упругих колебаний через угловой стык стержневой системы	25
2.2.1. Выбор параметров экспериментальной установки	25
2.2.2. Измерительная аппаратура.....	28
2.2.3. Предварительное исследование колебательной системы штанг при угловом соединении.....	30
2.2.4. Методика измерений.....	31
2.2.5. Обобщение результатов эксперимента.....	34
2.3. Оценка погрешностей и ошибок полученных результатов.....	39
3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КРАЕВЫХ УСЛОВИЙ НА ЗВУКОИЗОЛЯЦИЮ ОГРАЖДЕНИЙ И ВИБРОИЗОЛЯЦИЮ СТЫКОВ КОНСТРУКЦИЙ.....	42
3.1. Теоретические основы построения частотной характеристики изоляции воздушного шума легкими ограждениями.....	42
3.1.1. Построение расчетных схем и моделей	42
3.1.2. Изоляция воздушного шума однослойными ограждениями.	44
3.1.3. Влияние условий закрепления контура на собственную изоляцию легкого ограждения	46
3.1.4. Снижение изоляции на резонансах.....	48
3.2. Прохождение упругих колебаний через прямоугольный стык строительных конструкций	50
3.2.1. Построение расчетной схемы и модели.....	51
3.2.2. Расчетные значения коэффициентов прохождения изгибных колебаний через жесткое угловое соединение ..	54

4. ИНЖЕНЕРНЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ИЗОЛЯЦИИ ВОЗДУШНОГО ШУМА ЛЕГКИМИ ОГРАЖДЕНИЯМИ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ ЗАКРЕПЛЕНИЯ ПО КОНТУРУ, А ТАКЖЕ ЗВУКОВОЙ ВИБРАЦИИ УГЛОВЫМИ СОЕДИНЕНИЯМИ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ	65
4.1. Изоляция воздушного шума легкими ограждениями с учетом влияния краевых условий.....	65
4.2. Область применения расчетного метода.....	77
4.3. Точность расчетного метода	82
4.4. Рекомендации по конструированию узлов сопряжения легких ограждений.....	82
4.5. Изоляция звуковой вибрации угловыми соединениями строительных конструкций.....	86
4.6. Практическая реализация расчетного метода изоляции воздушного шума легкими ограждениями на ЭВМ	94
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	98
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	100
ПРИЛОЖЕНИЯ	107

Научное издание

Разживин Владимир Михайлович

ИЗОЛЯЦИЯ ВОЗДУШНОГО ШУМА ЛЕГКИМИ
ОГРАЖДАЮЩИМИ КОНСТРУКЦИЯМИ ЗДАНИЙ
С УЧЕТОМ ИХ ЗАКРЕПЛЕНИЯ

Монография

В авторской редакции

Верстка Н.А. Сазонова

Подписано в печать 13.08.2014. Формат 60x84/16.

Бумага офисная «Снегурочка». Печать на ризографе.

Усл.печ.л. 7,0. Уч.-изд.л. 7,5. Тираж 500 экз. 1-й завод 100 экз.

Заказ № 268

Издательство ПГУАС.
440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28.