

Оглавление

Введение.....	5
1. Процессы формирования шумовых полей в помещениях и методы оценки их энергетических параметров.....	7
1.1. Значение расчетов шума в помещениях при проектировании шумозащитных мероприятий.....	7
1.2. Условия формирования шумовых полей в помещениях и их учет в методах расчета энергетических параметров звуковых полей.....	11
1.3. Современные требования к методам расчета энергетических параметров шума в помещениях и оценка соответствия им используемых в практике проектирования расчетных моделей и методов.....	24
2. Параметры и структура отраженных звуковых полей помещений при зеркально-диффузной модели отражения звука от ограждений.....	32
2.1. Теоретическое обоснование зеркально-диффузной модели отражения звука элементами ограждающих конструкций.....	32
2.2. Средняя длина свободного пробега звука в помещениях с диффузным отражением звука от ограждений.....	49
2.3. Характеристики звукового поля помещения при зеркальном отражении звука от ограждений.....	54
2.3.1. Длины свободного пробега звуковых лучей при зеркальном отражении.....	55
2.3.2. Представление отраженного звукового поля через группы звуковых лучей с близкими характеристиками.....	59
2.3.3. Исследование среднего коэффициента звукопоглощения при зеркальном отражении звука от ограждений.....	69
2.4. Исследование процессов нарастания и затухание звуковой энергии в помещениях с зеркально отражающими поверхностями.....	73
2.5. Оценка структуры шумового поля помещений с комбинированным отражением звука от ограждений.....	78

3. Комбинированные расчеты шума в помещениях при зеркальном, диффузном и зеркально-диффузном отражении звука от ограждений.....	92
3.1. Комбинированные расчеты шума при зеркальном и диффузном отражении звука	92
3.2. Приближенные расчетные модели, реализующие зеркально-диффузное отражение звука от ограждений	99
3.2.1. Использование метода прослеживания лучей для расчета энергетических характеристик отраженного звукового поля при зеркально-диффузном отражении звука	101
3.2.2. Приближенные геометрические статистические методы расчета энергетических характеристик отраженного звукового поля при зеркально-диффузном отражении звука.....	103
3.3. Комбинированные расчетные модели, учитывающие переход зеркально отражаемой энергии в диффузно-рассеянную энергию.....	108
3.3.1. Комбинированная расчетная модель, основанная на методе мнимых источников и интегральном уравнении Куттруфа	110
3.3.2. Комбинированная расчетная модель, основанная на методе прослеживания лучей и интегральном уравнении Куттруфа	112
3.3.3. Комбинированная расчетная модель, основанная на методе прослеживания лучей и численном статистическом энергетическом методе	114
3.4. Исследование коэффициента связи плотности потока и градиента плотности диффузно рассеянной звуковой энергии в квазидиффузных звуковых полях	121
3.5. Исследование коэффициентов рассеивания зеркальной энергии при зеркально-диффузном характере отражения звука от ограждений	141
3.6. Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных уровней звукового давления в производственных помещениях	158
Заключение	177
Список использованных источников.....	180

Введение

Шум в гражданских и промышленных зданиях относится к основным негативным факторам, влияющим на здоровье людей, повышающим травматизм, снижающим производительность труда. Для ограничения шума в зданиях с большими шумовыми воздействиями на людей используют архитектурно-планировочные и конструктивные методы шумозащиты. В настоящее время промышленностью выпускается широкая номенклатура эффективных звукопоглощающих, звукоизолирующих и экранирующих конструкций. Их применение для борьбы с шумом приводит к существенному удорожанию строительства объектов. Затраты на снижение шума могут быть минимальными, если шумозащитные мероприятия будут предусматриваться и разрабатываться на стадии проектирования объекта. В случае ошибок, допущенных при выборе и проектировании средств снижения шума, реальные уровни шума могут существенно превышать допустимые величины. Последующие расходы на их снижение на стадии эксплуатации объектов значительно возрастают, а в некоторых случаях это снижение оказывается невыполнимой задачей.

Степень соответствия шумового режима проектируемого объекта санитарным нормам определяется на основе расчетов энергетических параметров шумовых полей в помещениях. Поэтому обеспечение точности и надежности методов расчета, используемых при определении ожидаемых энергетических параметров шумовых полей в гражданских и промышленных зданиях, имеет гигиеническое, социальное и экономическое значение.

Энергетические параметры шумовых полей в помещениях определяются энергией прямого звука, непосредственно приходящей от источника шума, и энергией шума, возникающей при отражении звука от ограждений.

Для расчета прямого звука в настоящее время разработаны достаточно надежные методы, учитывающие форму и размеры источников шума, характер излучения ими звуковой энергии и другие необходимые для расчетов характеристики источников [1].

Процесс формирования отраженной энергии в помещении является более сложным многофакторным процессом. Для его описания требуются математические модели, учитывающие многочисленные условия и факторы, влияющие на формирование и распространение отраженной энергии в замкнутых воздушных объемах помещений.

Анализ условий и факторов, влияющих на формирование шумовых полей в помещениях, показал, что одним из наиболее важным из них является характер отражения звука от ограждений. Характер отражения существенным образом влияет на акустические характеристики и структуру отраженных шумовых полей и в конечном итоге на их энергетические параметры. Поэтому исследование акустических характеристик и структуры отраженных шумовых полей является важной задачей в процессе разработки методов расчета энергетических параметров отраженной составляющей шума.

Большинство разработанных в настоящее время методов расчета энергетических параметров звуковых полей помещений базируется на представлениях о двух идеальных моделях отражений звука от ограждений: зеркальном или диффузном. Однако сравнение результатов расчетов, полученных методами, использующими зеркальную или диффузную модели отражения, с данными экспериментов показывает, что реальный характер отражения звука одновременно несет в себе признаки зеркального и диффузного отражения. В этом случае, как показано в работе, при расчетах следует использовать комбинированные расчетные модели. При этом входящие в расчетную модель методы должны учитывать параметры и структуру звуковых полей, формирующихся в помещениях при зеркально-диффузном отражении звука от ограждений.

По указанным выше причинам в монографии даны результаты исследований параметров и структуры отраженных звуковых полей, образующихся в помещениях при зеркальном, диффузном и зеркально-диффузном отражениях звука от ограждений.

В монографии подробно рассмотрены разработанные авторами комбинированные методы расчета шума в помещениях при зеркально-диффузном отражении звука от ограждений. Предложенные методы в достаточной мере отвечают требованиям современного автоматизированного проектирования зданий.

1. Процессы формирования шумовых полей в помещениях и методы оценки их энергетических параметров

1.1. Значение расчетов шума в помещениях при проектировании шумозащитных мероприятий

Для обеспечения требуемого шумового режима в помещениях гражданских и промышленных зданий необходимо применение комплекса противозвуковых мер, в который входят способы ограничения излучения звуковой энергии источником и способы снижения звука на путях его распространения (*рис. 1.1*).

Снижение шума в источнике возникновения и ближней его зоне или замена шумного оборудования являются наиболее эффективными способами улучшения шумового режима. Однако по техническим причинам не всегда удастся снизить шум машин и оборудования до нормативных уровней. В ряде случаев это уменьшение требует значительных затрат и становится экономически нецелесообразным по сравнению с другими методами. Замена оборудования — длительный процесс, требующий к тому же значительных материальных затрат, и, как правило, может быть выполнен при реконструкции производства. В этой связи в практике снижения шума в производственных зданиях широкое распространение находят *организационно-технологические, архитектурно-планировочные и строительно-акустические методы*. Наряду с методами первой группы они позволяют дополнительно снижать уровни шума на рабочих местах, являясь при этом иногда наиболее целесообразными или единственно возможными. К основным способам данной группы относятся: рациональное взаимное расположение цехов и отделений с разными уровнями шума; оптимизация по этим условиям объемно-планировочных решений помещений; расстановка оборудования и размещения рабочих мест в цехах с учетом шумовых характеристик оборудования; обеспечение надлежащей звукоизоляции ограждений помещений; облицовка стен и потолков звукопоглощающими конструкциями и использование

штучных звукопоглотителей; установка звукоизолирующих кабин, акустических экранов и выгородок.

Выбор конкретного мероприятия и его эффективность зависят от производственных условий: характера технологического процесса; частотного состава шума; требуемого снижения шума; объемно-планировочного решения помещения и др. Рациональность выбора метода зависит также от стадии, на которой он может быть применен.

На рис. 1.1 даны основные мероприятия по шумозащите в помещениях производственных зданий [1].



Рис. 1.1. Основные мероприятия по снижению воздушного шума в помещениях производственных зданий [1]

Снижение шума внутри источника и в его ближней зоне достигается усовершенствованием конструкций источника, повышением его звукоизоляции путем установки кожухов или боксов, снижением излучения звуковой энергии за счет установки глушителей шума в газовоздушных каналах и т. д. [2; 3]. Установка глушителя шума является дорогостоящим мероприятием, эффективность которого зависит от правильного выбора конструкции глушителя и места его монтажа в тракте в каждом конкретном случае [3]. Для достижения необходимого акустического эффекта при установке глушителя необходимо иметь метод расчета, позволяющий провести объективную оценку распространения звуковой энергии в канале до выхода из устья и тем самым обеспечить достоверность технико-экономических расчетов возможных вариантов глушения [4].

Размещение производственного оборудования в специальных кожухах или боксах приводит к снижению излучения шума корпусом агрегата и, соответственно, к улучшению шумового режима внутри помещения. Закрытое в кожухах и боксах оборудование представляет собой объемный источник шума с разными излучающими характеристиками поверхностей. Поэтому при проектировании кожухов необходимо иметь методы расчета шума, объективно оценивающие излучение звуковой энергии с этих поверхностей [5].

Разработка противозумных организационно-технологических и архитектурно-планировочных мероприятий наиболее рациональна на ранних стадиях проектирования объекта. Противозумные мероприятия увязываются с технологической частью проекта, в которой решаются вопросы оптимального размещения технологического оборудования внутри отдельных помещений и по зданию в целом.

На стадии технологического проектирования требования по снижению шума обеспечиваются группированием источников по степени шумности и изолированием в отдельных помещениях мощных источников. На этой же стадии решаются задачи по взаимному размещению помещений исходя из условий обеспечения технологического процесса и санитарно-гигиенических требований, в том числе и по ограничению проникновения шума в смежные помещения. Оптимизация размещения источников и правильный выбор планировки позволяют снижать уровни шума на рабочих местах в пределах 5–10 дБ. Эффективность мер напрямую связана с наличием достоверного метода расчета шумовых полей.

Выбор объемно-планировочных параметров помещений (длины, ширины и высоты) в первую очередь определяется технологическими процессами. Затем принятые параметры уточняются с учетом требований санитарного режима, и в частности, по уровням шума. Объективность оценки шумового режима в этом случае зависит от степени достоверности учета в принятом методе расчета условий формирования шумовых полей в помещениях с различными объемно-планировочными параметрами.

Разработка строительно-акустических мероприятий базируется на обоснованном выборе конструкций зданий с соответствующими звукопоглощающими, звукоизолирующими или экранирующими свойствами.

Анализ роли и места этих конструкций в здании показывает, что для части из них функция защиты от шума не является главной, например, для стен и перекрытий. Их конструктивное решение определяется основными функциями, а обеспечение условий защиты от шума проверяется расчётом при принятом решении. При невыполнении условий разрабатываются дополнительные мероприятия, обеспечивающие защиту и от шума, например, устройство на стене гибких плит на отnose, повышающих ее звукоизоляцию [6], устройство звукоизолирующих прокладок в перекрытиях [7] и т. д.

В случае, если функция защиты от шума является главной (звукопоглощающие потолки, экраны, перегородки и др.), конструктивное решение определяется этим условием и проверяется по соответствию другим требованиям (противопожарным, прочности, долговечности и т. д.).

Процесс проектирования конструкций по условиям и с учетом защиты от шума имеет циклический характер, требующий многократного повторения расчетов уровней шума [1].

Эффективность применения строительно-акустических методов зависит от различных факторов: планировочных и акустических характеристик помещения, особенностей технологического или функционального процесса, наличия и расположения оборудования, а также расположения рабочих мест и т. д. В большинстве помещений производственного и гражданского назначения шумовая обстановка определяется различными сочетаниями вышеперечисленных факторов и, следовательно, эффективность применения методов снижения шума в различных помещениях неодинакова. Использование

в подобных условиях какого-либо одного метода не всегда обеспечивает уменьшение уровней шума до нормативных величин.

Более надежно и рационально решить эту задачу позволяет *комплексное применение методов*. Для разработки эффективного комплекса строительно-акустических мер снижения шума необходимо при их проектировании выполнять сопоставление различных вариантов. К разработке должен приниматься вариант, обеспечивающий требуемое снижение шума при оптимальном соотношении между затратами на шумоглушение и экономическим эффектом, получаемым в результате его применения [8]. Основным компонентом, обеспечивающим качественную оценку сопоставляемых вариантов, является расчет энергетических параметров шума. При этом используемые расчетные методы должны объективно учитывать изменение условий формирования и распространения звуковой энергии после выполненных шумозащитных мероприятий.

1.2. Условия формирования шумовых полей в помещениях и их учет в методах расчета энергетических параметров звуковых полей

В практике борьбы с шумом основной характеристикой, определяющей энергетические параметры шумового поля и в этой связи, подлежащей расчету, является уровень звукового давления, усредненный в октавной или третьоктавной полосах частот. Как правило, при его расчетах поле считается стационарным и используются условия некогерентности и арифметического суммирования энергии волн. Средний квадрат суммарного звукового давления определяется как $\bar{p}_{сум}^2 = \sum p_i^2$, а эффекты интерференции не учитываются в силу широкополосного анализа и усреднения шума по времени. При таких условиях суммарное шумовое поле, создаваемое источником в помещении, можно представить как суперпозицию отдельных звуковых полей. В случае работы одиночного источника оно состоит из поля прямого звука и поля, создаваемого набором плоских отраженных звуковых волн, возникающих в помещении после начала работы источника.

При распространении волн происходит перенос энергии, который может быть охарактеризован *интенсивностью звуковой*

энергии I , связанной в плоской волне со среднеквадратичным давлением \bar{p}^2 выражением

$$I = \bar{p}^2 / \rho c, \quad (1.1)$$

где ρ и ρc — плотность и волновое сопротивление среды; c — скорость звука.

Другой более общей энергетической характеристикой звукового поля является *плотность звуковой энергии* ε , равная для плоской волны сумме потенциальной и кинетической энергии волны в данной точке среды

$$\varepsilon = \bar{p}^2 / \rho c^2. \quad (1.2)$$

При оценке отраженного звукового поля, состоящего из набора плоских волн, интенсивность звуковой энергии определяется как поток энергии в единицу времени через единицу площади, зависящий от ориентации этой площади в пространстве [9]. В этой ситуации более предпочтительной для оценки энергии поля является величина плотности звуковой энергии, равная в любой точке согласно принципу суперпозиции сумме плотностей энергии волн, проходящих через точку. Плотность энергии полного шумового поля равна сумме плотностей прямого $\varepsilon_{\text{пр}}$ и отраженного $\varepsilon_{\text{отр}}$ полей

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{пр}} + \varepsilon_{\text{отр}}. \quad (1.3)$$

Уровни звукового давления в расчетных точках помещения исходя из соотношений (1.1) и (1.2) могут определяться как

$$L = 10 \lg \frac{\bar{p}^2}{p_0^2} = L_I = 10 \lg \frac{I}{I_0} = 10 \lg \frac{\rho c^2 \varepsilon}{p_0^2} = 10 \lg \frac{c \varepsilon}{I_0}, \quad (1.4)$$

где $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Па, $I_0 = 10^{-12}$ Вт/м² — пороговые значения среднеквадратичного звукового давления и интенсивности звука.

Из полученных соотношений видно, что определение суммарной плотности энергии шумового поля является достаточным для характеристики его энергетических параметров при решении задач борьбы с шумом. Объективная оценка получаемых расчетных данных может быть выполнена путем сравнения рассчитанных по формуле (1.4) уровней с данными экспериментальных измерений уровней звукового давления.

Плотность энергии прямого звука пропорциональна акустической мощности источника. Законы ее распространения зависят от характеристик источника и мало связаны с параметрами помещения [10]. В настоящее время имеются достаточно простые формулы для определения плотности прямого звука, создаваемого источниками шума различных форм и размеров [1].

Распределение плотности отраженной энергии подчиняется более сложным закономерностям, которые в большинстве случаев нельзя представить в виде элементарных зависимостей. Формирование отраженного поля — многофакторный процесс, происходящий под влиянием геометрической формы и пропорций помещения, звукопоглощающих характеристик ограждений, характера отражения звука от поверхностей, наличия рассеивающих звук предметов и оборудования, акустической связи помещений и ряда других факторов. Подробно эти факторы и их влияние на формирование отраженного шума рассмотрены в монографии [1]. В систематизированном виде они приведены на *рис. 1.2*.

Объективно оценку влияния перечисленных факторов на процесс формирования шумового поля возможно произвести на основании специально выполненных *экспериментальных исследований*. Подобные исследования производились нами на натуральных и модельных объектах.

Основные эксперименты выполнены на натуральных объектах с достаточно приближенной к реальности обстановкой. Выбор таких объектов связан с тем, что распределение отраженной звуковой энергии в реальных помещениях зависит от совокупности действия множества факторов, влияние которых на энергетические параметры поля нельзя учесть отдельно. Эксперимент в натуральных условиях позволяет получить результат этого суммарного действия и может быть полезен при оценке степени адекватности расчетных методов реальным условиям формирования шумовых полей. Определяющим критерием работоспособности

любого метода является степень совпадения расчетных величин с данными натуральных измерений в реальных помещениях.



Рис. 1.2. Факторы, влияющие на формирование отраженных шумовых полей помещений

Эксперимент в натуральных условиях не всегда позволяет варьировать в достаточных пределах параметрами помещений и использовать материалы с заданными характеристиками, а также в определенной мере исключать влияние случайных факторов. Такие возможности дает эксперимент на физических моделях [11]. В этой связи нами были произведены также исследования на моделях помещений в лаборатории строительной физики ТГТУ.

С целью расширения выборки экспериментальных данных и получения более объективной информации о закономерностях распределения звуковой энергии в условиях модельных и реальных помещений при анализе дополнительно были использованы данные измерений, выполненных О. Б. Деминим на моделях из оргстекла в лаборатории НИИСФа [12], и данные работы [13].

Анализ экспериментальных данных показывает, что к наиболее существенным факторам, определяющим процесс формирования шумового поля, относятся *геометрические параметры помещения*. Падающий на ограждения прямой звук образует

отраженную звуковую энергию. Ее возникновение и величина зависят от положения источника относительно ограждений помещения. Форма и пропорции помещения ограничивают и определенным образом направляют возникающую отраженную энергию, то есть формируют потоки звуковой мощности. Влияние формы и пропорций на характер распределения отраженной энергии подтверждается многочисленной практикой теоретических и экспериментальных исследований [11; 12; 13; 14; 15]. В зависимости от процессов распространения отраженной энергии в помещениях они согласно классификации, приведенной в [14], условно делятся на соразмерные ($L/H < 5$; $B/H < 5$), длинные ($L/H > 5$; $B/H < 4$) и плоские ($L/H > 5$; $B/H \geq 4$), где L — длина, B — ширина, H — высота помещений.

К наиболее важным факторам, влияющим на образование и распространение отраженной звуковой энергии, относится также характер отражения звука от ограждений. По характеру отражения звука от поверхностей ограждений их можно разделить на помещения с зеркальным и диффузным отражением от ограждений, со смешанным зеркально-диффузным и направленно-рассеянным отражением.

Характер отражения звука и пропорции помещений определяют процессы формирования и распространения звуковой энергии в объеме помещений. Совместное влияние этих факторов на распределение отраженной звуковой энергии рассмотрено ниже.

К *соразмерным помещениям* в производственных зданиях относятся, как правило, вспомогательные помещения, в которых нередко возникают высокие уровни шумов от одиночных или групповых источников шума [16]. Такие же помещения в большом количестве имеются и в гражданских зданиях различного назначения.

В соразмерных помещениях с близкими друг к другу размерами высоты, ширины и длины отраженная энергия достаточно равномерно распределяется по объему. Равномерность сохраняется или по крайней мере изменяется незначительно при росте звукопоглощения поверхностей. Вклад в формирование общего поля отдельных поверхностей пропорционален их площади и коэффициентам звукопоглощения. Наличие рассеивающих звук предметов приводит, как правило, к дополнительному выравниванию отраженной энергии по помещению. В то же время выполненные нами в ряде помещений данной группы экспериментальные исследования показали, что отраженная энергия имеет спады уровней по мере удаления от источника.

Спады особенно заметны в помещениях, у которых соотношение размеров превосходят величину 3 и особенно при наличии звукопоглощения. Аналогичные результаты отмечены и при исследованиях на физических моделях [12; 15]. На *рис. 1.3* в качестве примера приведены уровни звукового давления в натуральных и модельном помещениях, полученные экспериментально и рассчитанные по формулам различных расчетных методов [17].

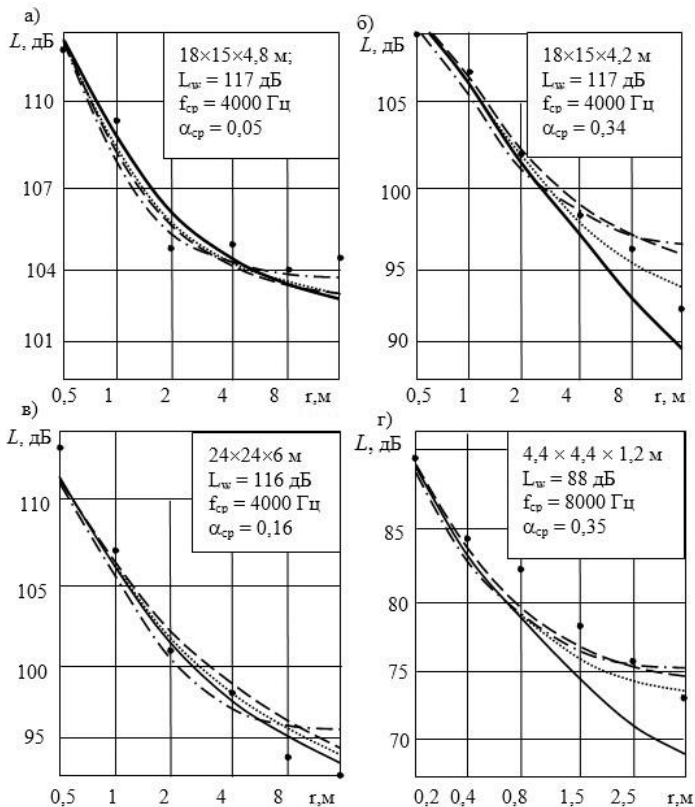


Рис. 1.3. Характер распределения звуковой энергии в соразмерных натуральных (а, б, в) и модельном (г) помещениях:

- — экспериментальные данные;
- — — — метод диффузного поля;
- - - - - метод мнимых источников;
- — — — статистический энергетический метод;
- — статистический геометрический метод

Видно, что и в помещениях с соотношениями, близкими к $L/H = 5$, $B/H = 5$, необходимо использовать расчетные методы, учитывающие наличие спадов уровней отраженной энергии.

Кроме этого, видно также, что в методах должен быть учтен характер отражения звука от ограждений (см. *рис. 1.3, б, г*). В помещениях *рис. 1.3, б, г* характер отражения звука зеркально-диффузный. В этом случае наибольшее согласование с расчетом дает статистический геометрический метод, в котором большая часть отраженной энергии рассчитывается методом мнимых источников, реализующим зеркальное отражение энергии, а остальная ее часть статистическим методом, в котором учитывается рассеянная энергия [17].

Широкое распространение в производственных и гражданских зданиях имеют несоразмерные (длинные и плоские) помещения.

К длинным помещениям в производственных зданиях относятся практически все коммуникационные помещения (коридоры), а также ряд помещений производственного назначения с размерами, имеющими соотношения близкие к граничным значениям $L/H \geq 5$, $B/H \leq 4$. В них могут находиться локальные источники с высокими уровнями звуковой мощности, определяющие шумовой режим практически на всех рабочих местах, расположенных в отраженном поле источника [18]. В гражданских зданиях к длинным относятся также коридоры и ряд помещений в зданиях общественного и торгового назначения. Звуковая энергия, распространяясь по коридорам, может проникать в смежные помещения, создавая в них неблагоприятный акустический режим [19].

В качестве примера на *рис. 1.4* приведено распределение уровней звукового давления по длине помещений при работе в них одиночных источников шума. На *рис. 1.4, а* приведено распределение уровней в коридоре учебного заведения, а на *рис. 1.4, б* — в производственном помещении. На *рис. 1.4, в* дано распределение уровней в модельном помещении из оргстекла, в котором потолок покрыт звукопоглощающим материалом.

Видно, что отраженная звуковая энергия имеет заметные спады уровней по мере удаления от источника. На величину спадов существенное влияние оказывают соотношения поперечных размеров и длины помещения, а также характер отражения звука от ограждений.

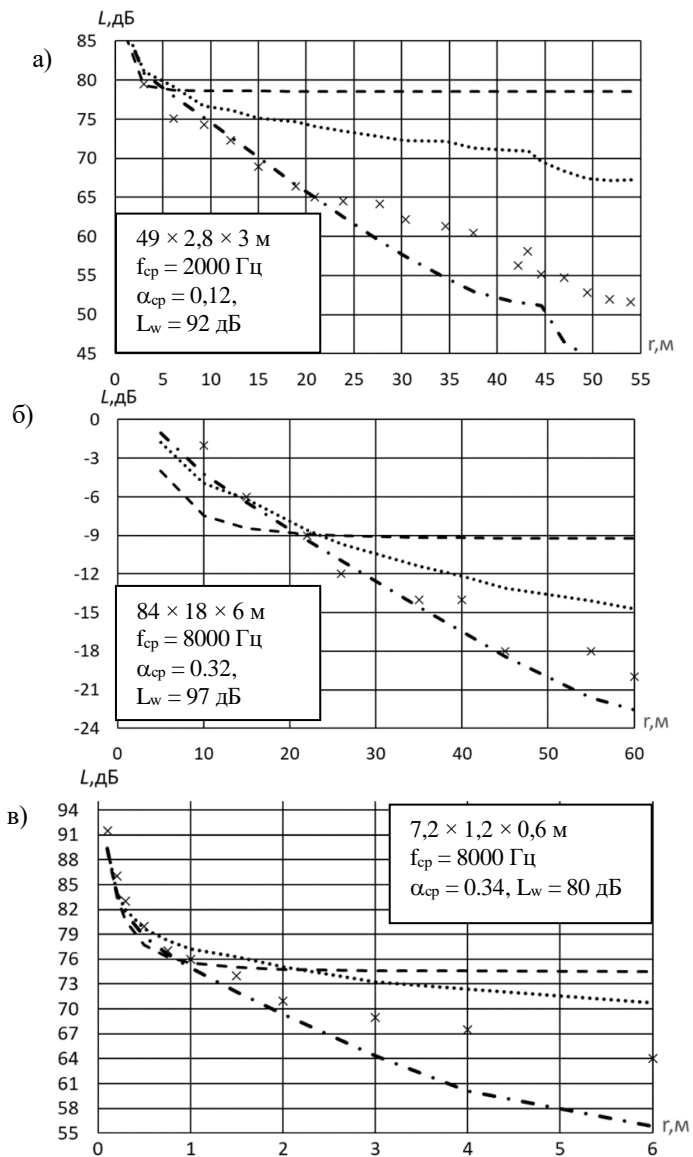


Рис. 1.4. Характер распределения звуковой энергии в длинных натуральных (а, б) и модельном (в) помещениях:
 × — экспериментальные данные; — — — — метод диффузного поля;
 ···· — метод мнимых источников; — · — · — статистический энергетический метод

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

e-Univers.ru