

Министерство образования Российской Федерации
Тамбовский государственный технический университет

В. И. ЛЕДЕНЕВ

**СТАТИСТИЧЕСКИЕ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ
РАСЧЕТА ШУМОВЫХ ПОЛЕЙ
ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ
ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ**

Тамбов
• Издательство ТГТУ •
2001

УДК 624.001.63:628.517.2
ББК Н72-022я73
Л39

Рецензент
Доктор технических наук, профессор, академик РААСН
Г. Л. Осипов

Л39 **Леденев В. И.**
Статистические энергетические методы расчета шумовых полей при проектировании производственных зданий. - Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2001. 156 с.
ISBN 5-8265-0145-6

В монографии рассматриваются разработанные автором математическая модель распределения отраженной звуковой энергии помещений производственных зданий и методы ее реализации. Модель получена на основе статистического энергетического анализа применительно к условиям формирования отраженных шумовых полей производственных помещений. Изложены основные принципы построения модели, дано обоснование границ ее применимости. Описаны аналитические, численный и инженерные методы расчета энергетических параметров шумовых полей помещений, разработанные на основе предложенной статистической энергетической модели. Представлен практический метод расчета уровней звукового давления в помещениях. Рассмотрена методика решения задач по оценке шумового режима помещений и проектированию средств шумозащиты с использованием практического метода расчета. Предложенные методы расчета и разработанные методики ориентированы на применение современной вычислительной техники.

ВВЕДЕНИЕ

К основным производственным вредностям на промышленных предприятиях, борьба с которыми имеет актуальное значение, относится шум. Шум снижает производительность труда, увеличивает затраты нервной энергии работающих, способствует росту травматизма, ухудшению работы органов слуха, развитию сердечно-сосудистых заболеваний и т.п. В этой связи создание нормальной шумовой обстановки в производственных помещениях является важной экологической и социально-экономической задачей, решаемой на стадии проектирования зданий.

В настоящее время для снижения шума в производственных зданиях разработаны эффективные методы и средства. Однако, как показывает практика, их внедрение в производство встречает определенные трудности. Одним из таких препятствий является наличие у проектировщиков некоторого пессимизма в отношении их применения. Связано это со сложностью расчетов характеристик шумового режима помещений и оценки эффективности снижения шума на стадии разработки шумозащитных мероприятий. Существующие в настоящее время методы расчета энергетических параметров шумовых полей и разработанные на их основе практические методики, как правило, требуют проведения трудоемких вычислительных операций, не обладают необходимой точностью и мало приспособлены к современным технологиям проектирования.

Большинство расчетных методов ориентировано на традиционную схему и не может эффективно использоваться в процессе автоматизированного проектирования по причинам узкой области применимости (расчеты только в длинных, плоских или соразмерных помещениях), низкой точности, обусловленной высокой степенью идеализации условий формирования шумовых полей (диффузное поле, зеркальное отражение звука и т.п.) или чрезмерной трудоемкости вычислений (метод Монте-Карло, цепи Маркова и т.д.).

В последние три десятилетия в строительной акустике начал использоваться энергетический подход, рассматривающий распределение энергии в здании как единой энергетической системе. Первоначально и наиболее широко метод использован при исследованиях распределения энергии звуковых вибраций в структуре здания. Накопленный в этой области в период 60-х – 70-х годов опыт позволил, основываясь на представлениях о распределении отраженной звуковой энергии в помещениях как конечном продукте сложных волновых процессов, протекающих при формировании звукового поля, применить принципы статистического энергетического подхода и к анализу отраженных шумовых полей помещений. В результате этого определилось направление исследования распределения отраженной звуковой энергии в производственных помещениях статистическими энергетическими методами. Имеющийся в настоящее время опыт показывает, что методы статистического энергетического подхода позволяют достаточно достоверно оценивать энергетические параметры шума при сложных с акустической точки зрения условиях формирования отраженных шумовых полей производственных помещений и отвечают требованиям автоматизированного проектирования зданий.

В данной книге автором обобщены результаты его работы в области постановки и развития статистической энергетической модели отраженных звуковых полей помещений и разработки методов ее реализации.

Выражаю глубокую благодарность академику РААСН Г.Л. Осипову за ценные советы и помощь, полученные при работе над книгой.

Автор

ГЛАВА 1. ПРОЦЕССЫ ФОРМИРОВАНИЯ ШУМОВЫХ ПОЛЕЙ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЙ И СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

1.1. Значение расчетов шумовых полей помещений при проектировании шумозащитных мероприятий в производственных зданиях

Для обеспечения требуемого шумового режима в производственных помещениях необходимо применение комплекса противозумных 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 удается 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 архитектурно-планировочные и строительско-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 цехов с учетом шумовых характеристик оборудования; обеспечение надлежащей звукоизоляции ограждений помещений; облицовка стен и



Рис.1.2. Конструкции, проектируемые по условиям или с учетом условий защиты от шума

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.

Разработка противозумных 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 и надежного 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 ограждающих конструкций зданий с соответствующими звукопоглощающими, звукоизолирующими или экранирующими свойствами.

Основные ограждающие конструкции промышленных зданий, проектируемые по условиям или с учетом защиты от шума, приведены на рис.1.2.

Анализ роли и места этих конструкций в здании показывает, что для части из них функция защиты от шума не является главной, например, окна, двери, стены, перекрытия. 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, и др.

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.).

Схема проектирования шумозащитных конструкций приведена на рис.1.3. Видно, что проектирование имеет циклический характер, требующий многократного повторения расчетов уровней шума.

Эффективность применения строительно-акустических методов снижения шума зависит от различных факторов: планировочных и акустических характеристик помещения, особенностей технологического процесса, наличия и расположения осветительных приборов, технологических коммуникаций, подъемно-транспортного оборудования, расположения рабочих мест и т.д.

Как показали выполненные нами на предприятиях железнодорожного транспорта исследования шумового режима [48,75], в большинстве помещений производственная обстановка характеризуется различными сочетаниями выше перечисленных факторов, и следовательно, эффективность применения методов снижения шума в различных помещениях неодинакова. Использование в подобных условиях какого-либо одного метода не позволяет уменьшить уровни шума до нормативных величин. Более рационально решить эту задачу позволяет комплексное применение методов.

В табл.1.1 на основании результатов выполненных нами исследований [16,48,75] и имеющейся практики борьбы с шумом на промышленных предприятиях приведен перечень основных акустических мер по снижению шума в помещениях с источниками. Здесь же указана ориентировочная величина возможного уменьшения уровня шума, позволяющая судить об акустической эффективности мероприятий, и показаны условия, влияющие на нее.

Рассмотренные возможности улучшения шумового режима не всегда полностью используются. Для разработки эффективного комплекса строительно-акустических мер снижения шума необходимо при их проектировании выполнять сопоставление проектных 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 [75]. Основным компонентом, обеспечивающим качественную оценку сопоставляемых вариантов, является метод расчета энергетических параметров шума, объективно учитывающий условия формирования шумовых полей в помещениях.

1.2. Условия формирования шумовых полей в производственных помещениях и требования к методу расчета их энергетических параметров

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 $\bar{p}_{\text{сум}}^2 = \sum p_i^2$, 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

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

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

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

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 [55]. 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

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

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 [79]. В настоящее время имеются достаточно достоверные формулы для определения плотности прямого звука, создаваемого различными источниками [7,69,71].

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 помещения, звукопоглощающих характеристик ограждений, характера отражения звука от поверхностей, наличия рассеивающих звук предметов и оборудования, акустической связи помещений и ряда других факторов (см. рис.1.4). 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. 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 [59]. В этой связи нами были произведены также исследования на моделях помещений в лаборатории строительной физики ТГТУ.

С целью расширения выборки данных и получения более объективной информации о закономерностях распределения звуковой энергии в условиях модельных и производственных помещений при анализе дополнительно были использованы данные модельных измерений, выполненных О.Б. Деминим на моделях из оргстекла в лаборатории НИИСФа [19], и данные работы [84].

Анализ экспериментальных данных показывает, что наиболее существенным факторам, определяющим процесс формирования шумового поля, относятся *геометрические параметры помещения*. Форма и пропорции помещения ограничивают и определенным образом направляют отраженную энергию, то есть формируют потоки звуковой мощности. Влияние формы на характер распределения энергии подтверждается многочисленной практикой экспериментальных и теоретических исследований [58,59,69,84].

В зависимости от условий распространения отраженной энергии помещения производственных зданий согласно классификации, приведенной в [58], делятся на соразмерные ($D/H < 5$; $B/H < 5$), длинные ($D/H > 5$; $B/H < 4$) и плоские ($D/H > 5$; $B/H \geq 4$), где D – длина, B – ширина, H – высота помещений.

В *соразмерных помещениях* с близкими к друг 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 распределения отраженной энергии по помещению.

В производственных зданиях к данной группе принадлежат, как правило, вспомогательные помещения, в которых нередко возникают высокие уровни шумов от одиночных или групповых источников шума [48]. Для снижения шума в них могут быть применены звукопоглощение и архитектурно-планировочные меры. Выполненные нами в ряде помещений данной группы экспериментальные исследования показали, что отраженная энергия имеет спады по мере удаления от источника. Спады особенно заметны в помещениях, у которых соотношение размеров превосходит величину 3 и особенно при наличии звукопоглощения. Аналогичные результаты отмечены и при исследованиях на физических моделях [19,59]. На рис. 1.5 в качестве примера приведены уровни звукового давления в натуральных и модельных помещениях, полученные экспериментально и рассчитанные по формулам различных расчетных методов. Видно, что и в помещениях с соотношениями, близкими к $D/H = 5$, $B/H = 5$, необходимо использовать расчетные методы, учитывающие наличие спадов отраженной энергии.

Широкое распространение в производственных 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,

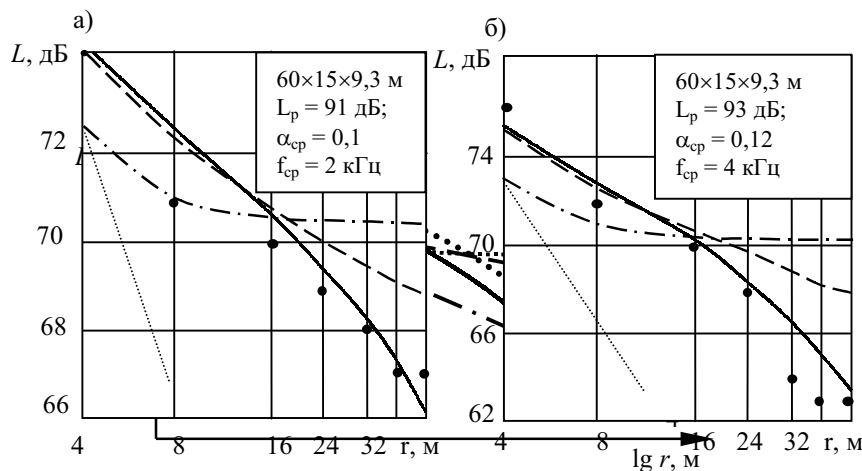


Рис. 1.6. Характер распределения уровней звукового давления в плоских помещениях с близкими к граничным значениям соотношениям $L/H \geq 5$, $B/H \leq 4$: 1 – незаглушенное помещение; 2 – незаглушенное помещение при наличии оборудования; 3 – помещение со звукопоглощающим потолком и оборудованием; 4 – пустое помещение со звукопоглощающим потолком; 5 – расчет по методу диффузного поля в незаглушенном пустом помещении

расположенных в отраженном поле источника [48]. В качестве примера на рис. 1.6 приведено распределение уровней звукового давления в производственном помещении локомотивного депо при работе одиночного источника. Расчетные уровни получены статистическим энергетическим методом и методами диффузного поля и мнимых источников. Видно, что отраженное шумовое поле в таких помещениях имеет заметные спады по мере удаления от источника и это необходимо учитывать при расчетах.

На распределение звуковой энергии в длинных помещениях значительное влияние оказывает соотношение поперечных размеров сечения и длины. Чем больше разница в размерах поперечного сечения и длины, тем труднее происходит перенос энергии в удаленные от источника точки помещения, и следовательно, тем значительнее ее спады. Влияние звукопоглощающих свойств поверхностей продольных стен, потолков и полов на формирование отраженного поля, как правило, пропорционально их площади и коэффициентам звукопоглощения. Рост звукопоглощения ведет к заметному изменению характера наклона кривой спадов. В этой связи устройство звукопоглощающих облицовок является эффективным средством снижения шума в длинных помещениях. Пример изменения уровней звукового давления в длинном пустом помещении с различным звукопоглощением пола приведен на рис. 1.7. Видно, что спад энергии значительно возрастает при внесении в помещение звукопоглощающей облицовки.

На изменение спадов уровней заметное влияние оказывают торцевые стены. С увеличением соотношения L/H это влияние убывает и им в ряде случаев можно пренебречь. Характер спадов зависит также от наличия в помещениях технологического оборудования и других предметов. В этом случае за счет дополнительной задержки энергии в ближней к источнику зоне спады отраженной энергии увеличиваются.

Для оценки шумового режима в длинных помещениях необходим метод расчета, адекватно учитывающий влияние на распределение отраженной энергии изменений объемно-планировочных и акустических параметров помещений и наличие в них оборудования.

В плоских помещениях распределение отраженной энергии существенно зависит от отношений длины и ширины помещения к его высоте. Чем больше эти отношения, тем больше величины спадов энергии. На характер спадов наибольшее влияние оказывают акустические характеристики пола и потолка помещения. Вклад стен в процесс формирования поля заметно проявляется в помещениях с соотношениями, близкими к $L/H = 5$, $B/H = 4$.

В плоских производственных помещениях, как правило, размещается большое количество однотипного оборудования и работают источники шума с примерно равной акустической мощностью. Распределение энергии зависит от наличия и плотности размещения оборудования, а также от величины звукопоглощения поверхностей потолка. Характер изменений формы спадов уровней звукового давления в этих случаях согласно данным [7] приведен на рис. 1.8.

Такие условия подтверждаются выполненными нами исследованиями [20,46,47]. В качестве примера на

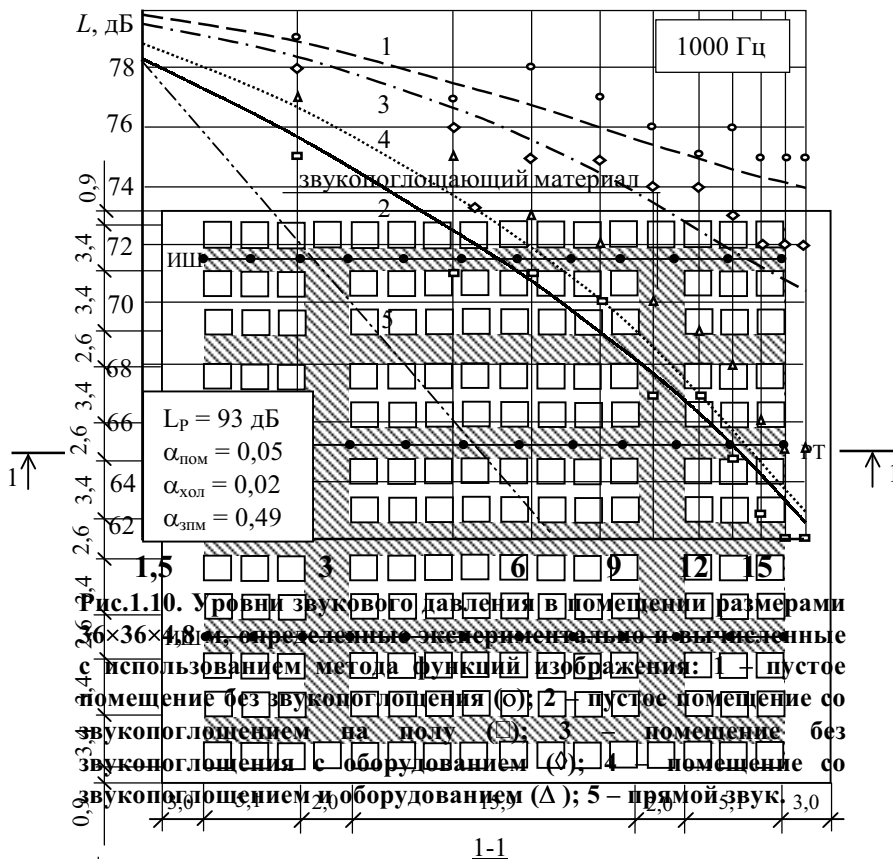


Рис.1.10. Уровни звукового давления в помещении размерами 36,0×36,0×4,8 м, определенные экспериментально и вычисленные с использованием метода функций изображения: 1 – пустое помещение без звукопоглощения (○); 2 – пустое помещение со звукопоглощением на полу (□); 3 – помещение без звукопоглощения с оборудованием (□); 4 – помещение со звукопоглощением и оборудованием (Δ); 5 – прямой звук.

Рис.1.9. Схема размещения оборудования, источника шума и точек измерения в помещении

рис.1.10 приведены экспериментальные и рассчитанные статистическим энергетическим методом уровни в складском помещении размерами в плане 36,0×36,0 и высотой 4,8 м. Эксперименты выполнены: в пустом помещении без звукопоглощения на поверхностях; в пустом помещении при наличии звукопоглощения на его полу; в помещении без звукопоглощения, но при размещении в нем бытовых холодильников, подготавливаемых к упаковке; при размещении в помещении холодильников и укладке по свободным проездам звукопоглощающего материала. Габаритные размеры холодильников составляли 1,30(н)×0,60×0,60 м. Холодильники устанавливались на поддонах группами по 4 штуки и при расчетах считались как один предмет с размерами 1,30(н)×1,30×1,40 м. Схема размещения холодильников приведена на рис.1.9. Образцовый источник шума ИОШ-1А устанавливался на высоте 2 м от пола. Потолки помещения из ребристых плит, побеленные известковой краской, полы асфальтобетонные, стены окрашены.

Аналогичные результаты получены и в плоских модельных помещениях. Пример изменения уровней в модельном помещении при различном звукопоглощении потолка дан рис.1.11.

Расчетный метод, описывающий распределение энергии в плоских помещениях должен учитывать комплексное влияние на распределение энергии всех указанных выше факторов.

Значительное влияние на распределение отраженной энергии в помещениях оказывает *характер отражения звука от поверхностей*. При идеальном зеркальном отражении действуют законы геометрической оптики, в соответствии с которыми в каждом конкретном помещении создается индивидуальное, определенным образом сформированное поле мнимых источников [64]. В случае рассеянного отражения отраженное поле определяется наложением множества плоских волн со случайным распределением амплитуд, направлений и фаз [55]. Для его описания требуются обобщенные статистические характеристики, например, средняя длина свободного пробега волн, среднее число актов поглощения энергии на ограждениях и др. Для оценки влияния

зеркального отражения звука на распределение энергии в помещениях были произведены экспериментальные исследования на физических моделях. Рассеянное отражение оценивалось в реальных производственных помещениях. Результаты оценки рассмотрены в параграфе 2.5.

Выполненный выше анализ показывает, что распределение энергии существенно зависит от **наличия в помещении предметов и оборудования, рассеивающих падающую на них звуковую энергию**. В наибольшей мере это проявляется в длинных и плоских помещениях. Дополнительное рассеяние приводит к уменьшению средней длины пробега и, следовательно, к увеличению актов поглощения энергии. Кроме того, из-за рассеяния звука на предметах происходит частичная задержка энергии в ближней к источнику зоне [25,46]. В этой связи достаточно объективная оценка распределения отраженной энергии возможна при учете в расчетном методе влияния характера отражения и рассеяния энергии путем соответствующих изменений, например, средней длины свободного пробега или среднего коэффициента звукопоглощения поверхностей помещения [52].

Помещения, располагаясь определенным образом в объемно-пространственной структуре производственного здания, имеют между собой акустические связи, влияющие на окончательное распределение энергии в помещениях как элементах единой системы. Поэтому в ряде случаев оценку распределения энергии в отдельном помещении целесообразно производить как в элементе системы связанных объемов. Акустическая связь между объемами осуществляется по конструктивным элементам (структурный шум), через звукоизолирующие преграды, а также через проемы и отверстия в ограждающих конструкциях (воздушный шум). Так как производственные помещения практически всегда имеют достаточно высокий собственный уровень шума, наибольшее значение для формирования шумовых полей в связанных помещениях имеет связь через “большие” открытые проемы, а иногда и конструкции с низкой звукоизолирующей способностью. Такие помещения принято называть акустически связанными [72]. “Большими” в данном случае считаются проемы, имеющие наименьший размер больше максимальной длины волны в исследуемом диапазоне частот.

Планировочные решения в виде систем акустически связанных “большими” проемами помещений имеют, в частности, широкое распространение на химических предприятиях и предприятиях железнодорожного транспорта [43,45]. По технологическим требованиям связь между большинством помещений локомотивных и вагонных депо, локомотивно- и вагоноремонтных заводов и т.п. осуществляется через открытые технологические проемы, существенно влияющие на перераспределение энергии в пределах здания. В многоэтажных производственных зданиях химических предприятий акустическая связь осуществляется через технологические проемы в перекрытиях. Выполненные экспериментальные и теоретические исследования [14,15] указывают на значительную зависимость распределения энергии в акустически связанных большими проемами помещениях от размеров проемов, объемно-планировочных параметров отдельных помещений, их взаимоотношения в системе и ряда других факторов. Для решения задач, связанных с оценкой распределения энергии в системах помещений, необходимо иметь метод расчета, позволяющий учитывать все перечисленные факторы.

Исходя из условий формирования шумового поля и необходимости проведения многовариантного автоматизированного проектирования, установлены требования к методу расчета шумовых полей. Метод должен: использовать аналитические закономерности большой степени общности, исключающей необходимость задания функциональных зависимостей в виде таблиц, графиков и номограмм; позволять производить оперативный контроль за возможными изменениями шумовой обстановки при изменениях условий возникновения и распространения шума и строить шумовые планы помещений; обеспечивать с достаточным быстродействием многовариантный анализ эффективности предлагаемых мер снижения шума, учитывая при этом все основные факторы, влияющие на распределение звуковой энергии в помещении, и в первую очередь его пропорции и акустические характеристики ограждений; иметь область применимости, распространяющуюся на помещения с большим количеством рассеивающих элементов (строительных конструкций, оборудования и т.п.); позволять выполнять расчеты уровней шума в системах акустически связанных большими проемами помещений; обладать достаточной для практики проектирования и оперативного контроля за шумовой обстановкой точностью.

1.3. Современные практические методы расчета шумовых полей помещений и границы их применимости

На основе работ Осипова Г.Л., Сергеева М.В., Шелухина М.И., Шубина И.Л., Ковригина С.Д., Демина О.Б., Лейзера И.Г., Косициной Э.С. и др., а также работ зарубежных ученых Куттруфа Х., Краака В., Еске В., Любке Е., Гобера Х., Линдквиста Е., Шредера М. и др. в настоящее время разработаны методы расчета, основанные на волновом, геометрическом и статистическом подходах. Принципы таких подходов заложены в работах Сэбина У., Морза Ф., Кремера Л., Бреховских Л.М., Фурдуева В.В., Розенберга Л.Д., Исаковича М.А. Анализ существующих методов расчета с позиций их соответствия установленным выше требованиям показал следующее.

В соответствии с волновой теорией замкнутый объем помещения представляется в виде сложной колебательной системы с распределенными параметрами [55]. При стационарном режиме возбуждения колебания объема можно выразить в виде сумм стоячих волн и принципиально возможно рассчитать величины, характеризующие звуковое поле помещения. Однако, в следствие того, что в реальных помещениях поверхности неоднородны, неправильной формы и имеют различные акустические

характеристики, решение практических задач чрезвычайно сложно. Анализ работ, в которых исследования распределения звуковой энергии выполнены на основе волновой теории, показывает, что сложность математического аппарата ограничивает ее применение диапазоном низких частот в помещениях малого объема и правильной формы.

Достаточно широкое распространение в практике имеют методы геометрической акустики, и в частности, метод мнимых источников. В работах Л.М. Бреховских [8], Е. Скучика [68] показано, что геометрические методы справедливы при размерах помещений, превышающих длину волны, и локально реагирующих поверхностях. Подобные условия не всегда обеспечиваются в производственных помещениях.

В практике проектирования метод мнимых источников находит применение для расчетов уровней звукового давления в помещениях правильной геометрической формы [19,41] и для анализа в них эффективности звукопоглощения и экранирования [18]. При многофакторном анализе шумового режима, при большом количестве источников, при сложной форме помещений и в акустически связанных помещениях геометрические методы практически не приемлемы. Ограничения применимости связаны с их низкой точностью и значительными затратами времени на расчеты. В числе факторов, влияющих на точность геометрических методов, следует отметить отличие реальных форм помещений от принимаемых в расчете, соизмеримость размеров помещения с длиной волны, наличие угловых зависимостей коэффициентов звукопоглощения ограждений, диффузно-лучевой характер отражения звука от поверхностей, наличие в помещениях рассеивающих предметов и оборудования и т.п.

К геометрическим методам имеющим определенное практическое значение для расчета шумовых полей помещений следует отнести метод прослеживания звуковых лучей, предложенный М. Шредером [88]. Метод используется в основном в архитектурной акустике. Достоинством его является возможность использования при расчетах в помещениях с зеркальным и рассеянным отражением звука от ограждений. Однако в последнем случае его нельзя безоговорочно относить к методам геометрической акустики. Для расчета энергетических характеристик Х. Куттруффом [82] предложено использовать интегральное уравнение. Сложность реализации уравнения ограничивает его использование в основном для исследовательских целей, что, в частности, и сделано в настоящей работе при обосновании статистических параметров расчетной модели.

Более широкое распространение имеют методы расчета, основанные на положениях классической статистической теории акустики. Статистические формулы получены в предположении обеспечения в помещениях идеального диффузного поля отраженной энергии, обладающего свойствами однородности и изотропности [77]. В силу того, что формулы имеют достаточно простой вид, статистические расчетные методы давно и широко используются в практике проектирования [70,71].

Экспериментальные исследования, в том числе и наши, показывают, что в производственных помещениях условия изотропности и однородности в большинстве случаев не обеспечиваются. Отраженная энергия не распределяется равномерно по объему, а монотонно спадает по мере удаления от источника. Вследствие неучета неравномерности распределения отраженной звуковой энергии имеют место занижения расчетных уровней звукового давления в ближней к источнику зоне и существенное завышение их в дальней. Величина расхождений зависит от пропорций помещений, звукопоглощения поверхностей и характера отражения звука от них. В существующем виде формулы невозможно использовать для построения шумовых планов помещения.

Для частичного исключения недостатков геометрических и статистических методов нами с Крышовым С.И. [42] разработан геометрический-статистический метод. В этом случае, учитывая диффузно-рассеянную модель отражения звука от ограждений, энергия первых порядков отражений определяется методом мнимых источников, а всех последующих как суммарный результат их действия по статистической формуле. Предложенный метод, снижая трудоемкость расчетов, имеет точность, сравнимую с геометрическими методами.

В настоящее время разработаны также эмпирические инженерные методы. Общим недостатком их является ограниченность набора решаемых задач.

Шумовые поля помещений в случае спадов отраженной энергии имеют, согласно определению М.Шредера [89], квазидиффузный характер, обусловленный наличием в каждой точке объема результирующего потока энергии при одновременном сохранении признака диффузности по изотропности угловой направленности элементарных потоков. Данные обстоятельства позволяют применить для построения расчетных моделей статистический энергетический подход, учитывающий в отраженном шумовом поле наличие и взаимосвязь результирующих потоков и градиентов плотности отраженной энергии. В частности, подобные условия использованы Ф. Олендорфом [87] при разработке расчетного метода, основанного на принципах кинетической теории идеальных газов. Достоинством статистического энергетического подхода является его энергетический принцип, позволяющий, не останавливаясь отдельно на закономерностях отражения, распространения, интерференции и дифракции отдельных звуковых волн, анализировать конечный продукт указанных процессов – распределение значений суммарной плотности отраженной энергии.

Статистический энергетический подход использован нами для разработки расчетной модели шумовых полей производственных помещений.

ГЛАВА 2. СТАТИСТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОТРАЖЕННЫХ ШУМОВЫХ ПОЛЕЙ ПОМЕЩЕНИЙ

Распространение звуковой энергии в помещениях есть результат волновых процессов, происходящих в воздушном объеме помещения, представляющем собой колебательную систему с распределенными параметрами. Подход к решению задачи с точки зрения детерминированных методов, то есть в данном случае с позиций волновой теории акустики, приводит к громоздким расчетным моделям, получить необходимую информацию из которых весьма затруднительно. Используемые модели требуют задания определенных параметров, характеризующих движение исследуемой системы в любой момент времени. При этом необходимо, чтобы определяющие движение параметры были заданы с высокой степенью точности. В реальных условиях процесс возмущения колебательной системы помещения источником шума является случайным и, следовательно, вынужденные колебания не могут быть строго детерминированными. В этой связи при исследованиях сложных акустических систем точными методами приходится вводить определенную степень идеализации в характеристиках воздушного объема, граничных условиях и условиях возмущения системы. Однако даже при этом получение результатов ограничивается рядом не всегда самых важных для практики случаев. Следует также отметить, что при использовании точных методов для решения практических задач борьбы с шумом получаемые конкретные результаты содержат избыточную информацию. Для практики борьбы с шумом, как правило, бывает достаточно сведений о распределении усредненных в октавных полосах частот уровней звукового давления независимо от фазовых соотношений, отдельных частотных составляющих и т.п., то есть необходим наиболее общий конечный результат волновых процессов – распределение в объеме помещения суммарной величины звуковой энергии.

Этим требованиям удовлетворяет статистический энергетический анализ, послуживший основой для ряда относительно простых решений по оценке распределения звуковой энергии. При статистическом анализе распределения энергии в конструкциях и в воздушных объемах в качестве основной расчетной величины оперируют средним значением плотности звуковой энергии. При этом предполагается ее усреднение по времени, пространству и частоте. Основываясь на данном подходе, получена статистическая энергетическая модель, описывающая распределение отраженной звуковой энергии в объеме помещения.

2.1. Связь потока и градиента плотности отраженной звуковой энергии в квазидиффузных шумовых полях помещений

Суммарная плотность отраженной звуковой энергии в каждой точке поля создается прохождением через эту точку элементарными потоками звуковой энергии возбужденных плоских волн помещения. В случае, когда количество элементарных потоков достаточно велико и направление их в пространстве равновероятно, при равенстве переносимых в каждом элементарном потоке порций энергии плотность звуковой энергии постоянна по всему помещению и поле имеет *диффузный характер*. Если принять, что в диффузном поле процессы поступления и поглощения энергии звука происходят непрерывно, то дифференциальное уравнение, описывающее баланс отраженной энергии в помещении, имеет вид

$$V \frac{d\varepsilon}{dt} = P_{\alpha} - P_{\text{погл}}, \quad (2.1)$$

где ε – плотность отраженной звуковой энергии, $P_{\alpha} = (1 - \bar{\alpha})P$ – мощность отраженной энергии, вводимой в помещение при работе в нем источника мощностью P ; $P_{\text{погл}}$ – мощность отраженной энергии, поглощаемая в помещении; V – объем помещения.

В идеальном диффузном поле между плотностью и интенсивностью звуковой энергии, падающей на ограждения, существует связь в виде

$$I = c\varepsilon/4$$

и величина $P_{\text{погл}}$ может быть определена как

$$P_{\text{погл}} = c\varepsilon\bar{\alpha}S_{\text{общ}}/4. \quad (2.2)$$

Здесь $\bar{\alpha}$ и $S_{\text{общ}}$ – средний коэффициент звукопоглощения и площадь ограждающих поверхностей помещения.

Подставляя (2.2) в (2.1), имеем

$$V \frac{d\varepsilon}{dt} = P(1 - \bar{\alpha}) - \frac{c\varepsilon}{4}\bar{\alpha}S_{\text{общ}}. \quad (2.3)$$

При продолжительной работе источника ($t \rightarrow \infty$) наступает динамическое равновесие между вводимой отраженной энергией и ее потерями в помещении. В этом случае плотность отраженной энергии будет определяться формулой

$$\varepsilon = \frac{4P(1 - \bar{\alpha})}{\bar{\alpha}S_{\text{общ}}c}.$$

Видно, что в диффузном поле при стационарном режиме работы источника распределение отраженной энергии может быть оценено одной потенциальной величиной – плотностью отраженной звуковой энергии. Такое состояние присуще только равновесной системе и не может обеспечиваться в реальных условиях формирования отраженного шумового поля.

В производственных помещениях перечисленные условия диффузности отраженного звукового поля не обеспечиваются в полной мере. Многочисленные исследования шумового режима помещений (см. главу 1) показывают, что уровни шума в зоне преобладания отраженной звуковой энергии имеют более или менее выраженные спады, свидетельствующие об изменении плотности отраженной энергии по всему объему помещения. При этом, не взирая на отдельные местные флуктуации, общее направление спада уровней в отраженном поле имеет монотонный характер, в среднем убывающий по направлению от источника. Плотность отраженной энергии, являясь скалярной величиной и имея в каждой точке объема помещения одно определенное значение, также монотонно убывает от точки к точке во всех направлениях от источника. Производная этой скалярной функции по любому направлению имеет конечное значение.

Наличие спадов плотности отраженной звуковой энергии свидетельствует о невыполнении условия диффузности по равенству прихода энергии в исследуемую точку объема со всех возможных направлений пространства. При работе производственных широкополосных источников шума в помещениях возбуждается достаточное количество мод и в случае исследования шума в третьоктавных и октавных полосах частот условие диффузности поля по изотропности угловой направленности элементарных потоков обеспечивается в достаточной мере. Однако эти элементарные потоки не равны между собой по энергии. Волны, приходящие со стороны источника, обладают большей энергией, чем волны, идущие с других направлений. В этой связи интенсивности отраженной энергии, приходящей в точку объема с разных направлений, имеют разные значения, и, следовательно, в любой точке объема существует определенным образом направленный поток отраженной энергии.

Отраженные звуковые поля, в которых обеспечивается условие сохранения признака диффузности по изотропности угловой направленности элементарных потоков, но не выполняется требование однородности, имеют *квазидиффузный характер* [89]. Условие изотропности позволяет использовать при построении расчетной модели квазидиффузного шумового поля положения классической статистической теории акустики, но при этом должно дополнительно учитываться наличие результирующего потока отраженной энергии. Таким образом, квазидиффузное поле помещения относится к неравновесным системам [30].

В пределах помещения с квазидиффузным звуковым полем при наличии результирующего потока происходит процесс переноса отраженной звуковой энергии, который в соответствии с общей теорией переноса может быть охарактеризован двумя параметрами: потенциалом, определяющим интенсивность процесса, и обобщенной энергетической величиной, представляющей субстанцию переноса.

При работе постоянно действующего источника шума с течением времени в помещении устанавливается стационарное шумовое поле, энергетическое состояние которого определяется только параметрами источника шума и не зависит от начальных значений внутренних параметров. Это состояние по аналогии с термодинамикой можно назвать неравновесным стационарным состоянием или состоянием динамического равновесия. Процесс установления динамического равновесия можно рассматривать как процесс выравнивания внутренних параметров системы, который сопровождается соответствующими процессами переноса энергии. В отраженном шумовом поле положение динамического равновесия может быть охарактеризовано постоянством во времени плотности звуковой энергии. Выравнивание плотности звуковой энергии по объему сопровождается процессом переноса энергии. С этой точки зрения плотность звуковой энергии является потенциалом, определяющим интенсивность переноса энергии.

Основной задачей описания процесса переноса энергии является установление связи между распределением потенциала и потоком. Применительно к процессу распределения отраженной звуковой энергии в квазидиффузном поле задача заключается в установлении связи вида

$$\bar{q} = f(\varepsilon) . \quad (2.4)$$

Процесс переноса звуковой энергии в квазидиффузных шумовых полях может быть охарактеризован с позиций феноменологического и статистического подходов.

Феноменологический подход позволяет устанавливать некоторые общие соотношения между параметрами, определяющими рассматриваемое явление переноса в целом. В данном случае такими параметрами являются плотность и поток отраженной звуковой энергии. Отраженное звуковое поле помещения, пренебрегая его дискретностью, обусловленной наличием в отраженном поле конечного числа возбужденных мод, можно рассматривать как *континуум*, то есть как сплошную среду, наделенную свойствами, не зависящими от размеров рассматриваемой области. Такое представление является идеализированным, но как показано далее, достаточно достоверным для общего описания распределения отраженной звуковой энергии при решении практических задач борьбы с шумом.

Исходя из общих представлений феноменологического подхода к явлению переноса, связь между потоком и плотностью отраженной звуковой энергии может быть определена как

$$\bar{q} = -\eta \text{grad} \varepsilon , \quad (2.5)$$

где η – коэффициент связи результирующего потока и градиента плотности энергии отраженного звукового поля помещения.

Установление величины коэффициента связи η , в дальнейшем называемого *коэффициентом переноса отраженной энергии*, является задачей, которую невозможно решить в рамках феноменологического подхода. Для ее решения необходимо использовать статистический подход.

Основное предположение *статистического подхода* состоит в том, что все макроскопические наблюдаемые свойства поля и закономерности протекающих в нем процессов могут быть принципиально получены исходя из знания сил взаимодействия и внутреннего строения элементов, составляющих это поле. Выводы статистического подхода являются закономерностями, обусловленными взаимодействием большого количества частиц. Следовательно, в нашем случае, чтобы получить макроскопические свойства отраженного поля, необходимо отождествить с ними некоторые средние, суммарные или статистические свойства всех элементов поля, в данном случае звуковых волн. При этом количество рассматриваемых волн должно быть достаточно велико, а свойства их должны быть примерно одинаковыми.

При статистическом подходе плотность и поток звуковой энергии отраженного поля определяются как функции одних и тех же независимых переменных – параметров волн, составляющих звуковое поле как систему. Ясно, что в этом уже заключены соотношения между потоками и распределением плотности звуковой энергии и возможно получение коэффициентов переноса статистическими методами. Задача заключается в определении параметров частиц (волн), составляющих систему, а затем в способе отождествления некоторых их средних параметров с макроскопическими величинами.

Определим величину коэффициента переноса η на основе статистического подхода, учитывая следующие соображения. Внутри помещения, в котором создано стационарное звуковое поле, рассмотрим площадку dS , на которую со стороны каждого полупространства приходит энергия отраженных волн. Найдем удельную мощность облучения отраженным звуком площадки dS , определяющую энергетические свойства отраженного поля и представляющую собой поток мощности, проходящей через площадку со всех направлений, лежащих в пределах 2π . Для этого воспользуемся известным вероятностным подходом, рассматривая его в виде, представленном в [49].

На основании свойства изотропности по угловой направленности отраженного звукового поля помещения следует, что поток звуковой энергии dq , переносимой от элемента объема dV в направлении площадки dS равен произведению акустической энергии объема $\varepsilon \cdot dV$ и вероятности ω_Ω распространения волн от элемента объема dV к площадке dS

$$dq = \varepsilon dV \omega_\Omega .$$

Вероятность того, что энергия переносится в направлении площадки dS , равна отношению телесного угла $d\Omega$, под которым виден элемент площадки dS , к пространственному углу 4π

$$\omega_\Omega = d\Omega / 4\pi .$$

В результате

$$dq = \frac{1}{4\pi} \varepsilon dV d\Omega .$$

Поместим начало сферической системы координат в центре площадки dS (см. рис.2.1,а), а полярную ось совместим с направлением нормали. Тогда

$$d\Omega = dS \cdot \cos\theta / r^2 ,$$

где $r = OA$ – расстояние от центра площадки dS до элемента объема dV .

Поскольку поле изотропно, то элемент объема dV можно представить в виде элементарного тороида (см. рис.2.1,б)

$$dV = 2\pi r \cdot \sin\theta r d\theta dr .$$

Полный поток мощности облучения площадки dS определяется интегралом выражения для dq , взятым по полярному углу θ в пределах от 0 до $\pi/2$ и по расстоянию r в пределах от 0 до r_0 . Имеем

$$dQ = \frac{\varepsilon}{4\pi} \int_0^{\pi/2} \cos\theta \cdot \sin\theta d\theta \int_0^{r_0} \frac{2\pi r^2 dr}{r^2} dS .$$

Если c – скорость звука, то $r_0 = c\Delta t$. После интегрирования получаем известную формулу удельной мощности облучения площадки dS из полупространства

$$I_q = \frac{\Delta Q}{\Delta S \cdot \Delta t} = \frac{\varepsilon \cdot c}{4}. \quad (2.6)$$

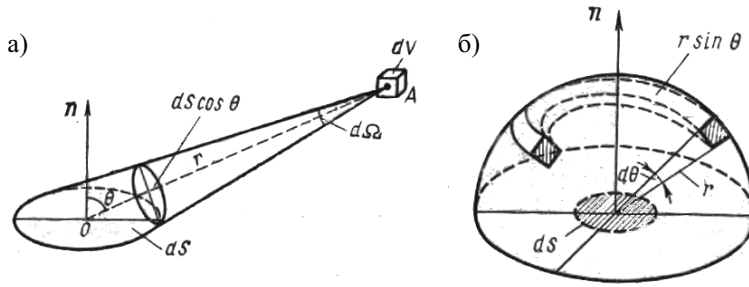
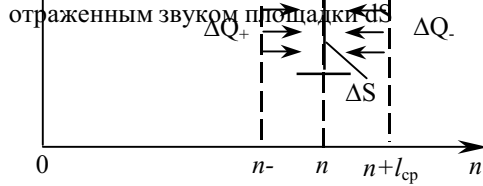


Рис.2.1. Схема для определения удельной мощности облучения



Для вычисления коэффициента связи η рассмотрим потоки звуковой мощности, проходящие через площадку ΔS слева и справа (см. рис.2.2).

Поток слева направо согласно (2.6) равен

$$\Delta Q_+ = I_{q1} \cdot \Delta S \cdot \Delta t = \varepsilon_1 \cdot c \Delta S \cdot \Delta t / 4.$$

Встречный поток справа налево определяется аналогично

$$\Delta Q_- = I_{q2} \cdot \Delta S \cdot \Delta t = \varepsilon_2 \cdot c \Delta S \cdot \Delta t / 4.$$

Суммарный поток через площадку в направлении оси n представляет разность потоков

$$\Delta Q = \Delta Q_+ - \Delta Q_- = \frac{1}{4} c \cdot \Delta S \cdot \Delta t (\varepsilon_1 - \varepsilon_2). \quad (2.7)$$

Поскольку плотность энергии меняется от точки к точке, необходимо определить значения координат, которым соответствуют значения ε_1 и ε_2 . Так как через площадку проходят отраженные плоские волны, энергетическая характеристика которых не меняется на участке их свободного пробега между столкновениями с поверхностями, можно считать, что ε_1 и ε_2 - это те плотности энергии, которые создаются звуковыми волнами, отраженными на расстоянии средней длины свободного пробега волн l_{cp} от площадки ΔS , по обе стороны от нее.

Разность $(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)$ можно определить, если известно значение градиента плотности энергии $d\varepsilon/dn$. Так как $d\varepsilon/dn$ есть разность плотностей на единицу длины, то на расстоянии $2l_{cp}$ она будет равна

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = -2l_{cp} \frac{d\varepsilon}{dn}. \quad (2.8)$$

Таким образом, используя (2.7) и (2.8), поток энергии, проходящий через единицу поверхности за единицу времени, можно записать как

$$q = \frac{\Delta Q}{\Delta S \cdot \Delta t} = -\frac{1}{2} c l_{cp} \frac{d\varepsilon}{dn}. \quad (2.9)$$

Из сравнения (2.5) и (2.9) видно, что коэффициент η определяется как

$$\eta = 0.5c \cdot l_{cp}, \quad (2.10)$$

и соответственно, имеем

$$\bar{q} = -0.5c l_{cp} \text{grad} \varepsilon. \quad (2.11)$$

Попытка строгого обоснования принятого нами постулата (2.5) была предпринята в работе [67]. Доказывается, что при определенных условиях данная связь потока и градиента плотности справедлива.

2.2. Уравнение распределения плотности отраженной энергии в квазидиффузном шумовом поле

Для получения уравнения распределения плотности отраженной энергии воспользуемся законом сохранения энергии в квазидиффузном звуковом поле и уравнением связи между потоком и плотностью отраженной энергии (2.5).

Рассмотрим некоторый объем помещения V в месте, где нет источника звуковой энергии, ограниченный поверхностью S . Уравнение баланса энергии для объема V за время $\Delta t = t_2 - t_1$ имеет вид

$$\int_V [\varepsilon(M, t_2) - \varepsilon(M, t_1)] dV_M = - \int_{t_1}^{t_2} dt \int_S q_n dS - \int_{t_1}^{t_2} dt \int_V F(M, t) dV_M, \quad (2.12)$$

где $M = M(\xi, \eta, \zeta)$ – точка интегрирования; $dV_M = d\xi d\eta d\zeta$ – элемент объема; q_n – нормальная составляющая потока отраженной звуковой энергии. Уравнение (2.12) выражает закон сохранения отраженной энергии в объеме за время Δt : изменение количества отраженной энергии в объеме V за время $\Delta t = t_2 - t_1$ (левая часть в (2.12)) обусловлено потоком отраженной энергии через граничную поверхность S (первое слагаемое в правой части равенства (2.12)), а также количеством отраженной энергии, поглощаемым в объеме за время Δt (второе слагаемое).

Для перехода от интегрального уравнения баланса к дифференциальному уравнению, предположим, что $\varepsilon(M, t) = \varepsilon(x, y, z, t)$ дважды дифференцируема по x, y, z и один раз по t и что эти произведения непрерывны в рассматриваемой области. Тогда можно воспользоваться формулой Гаусса-

Остроградского

$$\int_S q_n dS = \int_V \text{div} \bar{q} dV$$

и преобразовать уравнение баланса к виду

$$\int_V c[\varepsilon(M, t_2) - \varepsilon(M, t_1)] dV_M = - \int_{t_1}^{t_2} \int_V \text{div} \bar{q} dV_M dt - \int_{t_1}^{t_2} \int_V F(M, t) dV_M dt.$$

Применяя теорему о среднем и теорему о конечных приращениях для функции многих переменных [74], получим

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \Big|_{M=M_1}^{t=t_3} \Delta t \cdot V = - \text{div} \bar{q} \Big|_{M=M_2}^{t=t_4} \Delta t \cdot V - F \Big|_{M=M_3}^{t=t_5} \Delta t \cdot V,$$

где t_3, t_4, t_5 – промежуточные точки на интервале Δt , а M_1, M_2, M_3 – точки в объеме V . Фиксируя некоторую точку $M(x, y, z)$ внутри V , стягивая V в эту точку и устремляя Δt к нулю, после сокращения на $\Delta t V$ и предельного перехода имеем

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t}(x, y, z, t) = - \text{div} \bar{q}(x, y, z, t) - F(x, y, z, t). \quad (2.13)$$

Заменяя \bar{q} его выражением в соответствии с (2.5) и принимая $F = cm_b \varepsilon$, окончательно получим

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} - \eta \left(\frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial z^2} \right) + cm_b \varepsilon = 0, \quad (2.14)$$

или

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} - \eta \nabla^2 + cm_b \varepsilon = 0. \quad (2.15)$$

Здесь ∇^2 – оператор Лапласа; m_b – пространственный коэффициент затухания звука в воздухе.

Последнее и есть наиболее общая математическая запись уравнения плотности отраженной звуковой энергии для нестационарной задачи, представляемая в виде уравнения параболического типа [74].

При стационарном режиме работы источника шума уравнение преобразуется к виду

$$\nabla^2 \varepsilon - \varphi^2 \varepsilon = 0. \quad (2.16)$$

Здесь согласно (2.10)

$$\varphi^2 = 2m_b / l_{cp}. \quad (2.17)$$

Уравнение (2.16) относится к эллиптическим уравнениям и носит частное название уравнения Поккельса.

В случаях, когда можно пренебречь поглощением звука в воздухе ($\varphi^2 \approx 0$) уравнение (2.16) преобразуется в уравнение Лапласа

$$\nabla^2 \varepsilon = 0. \quad (2.18)$$

2.3. Граничные и начальные условия краевой задачи

Для решения уравнения (2.15) в нестационарной постановке необходимо задание начальных и граничных условий. Для решения стационарных задач (уравнения (2.16) и (2.18)) достаточно задания только граничных условий.

Выражение для граничных условий можно получить, основываясь на следующих положениях.

При стационарном режиме работы источника шума через ограждения происходит установившийся во времени отток звуковой энергии. Величина его в каждой точке ограждающей поверхности зависит от интенсивности падающей энергии, звукопоглощающих характеристик поверхности и статистической

характеристики отраженного поля помещения – среднего числа актов поглощения энергии на поверхности ограждения в единицу времени.

Так как в квазидиффузном шумовом поле обеспечивается условие изотропности угловой направленности элементарных потоков, падение отраженных звуковых волн на ограждение распределено равномерно по всем возможным направлениям. Поверхности большинства строительных материалов являются локально реагирующими [80] с коэффициентами звукопоглощения, практически не зависящими от угла падения волн и равными диффузным коэффициентам, полученным в условиях реверберационных камер. При таких условиях формально можно считать, что суммарный поток поглощаемой на ограждении энергии имеет направление, нормальное к границе.

Производную плотности энергии в направлении, нормальном к границе помещения, можно определить при рассмотрении энергетического баланса в элементарном объеме, прилегающем непосредственно к поверхности помещения.

Согласно выводам Эйринга [38] процесс поглощения звуковой энергии на границах возможно рассматривать как дискретный процесс, происходящий с перерывами каждый раз, когда звуковые волны претерпевают отражения. Следуя этому, количество теряемой энергии за единицу времени в рассматриваемом элементе объемом $\Delta V \rightarrow 0$ в результате поглощения ее на границе, прилегающей к поверхности ограждения, определится как

$$E_{\text{погл}} = \alpha \varepsilon_{\text{пад}} \Delta V K, \quad (2.19)$$

где α – диффузный коэффициент звукопоглощения в рассматриваемой точке поверхности; $\varepsilon_{\text{пад}}$ – составляющая плотности энергии, обусловленная падающим на ограждение суммарным потоком энергии в условиях отраженного поля; $K = c/l_{\text{ср}}$ – среднестатистическое число актов поглощения звуковой энергии в единицу времени.

Через грани элемента n и $n + \Delta n$ в единицу времени проходят соответственно количества энергии E_n и $E_{n+\Delta n}$. Условие энергетического баланса энергии, переносимой в направлении координаты n , имеет вид

$$E_n - E_{n+\Delta n} = E_{\text{погл}}. \quad (2.20)$$

Количество энергии, переносимой через любую n -ю грань элемента, можно выразить через плотность энергии на этой грани, то есть

$$E_n = cS\varepsilon_n, \quad (2.21)$$

где S – площадь поверхности элемента, нормальной к координате n .

С учетом выражений (2.19), (2.20) и (2.21) для производной плотности энергии можно записать

$$\left. \frac{\partial \varepsilon}{\partial n} \right|_S = \frac{E_n - E_{n+\Delta n}}{cS\Delta n} \quad \text{при } \Delta n \rightarrow 0 \quad (2.22)$$

или

$$\left. \frac{\partial \varepsilon}{\partial n} \right|_S = \frac{\alpha \varepsilon_{\text{пад}}}{l_{\text{ср}}}, \quad (2.23)$$

Величина плотности энергии, входящая в левую часть выражения (2.23), относится к объему помещения непосредственно у его поверхности и может быть записана как

$$\varepsilon|_S = \varepsilon_{\text{пад}} + (1 - \alpha)\varepsilon_{\text{пад}} = (2 - \alpha)\varepsilon_{\text{пад}}. \quad (2.24)$$

Выразив $\varepsilon_{\text{пад}}$ через $\varepsilon|_S$, окончательно имеем

$$\left. \frac{\partial \varepsilon}{\partial n} \right|_S = \frac{\alpha}{(2 - \alpha)l_{\text{ср}}} \varepsilon|_S. \quad (2.25)$$

Граничные условия, представляемые в виде выражения (2.25), позволяют учитывать при решении задач действительную величину звукопоглощения каждого участка поверхности помещения, его место расположения и, следовательно, индивидуальный вклад в формирование отраженного звукового поля.

В условиях стационарного режима возбуждения количество энергии, излучаемой источником шума в единицу времени, равно количеству потерь энергии за счет поглощения ее на ограждениях и диссипативных потерь внутри объема за то же время. Пренебрегая потерями за счет поглощения звука в воздухе, все количество теряемой в единицу времени энергии можно представить в виде арифметической суммы потерь прямой и отраженной энергии. Количество прямой энергии, теряемой за счет поглощения ее на ограждениях, приближенно можно определить как

$$E_{\text{пр.погл}} = \bar{\alpha}P.$$

Тогда количество потерь, приходящихся на отраженную часть энергии составит величину

$$E_{\text{отр.погл}} = (1 - \bar{\alpha})P. \quad (2.26)$$

Потери отраженной энергии в помещении за счет поглощения ее на ограждениях в единицу времени иначе можно выразить как

$$E_{\text{отр.погл}} = \int_S \frac{\alpha_S}{2(2 - \alpha_S)} c\varepsilon|_S dS. \quad (2.27)$$

Из выражений (2.26) и (2.27) соответственно имеем

$$P = \frac{1}{(1-\bar{\alpha})} \int_S \frac{\alpha_S}{2(2-\alpha_S)} c\varepsilon|_S dS, \quad (2.28)$$

где P – энергия, излучаемая источником в единицу времени.

При решении краевой задачи с учетом поглощения звуковой энергии в воздухе условие (2.28) определится как

$$P = \frac{1}{(1-\bar{\alpha})} \left[\int_S \frac{\alpha_S}{2(2-\alpha_S)} c\varepsilon|_S dS + \int_V cm_e \varepsilon dV \right]. \quad (2.29)$$

Уравнение (2.16) с граничными условиями (2.25) и условием возбуждения (2.29) представляет собой математическую модель распределения в объеме средней по некоторой частотной полосе плотности отраженной звуковой энергии при стационарном режиме возбуждения системы.

Модель носит структурно-функциональный характер [4], так как, с одной стороны, имеет структуру, сходную с объектом, а с другой стороны – отклик модели на задаваемое возбуждение, количественно соответствующий отклику объекта, обеспечивается без имитации волновых процессов, происходящих в натуре. Данные аспекты, определяющие степень качественной и количественной адекватности модели, исследованы в последующих разделах работы.

Для реализации уравнения (2.15) кроме граничных условий (2.25) необходима также информация о начальном распределении отраженной звуковой энергии. Поскольку дифференциальное уравнение (2.15) – уравнение первого порядка по переменной t , достаточно задания в начальный момент времени некоторой функции

$$\varepsilon|_{t=t_0} = f(x_1, x_2, x_3). \quad (2.30)$$

Получить эти сведения возможно из решения стационарной задачи. В ряде случаев это является достаточно затруднительным. Более удобен метод, основанный на предположениях, при которых действие точечного широкополосного направленного источника звуковой энергии рассматривается как последовательное излучение порций (импульсов) энергии. Подробно данный метод рассмотрен в главе 3.

2.4. Оценка точности и границ применимости статистической энергетической модели

Результаты решения краевых задач, уравнения которых основаны на статистическом подходе к анализу отраженного звукового поля закрытого помещения, в некоторых частотных диапазонах и при небольших объемах помещений могут давать существенные отклонения от натуральных данных. В этой связи необходимо определять границы применимости статистической расчетной модели и доверительные интервалы результатов расчета.

Статистический энергетический подход предполагает энергетическое сложение большого числа равновероятно и достаточно равномерно распределенных в пространстве элементарных потоков отраженной звуковой энергии. При этом объем воздуха, рассматриваемый с точки зрения волновой теории как осциллятор со многими степенями свободы, можно представить совокупностью ряда простейших колебательных систем, каждая из которых соответствует одному из резонансов при их возбуждении. В этой связи в условиях стационарного режима возбуждения колебания объема представляются суммой большого числа стоячих волн, количество которых для частотного интервала от f до $f + \Delta f$ можно определить по известной формуле [81] как

$$dN = \left(\frac{4\pi V}{c^3} f^2 + \frac{\pi S}{2c^2} f + \frac{L}{8c} \right) \Delta f, \quad (2.31)$$

V, S, L – соответственно объем, площадь поверхностей ограждения и длина ребер помещения.

В практике формулу (2.31), пренебрегая в виду малости суммой вторых и третьих членов, используют в виде

$$dN = \frac{4\pi V}{c^3} f^2 \Delta f. \quad (2.32)$$

Распределение энергии по объему будет равновероятным и изотропным лишь при определенном количестве сильно возбужденных мод и излучение энергии источником в широкой полосе частот. В этом случае излучаемая мощность источника не зависит от места его установки в помещении и от акустических свойств последнего и равна мощности, излучаемой в открытое пространство [79]. Вектор потока звуковой мощности становится потенциальным - $\text{rot} \vec{q} = 0$ [78]. При этом акустические свойства поверхностей в достаточной мере могут быть охарактеризованы одной величиной коэффициента звукопоглощения в виде соотношения $\alpha/(2-\alpha)$.

В работах [55,89] полагается, что отраженное звуковое поле закрытых помещений достаточно изотропно в том случае, когда в пределах полосы частот анализа возбуждается одновременно не менее 10 мод помещения. Производственные источники шума имеют, как правило, сплошной спектр возбуждения и, следовательно, можно считать, что в объеме возбуждаются все моды помещения на их резонансных частотах. При этом в

пределах неширокой полосы частот амплитуды мод примерно одинаковы. Эти условия позволяют находить для помещений граничную частоту, ниже которой статистический подход не дает удовлетворительных результатов.

Обозначив достаточное число одновременно возбуждаемых в полосе Δf мод через $N(\Delta f)$ и приравняв их dN в (2.32), получим выражение для определения граничной частоты

$$f_{\text{гр}} = \sqrt{\frac{N(\Delta f)c^3}{4\pi V\Delta f}}. \quad (2.33)$$

При анализе шума обычно используются относительные полосы частот. Ширину полосы Δf в этом случае можно представить как

$$\Delta f = \nu f_{\text{ср}}, \quad (2.34)$$

где $f_{\text{ср}}$ – среднегеометрическая частота полосы анализа шума; ν - числовой коэффициент, зависящий от ширины полосы (для полос частот шириной в 1/3 октавы - $\nu = 0.232$, 1/2 октавы - $\nu = 0.345$, для октавной полосы - $\nu = 0.707$).

Используя соотношение $f_{\text{ср}} = \sqrt{f_1 f_2}$, получим

$$\Delta f = \nu \sqrt{f_1(f_1 + \Delta f)},$$

где f_1, f_2 – соответственно нижняя и верхняя граничные частоты полосы анализа.

Выполнив несложные преобразования, имеем

$$\Delta f = f_1 \frac{\nu^2 + \nu\sqrt{\nu^2 + 4}}{2}, \quad (2.35)$$

Обозначив $\nu^2 + \nu\sqrt{\nu^2 + 4} = K^3$ и подставив (2.35) в (2.33), окончательно находим выражение для определения нижней граничной частоты полосы анализа шума помещений объемом V , при которой обеспечивается достаточность условий изотропности звукового поля

$$f_{\text{ср}} = 0,542 \frac{c}{K} \sqrt[3]{\frac{N(\Delta f)}{V}}. \quad (2.36)$$

Здесь K – коэффициент, зависящий от ширины полосы возбуждения. Для полосы частот шириной в 1/3 октавы – $K = 0.85$, 1/2 октавы – $K = 0.94$, для октавной полосы – $K = 1.26$.

Для расширения границ статистического подхода на объемы с малым числом собственных частот в полосе усреднения, для оценки точности и надежности результатов решения следует использовать характеристики математической статистики: доверительные вероятности и доверительные интервалы [12]. В работе [86] для повышения точности и надежности расчетов вибраций механических структур на основе статистического подхода Р.Лайном предложено вводить в расчеты доверительные коэффициенты, учитывающие возможные вариации характеристик системы на основе математического аппарата теории вероятности. Развитые в последствии в работе [85] положения работы [86] используются и при решении поставленной задачи.

В качестве события можно принять резонанс на одной из форм собственных колебаний объема помещения. При этом распределение резонансов удовлетворяет следующим условиям: в пределах исследуемого интервала (полосы частот шириной в октаву) можно считать, что резонансы распределены с одинаковой средней плотностью; резонансы распределяются в объеме помещения независимо друг от друга; вероятность попадания в элементарный объем ΔV двух и более резонансов пренебрежимо мала по сравнению с вероятностью попадания одного резонанса. Следовательно, можно считать, что число резонансов, попадающих в исследуемый интервал частот, распределяется в объеме по закону Пуассона.

Величина доверительной вероятности ξ в пределах интервала с доверительными границами a_1 и a_2 определяется как

$$\xi = \int_{a_2}^{a_1} O(E) dE, \quad (2.37)$$

где $O(E)$ – функция распределения энергии колебаний воздушного объема между модами.

Интеграл (2.38) в общем виде найден в [85]:

$$\xi = \Gamma^{-1}(\bar{\lambda}) [\gamma(\bar{\lambda}, \bar{\lambda} a_1 / m_\varepsilon) - \gamma(\bar{\lambda}, \bar{\lambda} a_2 / m_\varepsilon)], \quad (2.38)$$

где $\Gamma(\bar{\lambda})$ – гамма-функция; $\gamma(\bar{\lambda}, \bar{\lambda} a_1 / m_\varepsilon)$, $\gamma(\bar{\lambda}, \bar{\lambda} a_2 / m_\varepsilon)$ - неполные гамма-функции [76];

$$\bar{\lambda} = \frac{m_\varepsilon^2}{\sigma^2}; \quad (2.39)$$

m_ε - математическое ожидание распределения плотности звуковой энергии; σ - среднеквадратичное отклонение.

В частности, в работе [28] экспериментально подтверждается, что распределение амплитуд и квадратов амплитуд колебательной скорости имеет характерную устойчивую форму и удовлетворительно аппроксимируется гамма-распределением.

Если исследователя интересуют доверительные границы верхних и нижних пределов предполагаемых

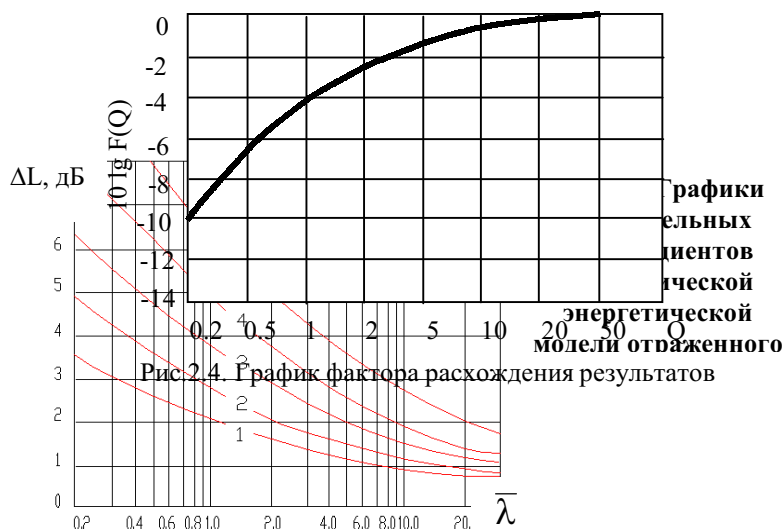


Рис. 2.4. График фактора расхождения результатов

уровней, можно принимать соответственно $a_1=0, a_2=r \cdot m_\epsilon$ или $a_2=0, a_1=m_\epsilon/r$ и доверительные вероятности тогда определяются формулами

$$\xi_1 = \frac{\gamma(\bar{\lambda}, \bar{\lambda}r)}{\Gamma(\bar{\lambda})}, \quad (2.40)$$

$$\xi_2 = \frac{\gamma(\bar{\lambda}, \bar{\lambda}/r)}{\Gamma(\bar{\lambda})}. \quad (2.41)$$

В работе [86] вводятся доверительные коэффициенты, определяемые как

$$\Delta L_i = 10 \lg \frac{a_i}{m_\epsilon}. \quad (2.42)$$

В соответствии с (2.40) и (2.41) для верхнего и нижнего пределов имеем

$$\Delta L_2 = 10 \lg r, \quad (2.43)$$

$$\Delta L_1 = 10 \lg \frac{1}{r}. \quad (2.44)$$

На рис.2.3 представлены графики доверительных коэффициентов предполагаемых уровней в зависимости от значений $\bar{\lambda}$ при различных доверительных вероятностях. Вычисление значений ΔL выполнено с помощью таблиц [3,62].

Величина $\bar{\lambda}$ согласно [85] в наиболее важном для практики случае с условиями высокого модального наложения и шумового возбуждения в широкой полосе частот определяется для трехмерных звуковых полей замкнутого воздушного объема из соотношения

$$\frac{1}{\bar{\lambda}} = \frac{\pi \omega \mu}{\Delta f} F(Q), \quad (2.45)$$

где $F(Q)$ – фактор расхождения результата при использовании закона распределения Пуассона; Δf – ширина возбуждаемой полосы частот; ω – среднегеометрическая круговая частота полосы анализа; μ – фактор модальных потерь.

Величина фактора расхождения $F(Q)$ определяется из графика на рис.2.4 в зависимости от величины Q в $10 \lg F(Q)$. Число Q определяется из соотношения

$$Q = 2 \Delta f / \pi \omega \mu. \quad (2.46)$$

В случае высокого модального наложения частот и широкой полосы шумового возбуждения при $Q \gg 1$ $10 \lg F(Q) \rightarrow 0, F(Q) \rightarrow 1$ и величина $\bar{\lambda}$ определяется как

$$\bar{\lambda} = \frac{\Delta f}{\pi \omega \mu}. \quad (2.47)$$

Фактор модальных потерь для отраженной энергии согласно с [85] можно связать со статистическим коэффициентом звукопоглощения $\bar{\alpha}$ как

$$\mu = \frac{[-\ln(1-\bar{\alpha})] cS}{4V\omega}, \quad (2.48)$$

и, соответственно, выражение, определяющее величину $\bar{\lambda}$ на среднегеометрической частоте полосы анализа шириной Δf , будет иметь вид

$$\bar{\lambda} = \frac{v f_{\text{cp}} l_{\text{cp}}}{\pi c [-\ln(1 - \bar{\alpha})]}, \quad (2.49)$$

Здесь $l_{\text{cp}} = 4V/S$ - средняя длина пробега звуковых волн в помещении.

Таким образом, при заданной доверительной вероятности расчета в зависимости от значений $\bar{\lambda}$ по графикам рис.2.3 можно определить доверительный коэффициент ΔL , а затем с учетом формул (2.42)-(2.44) значения нижней (a_1) и верхней (a_2) доверительных границ определяемой величины плотности энергии.

Как видно из выражения (2.49) и графиков рис.2.3, точность результатов расчета при статистическом энергетическом подходе растет при увеличении ширины полосы анализа и расположении ее в более высоком диапазоне частот. Степень заглушения помещения также оказывает существенное влияние на точность результатов статистической расчетной модели шумового поля помещения. С ростом звукопоглощения точность расчетов снижается.

2.5. Параметры статистической энергетической модели для помещений с квазидиффузными шумовыми полями

При статистическом энергетическом подходе к оценке квазидиффузных шумовых полей помещений используются обобщенные статистические характеристики поля: средняя длина свободного пробега звуковых волн; средний коэффициент звукопоглощения ограждений; коэффициент переноса, определяющий связь результирующего потока и градиента плотности отраженной звуковой энергии в квазидиффузном поле. От степени точности задания этих характеристик зависит точность результатов, получаемых статистическими энергетическими методами.

Обеспечение в квазидиффузных полях условия изотропности элементарных потоков звуковой энергии возможно при рассеянном отражении волн от поверхностей ограждений в реальных производственных помещениях. Образующееся стохастическое пространственное распределение волн соответствует распространению волн в реверберационных камерах и, следовательно, в граничных условиях статистической энергетической модели правомерно использовать диффузные коэффициенты звукопоглощения. В случаях, когда при реализации модели применяются методы, использующие осредненные граничные условия, или звукопоглощение на границах заменяется эквивалентным поглощением энергии в среде (см. главу 3), при расчетах приходится использовать осредненные по всему помещению коэффициенты.

Основываясь на гипотезе Эйринга-Миллингтона [38] о дискретном убывании энергии волн в моменты их падения на ограждения и используя принципы геометрического усреднения коэффициентов звукопоглощения, получена формула для определения среднего коэффициента звукопоглощения помещения, учитывающая поглощение энергии на ограждениях, оборудовании, открытых проемах и в среде помещения

$$\tilde{\alpha} = 1 - \exp(-m_3 l_{\text{cp}}), \quad (2.50)$$

где m_3 – эквивалентный пространственный коэффициент затухания звуковой энергии, заменяющий ее поглощение на границах, проемах, оборудовании и в воздухе

$$m_3 = m_{\text{в}} - \frac{S \ln(1 - \xi_0) + \sum_{i=1}^k S_i \ln(1 - \alpha_i) + \sum S_{\text{об}i} \ln(1 - \alpha_{\text{об}i})}{S l_{\text{cp}}}, \quad (2.51)$$

S – площадь ограждений помещения; S_i , α_i – площадь и коэффициент звукопоглощения i -го участка ограждения; $S_{\text{об}i}$, $\alpha_{\text{об}i}$ – площадь и коэффициент звукопоглощения i -го оборудования; $\xi_0 = S_0/S$ – вероятность падения звуковых волн на полностью поглощающую поверхность открытых проемов S_0 .

Выражения (2.50) и (2.51) использованы при разработке в главе 3 метода реализации расчетной модели с использованием метода электростатистических изображений.

Важным статистическим параметром, входящим в расчетную модель, является средняя длина свободного пробега звуковых волн. От точности ее задания зависит достоверность получаемых результатов. Установлено, что величина средней длины пробега зависит от объемно-планировочных и акустических характеристик помещений, характера отражения звука от поверхностей, наличия рассеивателей звука и др. факторов и в этой связи может существенно отличаться от расчетной величины, определяемой по формуле для идеального диффузного поля

$$l_{\text{cp}} = 4V/S, \quad (2.52)$$

где V и S – объем и площадь поверхностей помещения.

Исследования влияния перечисленных факторов на среднюю длину пробега выполнены нами методом компьютерного моделирования с использованием метода прослеживания лучей на основе методики, учитывающей изменения энергетической значимости лучей в процессе их отражения от поверхностей. Специально разработанная компьютерная программа позволяет производить вычисления средней длины в помещениях различных форм и пропорций с разными

звукопоглощающими характеристиками ограждений при зеркальном и диффузном характере отражения звука от поверхностей и при наличии или отсутствии в помещении рассеивающего звук оборудования.

При исследовании средней длины пробега в пустых соразмерных, длинных и плоских помещениях установлена ее зависимость от характера отражения звука. При зеркальном отражении звука она может значительно отличаться от средней длины, определяемой по формуле (2.52). Различия зависят от пропорций помещений, величины звукопоглощения, его расположения на ограждениях и составляют 15-100 % и более (см. рис.2.5). При диффузном отражении звука эти различия не превышают 10 % и, следовательно, при расчетах в производственных помещениях, где реальный рассеянный характер отражения звука от поверхностей близок к диффузному, можно использовать средние длины, определяемые по формуле (2.52).

Наличие в помещениях оборудования и других рассеивающих звук предметов приводит к изменению средних длин пробега. На основе компьютерного моделирования установлено, что изменения зависят от количества рассеивателей, объемно-планировочных и акустических параметров помещений и характера отражения звука (см. рис.2.6). Расчеты длин при комплексном учете всех перечисленных факторов показали, что в реальных условиях производственных помещений с рассеянным (диффузным) отражением звука от ограждений и оборудования для определения средних длин можно использовать формулу

$$l_{\text{ср.р}} = \frac{4(V - V_{\text{рас}})}{S + \Delta S_{\text{рас}}}, \quad (2.53)$$

где $V_{\text{рас}}$ и $\Delta S_{\text{рас}}$ – суммарные объем и площадь рассеивателей, находящихся в помещении.

При зеркальном отражении фактические средние длины значительно отличаются от рассчитанных по формуле (2.53) и их следует определять в каждом конкретном случае по предложенной методике.

С целью выявления возможности использования статистической энергетической модели для оценки нестационарных шумовых полей произведены исследования изменений средней длины после отключения источника, т.е. в процессе реверберации. Установлено, что при рассеянном отражении звука в производственных помещениях незначительные изменения длины происходят только в начальный период после отключения, а в остальные моменты времени она остается практически постоянной и, следовательно, модель можно использовать для оценки нестационарного шума производственных помещений. При зеркальном отражении средняя длина после отключения источника становится переменной величиной, постоянно возрастающей по мере затухания энергии. Данное обстоятельство необходимо учитывать при исследовании времени реверберации статистическими методами в модельных помещениях с зеркальным характером отражения звука.

В целом полученные результаты показывают, что в статистической энергетической модели, описывающей распределение отраженной звуковой энергии реальных производственных помещений, можно использовать средние длины, определяемые по формулам (2.52) и (2.53).

На точность результатов расчетов статистическими энергетическими методами существенное влияние оказывает точность задания величины коэффициента переноса отраженной энергии η . В выражение (2.10) входит числовой коэффициент, равный 0.5. Его значение найдено для идеальных изотропных условий распространения отраженных звуковых волн. В реальных производственных помещениях эти условия в полной мере могут не соблюдаться и, следовательно, величина числового коэффициента может изменяться в некоторых пределах.

Для исследования возможных изменений числового коэффициента разработана компьютерная программа, реализующая интегральное уравнение Куттруфа

$$I(dS') = \frac{1}{\pi} \int_S (1 - \alpha) I(dS) \frac{\cos\theta_1 \cdot \cos\theta_2}{|\bar{r}|^2} dS + I_0, \quad (2.54)$$

где $I(dS')$ – интенсивность звуковой энергии, падающей на некоторый участок ограждения dS' ; I_0 – интенсивность падающего на участок dS' прямого звука; $I(dS)(1 - \alpha)$ – интенсивность падающего на участок dS' звуковой энергии, определяемая вкладами отражений от всех других участков ограждений dS ; \bar{r} – радиус-вектор, соединяющий элементы dS и dS' ; θ_1 и θ_2 – углы между вектором \bar{r} и нормальными к соответствующим элементам dS и dS' .

Программа позволяет определять результирующие потоки и градиенты плотности отраженной энергии в объеме помещений и вычислять величину коэффициентов переноса η при рассеянном характере отражения звука от поверхностей.

Исследования числового коэффициента выполнены для условий соразмерных, длинных и плоских помещений при различных коэффициентах звукопоглощения потолка и стен. Анализ полученных результатов показал, что числовой коэффициент может изменяться в пределах от 0,15 до 0,80. При этом во всех случаях его рост наблюдается по мере удаления от источника. Особенно это заметно в длинных и плоских помещениях (см. рис.2.7).

При приближении к ограждающим конструкциям величина коэффициента несколько уменьшается, что, очевидно, связано с ростом влияния потоков энергии, идущих от этих стен, на величину

результатирующего потока. Изменения звукопоглощения поверхностей не оказывают существенного влияния на величину числового коэффициента.

В связи с тем, что величина коэффициента η имеет разброс значений, выполнена оценка влияния этих изменений на конечные результаты расчета уровней звукового давления. С использованием метода изображений (см. главу 3) произведены расчеты уровней при различных величинах η . Установлено, что при имеющихся изменениях числового коэффициента различия в уровнях звукового давления в среднем не превышают 2-3 дБ. Наибольшие различия (до 4 дБ) наблюдаются в удаленных точках длинных и плоских помещений. В целом результаты расчетов дают основание принять для расчета коэффициента переноса формулу (2.10) с постоянным числовым коэффициентом 0.5.

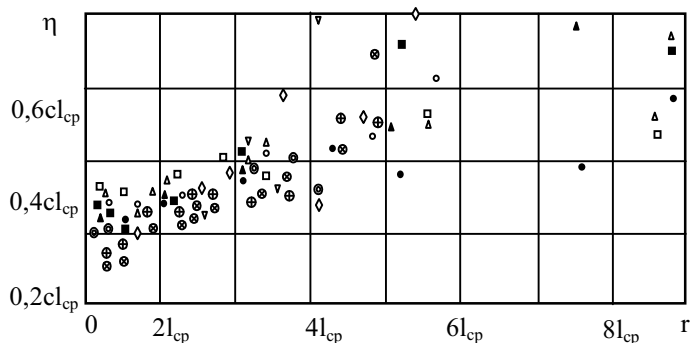


Рис. 2.7. Зависимость коэффициента переноса η от расстояния от источника при диффузном отражении звука в плоских и длинных помещениях

2.6. Методы и средства реализации расчетной модели

В соответствии с требованиями к современным методам расчета энергетических параметров шумовых полей помещений, установленными в главе 1, выбор метода решения полученной краевой задачи должен определяться следующими качественными и количественными показателями: достаточностью диапазона задач, решаемых данным методом; точностью результатов решения задачи и ее соответствием требованиям практики; простотой методики решения и способностью достаточно быстро и просто переходить от решения одной задачи к другой; трудоемкостью решения задачи рассматриваемым методом; наглядностью результатов решения.

С математической точки зрения поставленная задача есть задача интегрирования параболического или, в стационарном случае, эллиптического уравнений. Сведения о методах решения применительно к данным дифференциальным уравнениям изложены в соответствующей математической литературе [56,74]. Методы решения полученной краевой задачи можно условно разделить на аналитические, численные и аналоговые. К аналитическим методам решения относятся методы интегральных преобразований, потенциалов, разделения переменных, функции источника и т.д., к численным методам – конечно-разностные методы (интегро-интерполяционные, сеток, конечных элементов и др.).

Найти точное аналитическое выражение функции, являющееся решением уравнения в частных производных и удовлетворяющее граничным условиям, на практике удается лишь для ряда частных случаев. Как правило, решения даются для простейших областей (шар, цилиндр, прямоугольный параллелепипед и т.п.) при значительном упрощении граничных условий.

Анализ возможностей существующих аналитических методов расчета показывает, что для решения поставленной краевой задачи в производственных помещениях типа прямоугольных параллелепипедов можно использовать метод разделения переменных (метод Фурье). Он применим, если выполняются условия линейности дифференциального уравнения и граничных условий, а область интегрирования в декартовых координатах не сложнее прямоугольного параллелепипеда. Метод разделения переменных позволяет решать задачу как в нестационарной, так и стационарной постановках. При этом допускается задание однородных граничных условий в пределах каждой плоскости ограждений. Решение задачи методом разделения переменных для прямоугольного объема дается в виде тройной суммы бесконечных рядов, что требует применения быстродействующей вычислительной техники. Метод не применим для решения задач в сложных по форме помещениях, а также в системах акустически связанных помещений.

В случае постановки стационарной задачи возможно использовать метод функции источника, дающий удобный аппарат для аналитического представления решения краевых задач уравнений эллиптического типа [56,74]. Используемый при этом метод электростатических изображений позволяет решать задачи с граничными условиями Дирихле и Неймана. Как показывает анализ, метод может быть использован для решения уравнений (2.16) и (2.18) в случае нулевых граничных условий второго рода.

Решения возможны при расположении источника шума: между двумя бесконечными плоскостями; внутри бесконечной цилиндрической трубы прямоугольного сечения; внутри ограниченного прямоугольного параллелепипеда. При таком решении получаются бесконечные ряды с обычными ограничениями их пригодности [56] и, следовательно, требуется применение вычислительной техники.

Приведение граничных условий к нулевым условиям исключает возможность конкретизации звукопоглощающих характеристик поверхностей и ограничивает применение метода набором помещений с достаточно однородными условиями поглощения и отражения звуковой энергии на поверхностях ограждений. Метод не применим к решению задач в сложных по форме помещениях, а также в системах акустически связанных помещений.

Эллиптическое уравнение (2.16) имеет фундаментальные решения: для трехмерного пространства

$$\varepsilon_0(M) = \exp(-\varphi r) / r, \quad (2.55)$$

на плоскости

$$\varepsilon_0(M) = K_0(\varphi r), \quad (2.56)$$

где r – расстояние точки M от начала координат, совмещаемого с точкой источника; $K_0(\varphi r)$ – цилиндрическая функция, имеющая в начале координат логарифмическую особенность и экспоненциально убывающая на бесконечности.

Используя данные выражения и вводя некоторые упрощения в пространственном характере распределения шума по объему помещения, возможно получить более простые аналитические выражения для описания энергетических параметров отраженной звуковой энергии в помещениях прямоугольной формы бесконечных и конечных размеров, обладающие при этом достаточной для практики борьбы с шумом точностью.

При решении в областях со сложной формой границ могут использоваться приближенные аналитические методы, конечные результаты которых получаются расшифровкой численными методами выражений, полученных в результате применения аналитического метода [9].

Современная вычислительная техника обладает достаточным быстродействием и удобным интерфейсом для того, чтобы успешно решать полученную краевую задачу численными методами. Анализ численных методов показывает, что в этом случае наиболее приемлемым методом является *интегро-интерполяционный метод (метод баланса)*. Интегро-интерполяционный метод нашел широкое применение при решении практических задач, например, задач теплопроводности [54,56], в объемах со сложными геометрическими формами и граничными условиями.

При исследовании полученной математической модели может быть использован *метод аналогий*. При этом должна рассматриваться модель явления, совпадающая с моделью исследуемого явления, то есть в данном случае должно исследоваться поле величины-аналога плотности энергии в рассеянном звуковом поле помещения. Если между параметрами модели и объекта обеспечивается связь, определяемая законами теории подобия [11], то по данным измерений на модели можно судить о состоянии объекта в натуре. В отличие от машин дискретного действия, аналоговые модели решают задачи в физической обстановке. Это удобно, если требуется исследовать характер какого-либо процесса, сопоставить различные варианты однотипных решений, оценить влияние изменения того или иного параметра на ход процесса. То есть в этом случае роль моделей не сводится только к формальной процедуре решения уравнений, описывающих рассматриваемый процесс. Физический подход к вопросам моделирования превращает их в содержательное исследование, помогающее, благодаря простоте и наглядности моделей, осмыслить физическую сущность и математическое описание изучаемого процесса. Например, при выборе и оценке эффективности строительно-акустических мероприятий на стадии проектирования объекта проектировщику приходится решать не только прямые, но и обратные и инверсные задачи строительной акустики. Решение их в ряде случаев наиболее эффективно с помощью моделирования [22,26].

Аналоговые модели не обеспечивают такой высокой точности решения, которую дают машины дискретного счета. Точность моделирующих устройств ограничена качеством элементов, образующих вычислительную среду, и редко превышает 1% [29]. Однако для решения исследовательских задач борьбы с шумом такой точности вполне достаточно. Как известно, точность рядовых акустических измерений, обусловленная погрешностями измерительных приборов и случайным характером шума, не превышает ± 2 дБ [5].

Аналоговое моделирование использовано нами для оценки адекватности полученной математической модели распределению шума в помещениях с простой и сложной формой планов и в системах акустически связанных помещений [35,45].

Для решения практических задач на основе статистической энергетической модели разработаны аналитические и численные методы. Подробно методы рассмотрены в 3 и 4 главах книги.

ГЛАВА 3. АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РЕАЛИЗАЦИИ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ШУМОВЫХ ПОЛЕЙ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЙ

Как указано в главе 2, при реализации статистической энергетической модели, описывающей распределение отраженной энергии в квазидиффузных шумовых полях параболическими и эллиптическими дифференциальными уравнениями в частных производных второго порядка с граничными условиями второго рода, в помещениях, имеющих форму прямоугольного параллелепипеда, можно использовать методы функции источника и разделения переменных.

В главе дано описание методов расчета распределения звуковой энергии в квазидиффузных шумовых полях помещений, разработанных с использованием методов функции источника и разделения переменных (метод Фурье).

3.1. Математическая модель отраженного шумового поля помещения с нулевыми граничными условиями второго рода

При решении краевой задачи уравнений эллиптического типа методом функции источника удобные для практики решения получаются при нулевых граничных условиях. В этом случае может быть применен метод электростатических изображений [74]. Метод использован нами для решения задачи о распределении отраженной звуковой энергии в помещениях прямоугольной формы [33]. Для получения нулевых граничных условий второго рода была произведена замена поглощения отраженной энергии на границах ее эквивалентным поглощением в воздушной среде.

В квазидиффузных шумовых полях, в которых сохраняется свойство изотропности поля по угловой направленности элементарных потоков энергии в любой точке объема, поглощение звуковой энергии на границах помещения возможно заменить поглощением в среде, используя в качестве показателя пространственного затухания эквивалентный коэффициент затухания звуковой энергии в объеме m_3 , определяемой по формуле (2.51).

Для получения дифференциального уравнения, описывающего распределение отраженной энергии в таких условиях, выделим в помещении со стационарным квазидиффузным полем элементарный объем. Количество энергии, поглощаемой в нем за единицу времени, определяется как

$$E_{\text{пол}} = m_3 c \varepsilon, \quad (3.1)$$

где ε - плотность отраженной энергии в пределах элементарного объема.

При отсутствии источников дивергенция потока есть результирующий поток энергии, определяемый проходящими через поверхность единичного объема элементарными потоками и поглощением энергии в среде объема

$$\text{div} \bar{q} = m_3 c \varepsilon. \quad (3.2)$$

В результате подстановки в (3.2) выражений (2.5), (2.11), (2.51) и некоторых преобразований получим дифференциальное уравнение

$$\nabla^2 \varepsilon - \gamma^2 \varepsilon = 0, \quad (3.3)$$

$$\text{где } \gamma^2 = \frac{cm_3}{0,5cl_{\text{ср}}} = -\frac{2\left[\sum S_i \ln(1 - \alpha_i) + S \ln(1 - \xi_0)\right]}{S l_{\text{ср}}^2} + \frac{2m_{\text{в}}}{l_{\text{ср}}}. \quad (3.4)$$

Граничные условия в этом случае имеют вид

$$\left. \frac{\partial \varepsilon}{\partial n} \right|_S = 0. \quad (3.5)$$

Как показано в главе 2, использование приема переноса поглощения с границ объема в среду возможно в условиях квазидиффузных полей при энергетическом наложении большого количества статистически независимых отраженных волн. Условие выполняется в производственных помещениях при работе широкополосных источников шума и анализе шума в третьоктавных и октавных полосах частот (см. раздел 2.4).

В стационарном звуковом поле количество поглощаемой в единицу времени энергии равно количеству энергии, излучаемой источником. Энергетический вклад источника в суммарную величину энергии отраженного поля можно определить как

$$\Delta E = P \exp(-m_3 l_{\text{ср}}), \quad (3.6)$$

а потери отраженной энергии в квазидиффузном поле записать в виде

$$\Delta E_{\text{пол}} = \int_V m_3 c \varepsilon dV. \quad (3.7)$$

Тогда связь между мощностью источника шума P и плотностью энергии ε в отраженном поле помещения определится как

$$P = \exp(m_3 l_{\text{ср}}) \int_V m_3 c \varepsilon dV. \quad (3.8)$$

Уравнение (3.3) с условиями (3.5) и (3.8) дает описание распределения энергии отраженного поля в объеме помещения для случая осреднения звукопоглощения на границах и перенесения его с границ в среду

помещения. Оно относится к дифференциальным уравнениям эллиптического типа и при нулевых граничных условиях (3.5) может быть решено с использованием метода электростатических изображений [74], позволяющего найти аналитические выражения для пространства в виде двух бесконечных плоскостей, внутри бесконечного канала с прямоугольным поперечным сечением и в замкнутом объеме, имеющем форму прямоугольного параллелепипеда.

3.2. Решение эллиптического уравнения с использованием метода изображений

При использовании метода изображений суммарную плотность отраженной энергии поля в i -ой точке помещения можно представить как

$$\varepsilon_{отрi} = \frac{P(1-\tilde{\alpha})}{\Omega\eta} G_i, \quad (3.9)$$

где G_i – функция влияния объемно-планировочных и акустических параметров помещения на величину энергии в i -ой точке; $\tilde{\alpha}$ – средний коэффициент звукопоглощения, определяемый по формулам (2.50).

Согласно методу изображений функция G для помещения, имеющего форму прямоугольного параллелепипеда, определится как

$$G_{пр} = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{q=-\infty}^{\infty} \frac{\exp(-\gamma r_{mnq})}{r_{mnq}}, \quad (3.10)$$

где
$$\gamma = \sqrt{-\frac{2\left[\sum S_i \ln(1-\alpha_i) + S \ln(1-\xi_0)\right]}{S l_{cp}^2} + \frac{2m_b}{l_{cp}}}; \quad (3.11)$$

r_{mnq} – расстояния от расчетной точки до изображения; m, n, q – комбинации целых чисел, кроме $m=n=q=0$; остальные обозначения см. формулу (2.51).

Величины r_{mnq} находятся по формуле

$$r_{mnq} = \sqrt{(x_m - x)^2 + (y_n - y)^2 + (z_q - z)^2}, \quad (3.12)$$

где x_m, y_n, z_q – координаты изображений, вычисляемые при четных m, n, q как

$$x_m = ml_x + x_0; \quad y_n = nl_y + y_0; \quad z_q = ql_z + z_0, \quad (3.13)$$

при нечетных m, n, q – по формулам

$$x_m = (m+1)l_x - x_0; \quad y_n = (n+1)l_y - y_0; \quad z_q = (q+1)l_z - z_0; \quad (3.14)$$

x_0, y_0, z_0 – координаты источника шума; l_x, l_y, l_z – размеры помещения.

Для бесконечно длинного помещения с прямоугольным поперечным сечением ($z \rightarrow \infty$) функция G имеет вид

$$G_{дл} = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{\exp(-\gamma_{дл} r_{mn})}{r_{mn}}, \quad (3.15)$$

где $r_{mn} = \sqrt{(x_m - x)^2 + (y_n - y)^2 + (z_0 - z)^2}$;

$$\gamma_{дл} = \sqrt{-\frac{[l_x(\ln\beta_1 + \ln\beta_2) + l_y(\ln\beta_3 + \ln\beta_4)]}{(l_x + l_y)l_{cp}^2} + \frac{2m_b}{l_{cp}}}; \quad (3.16)$$

$\beta_1 = (1 - \alpha_1)$ – диффузные коэффициенты отражения поверхностей помещения, имеющих координаты $x_1 = 0, x_2 = l_x, y_3 = 0, y_4 = l_y$.

Для бесконечного плоского помещения функция G определяется как

$$G_{пл} = \sum_{q=-\infty}^{\infty} \frac{\exp(-\gamma_{пл} r_q)}{r_q}, \quad (3.17)$$

где $r_q = \sqrt{(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2 + (z_q - z)^2}$;

$$\gamma_{пл} = \sqrt{-\frac{\ln\beta_{пол} + \ln\beta_{пт}}{l_{cp}^2} + \frac{2m_b}{l_{cp}}}; \quad (3.18)$$

где $\beta_{пол}, \beta_{пт}$ – диффузные коэффициенты отражения пола и потолка.

Суммарная плотность звуковой энергии прямых и отраженных волн в i -ой точке находится как

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{пр} + \varepsilon_{отр} = P \left(\frac{\Phi e^{-m_i r_i}}{\Omega c r_i^2} + \frac{2(1-\tilde{\alpha})}{\Omega c l_{cp}} G_i \right), \quad (3.19)$$

а уровни звукового давления определяют как

$$L_i = L_p + \lg \left[\frac{\Phi e^{-m_b r_i}}{\Omega r_i^2} + \frac{2(1-\tilde{\alpha})}{\Omega l_{cp}} G_i \right], \quad (3.20)$$

где r_i – расстояние от источника до i -ой расчетной точки; L_p – уровень звуковой мощности источника шума. Первый член в скобках, принят для точечного ненаправленного источника. В условиях реального производства с крупногабаритными источниками сложной формы его следует принимать в соответствии с указаниями [70,71].

Спады уровней шума можно определять как

$$\Delta L_i = 10 \lg \frac{r_1^2 \left[\frac{\Phi e^{-m_b r_i}}{\Omega r_i^2} + \frac{2(1-\tilde{\alpha})}{\Omega l_{cp}} G_i \right]}{r_i^2 \left[\frac{\Phi e^{-m_b r_1}}{\Omega r_1^2} + \frac{2(1-\tilde{\alpha})}{\Omega l_{cp}} G_1 \right]}, \quad (3.21)$$

где G_1 – значение функции G в точке, расположенной на расстоянии r_1 от источника, относительно которой находится спад уровней звукового давления.

Сходимость рядов (3.10), (3.15) и (3.17) очевидна в силу наличия экспоненциальных множителей под знаком суммы.

Важное практическое значение имеет определение критерия достаточности суммирования членов ряда (3.10) при заданной точности нахождения уровня звукового давления отраженного поля в расчетных точках.

Согласно исследованию Крышова С.И. критерий достаточности суммирования, определяющий максимальный порядок n_{max} учитываемых членов ряда, может быть оценен на основе трансцендентного рекурсивного уравнения

$$n_{max} = \frac{-\ln(1-10^{-0,1\Delta L}) + \ln \left(\sqrt{\frac{-\ln(1-\tilde{\alpha})}{2}} n_{max} - 1 \right)}{\sqrt{-\ln(1-\tilde{\alpha})/2}}, \quad (3.22)$$

где ΔL – заданная погрешность вычисления уровня отраженного шума, дБ.

Достаточное число суммируемых членов ряда зависит от заданной погрешности определения уровней и величины среднего коэффициента звукопоглощения помещения, определяемого при геометрическом усреднении по формулам (2.50) и (2.51). Установлено, что для большинства производственных помещений расчеты уровней звукового давления с достаточной для практики точностью можно производить по формуле (3.20), ограничиваясь 5-7 порядками учитываемых членов ряда функции G , определяемой по формуле (3.10) во всем диапазоне возможных изменений коэффициентов звукопоглощения.

3.3. Решение краевой задачи распределения отраженной звуковой энергии в квазидиффузных шумовых полях помещений методом разделения переменных

В случае с ненулевыми граничными условиями (2.25) решение краевой задачи для уравнений параболического и эллиптического типа удобно получить, используя метод разделения переменных. Данный метод применен нами для решения задач о распределении отраженной звуковой энергии в помещениях правильной прямоугольной формы. Задачи решены как при стационарном, так и при нестационарном условиях возбуждения системы.

Вначале рассмотрим более общее решение задачи при нестационарных условиях возбуждения. Необходимо решить уравнение (2.15) с граничными условиями (2.25) и начальными условиями (2.30), определяемыми из решения стационарной задачи, что, как указано в главе 2, может быть затруднительным. Для установления начальных условий и последующего решения задачи нами использован метод, основанный на представлении излучения энергии постоянно действующим источником шума в виде последовательных излучений отдельных импульсов энергии.

Так как скорость распространения звуковой энергии отдельных волн значительно превышает скорость затухания энергии отраженного звукового поля в помещении, процесс распространения каждой порции энергии соответствует условиям квазидиффузного звукового поля и может быть описан на основе статистического энергетического подхода. Следует отметить, что на таких же принципиальных посылах в акустике помещений основывается возможность описания формулами статистической теории процесса реверберации при импульсном возбуждении системы. Результирующее распределение отраженной энергии находится как сумма распределений энергии отдельных импульсов во времени и в пространстве помещения.

Решение этой задачи методом разделения переменных возможно для помещений в виде прямоугольного параллелепипеда. Рассмотрим прямоугольное помещение в системе координат, приведенной на рис. 3.1.

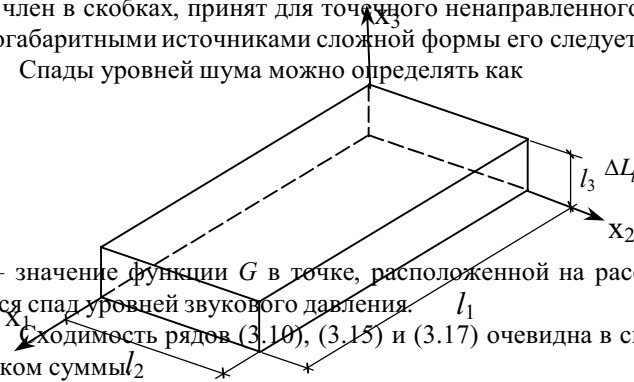


Рис. 3.1 Система координат помещения

Метод в отличие от метода изображений позволяет учесть коэффициенты звукопоглощения, осредненные в пределах каждой из шести ограждений помещения, и граничные условия можно записать как

$$\begin{cases} \left. \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right|_{x_j=l_j} = -k_j^+ \varepsilon \Big|_{x_j=l_j} \\ \left. \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right|_{x_j=0} = +k_j^0 \varepsilon \Big|_{x_j=0}, \end{cases} \quad (3.23)$$

где $k_j^+ = \frac{\alpha_j^+}{(2-\alpha_j^+)l_{cp}}$; $k_j^0 = \frac{\alpha_j^0}{(2-\alpha_j^0)l_{cp}}$.

Представим действие широкополосного ненаправленного источника шума, расположенного в точке с координатами x_1^0, x_2^0, x_3^0 , в виде последовательного излучения импульсов энергии Pdt . Величина энергии импульса, участвующего в последующем формировании отраженного поля, составляет $P(1-\tilde{\alpha})dt$, где $\tilde{\alpha}$ - средний коэффициент звукопоглощения помещения, определяемый по формуле (2.50).

При бесконечно малом dt с достаточным приближением можно считать, что энергия импульса в момент времени t первоначально распределяется в малом объеме V_{uc} , и начальные условия при $t=\tau$ имеют вид

$$\begin{cases} \varepsilon = \frac{P(1-\tilde{\alpha})dt}{\int_{V_{uc}} dV}, (x_1, x_2, x_3) \in V_{uc} \\ \varepsilon = 0, (x_1, x_2, x_3) \notin V_{uc} \end{cases} \quad (3.24)$$

Запишем для импульса решение уравнения (2.15) с граничными условиями (3.23) и начальными условиями (3.24) в виде

$$\varepsilon_{имп} = \sum_m \sum_n \sum_q A_{mnq} \varphi_m \varphi_n \varphi_q e^{(-U_{mnq}(t-\tau))}, \quad (3.25)$$

где
$$U_{mnq} = 0,5cl_{cp} \left[\frac{2m_b}{l_{cp}} + 4 \sum_{j=1}^3 \left(\frac{\mu_i}{l_j} \right)^2 \right]; \quad (3.26)$$

$\varphi_i = \cos \left[\mu_i \left(\frac{2x_j}{l_j} - 1 \right) \right]$ - собственные функции; индексы i, j связаны соотношениями: $\begin{cases} i = m \in \{1, 2, \dots, \infty\} \\ j = 1 \end{cases}$;

$\begin{cases} i = n \in \{1, 2, \dots, \infty\} \\ j = 2 \end{cases}$; $\begin{cases} i = q \in \{1, 2, \dots, \infty\} \\ j = 3 \end{cases}$.

Собственные числа μ_i , обеспечивающие соблюдение граничных условий (3.23), определяются из решения трансцендентных уравнений

$$tg(2\mu_i) = \frac{2\mu_i(k_j^+ + k_j^0)l_j}{4\mu_i - k_j^+ k_j^0 l_j^2}, \quad (3.27)$$

причем $\mu_i > 0$ и $\mu_{i+1} < \mu_i$.

Коэффициенты сдвига собственных функций определяются как

$$\beta_i = 0,5 \arctg \frac{2\mu_i(k_j^+ - k_j^0)l_j}{4\mu_i + k_j^+ k_j^0 l_j^2} + 0,25\pi [1 + (-1)^i]. \quad (3.28)$$

При симметричных граничных условиях

$$\beta_i = 0,25\pi [1 + (-1)^i], \quad (3.29)$$

то есть часть собственных (четных) функций сдвигается на угол $0,25\pi$.

Нечетные (косинусоидальные) собственные функции в таких условиях описывают симметричные относительно центра помещения составляющие отраженного поля, а четные (синусоидальные) – обратно-симметричные.

Амплитуды частных решений A_{mnq} находятся посредством разложения начального условия (3.24) по ортогональным собственным функциям

$$A_{mnq} = \frac{1}{B_m B_n B_q} \int_{V_{uc}} \frac{P(\tau)(1-\tilde{\alpha})d\tau}{\int_{V_{uc}} dV} \varphi_m \varphi_n \varphi_q dV. \quad (3.30)$$

Анализ составляющих формулы (3.25) показывает, что ряд быстро сходящийся и для достижения необходимой точности расчетов достаточно учесть несколько первых членов ряда. Так как за пределами области V_{uc} начальное значение энергии равно нулю, а размеры области V_{uc} малы по сравнению с размерами помещения, для первых членов можно записать

$$\int_V \varphi_m \varphi_n \varphi_q dV \approx \varphi_m^0 \varphi_n^0 \varphi_q^0 \int_V dV, \quad (3.31)$$

где $\varphi_i^0 = \cos \left[\mu_i \left(\frac{2x_j^0}{l_j} - 1 \right) + \beta_i \right]$ – собственные функции в точке источника.

Выражение (3.30) в этом случае примет вид

$$A_{mnq} = \frac{P(1-\tilde{\alpha})\varphi_m^0 \varphi_n^0 \varphi_q^0}{B_m B_n B_q} d\tau, \quad (3.32)$$

где B_i – квадраты норм собственных функций, определяемые из выражения

$$B_i = \int_0^{l_j} (\varphi_i)^2 dx_j = \frac{l_j}{2\mu_i} [\mu_i + 0,5 \sin(2\mu_i) \cos(2\beta_i)]. \quad (3.33)$$

С учетом принятых упрощений уравнение (3.25) можно записать в виде

$$\varepsilon_{\text{имп}} = \sum_m \sum_n \sum_q \frac{P(\tau)(1-\tilde{\alpha})\varphi_m \varphi_n \varphi_q \varphi_m^0 \varphi_n^0 \varphi_q^0}{B_m B_n B_q} e^{-U_{mnq}(t-\tau)} d\tau. \quad (3.34)$$

Выражение (3.34) описывает процесс распределения и затухания импульса энергии в пространстве помещения.

Если звуковая энергия излучается источником в течение интервала времени $\tau_1 \langle t \langle \tau_2$, то результат его действия равен сумме действий всех импульсов и для получения энергетических характеристик отраженного звукового поля необходимо проинтегрировать выражение (3.34). Получим

$$\varepsilon = \int_{\tau_1}^{\tau_2} d\varepsilon_{\text{имп}} = \int_{\tau_1}^{\tau_2} \sum_m \sum_n \sum_q \frac{P(\tau)(1-\tilde{\alpha})\varphi_m \varphi_n \varphi_q \varphi_m^0 \varphi_n^0 \varphi_q^0}{B_m B_n B_q} \exp[-U_{mnq}(t-\tau)] d\tau. \quad (3.35)$$

Если координаты расчетной точки (x_1, x_2, x_3) и источника (x_1^0, x_2^0, x_3^0) постоянны, выражение (3.35) имеет вид

$$\varepsilon = (1-\tilde{\alpha}) \sum_m \sum_n \sum_q \frac{\varphi_m \varphi_n \varphi_q \varphi_m^0 \varphi_n^0 \varphi_q^0}{B_m B_n B_q} \int_{\tau_1}^{\tau_2} P(\tau) \exp[-U_{mnq}(t-\tau)] d\tau. \quad (3.36)$$

При необходимости, действие всех импульсов, предшествующих моменту t , можно заменить распределением плотности звуковой энергии и, наоборот, распределение плотности звуковой энергии можно заменить действием импульсов, излученных в предыдущие моменты.

На основе (3.35) можно решать задачи о распределении звуковой энергии как при нестационарном, так и при стационарном режимах работы источника шума.

3.4. Расчет стационарных шумовых полей помещений на основе метода разделения переменных

Выражение (3.35) можно использовать для оценки распределения отраженной звуковой энергии при работе стационарного источника шума.

При постоянной акустической мощности источника $P(\tau) = const$ интегралы под знаком суммы тройного ряда легко определяются. При этом временной интервал действия источника от $\tau_1 = t - \infty$ до момента анализа $\tau_2 = t$ составляет $\tau_2 - \tau_1 = \infty$. В этом случае выражение (3.36) принимает вид

$$\varepsilon = P(1-\tilde{\alpha}) \sum_m \sum_n \sum_q \frac{\varphi_m \varphi_n \varphi_q \varphi_m^0 \varphi_n^0 \varphi_q^0}{B_m B_n B_q U_{mnq}}. \quad (3.37)$$

Для повышения сходимости ряда изменим выражение (3.37), приняв в (3.36) несколько меньшим верхний предел интегрирования τ_2 . Это возможно при исключении из рассмотрения части энергии импульсов, не успевшей достичь точки анализа к моменту времени t . Так как с момента излучения импульса до начала изменения отраженной энергии в расчетной точке проходит время, равное как минимум $\Delta t = r/c$, где r – расстояние от источника до точки расчета, можно принять $\tau_2 = t - r/c$. Тогда из (3.36) имеем

$$\varepsilon = P(1-\tilde{\alpha}) \sum_m \sum_n \sum_q \frac{\varphi_m \varphi_n \varphi_q \varphi_m^0 \varphi_n^0 \varphi_q^0}{B_m B_n B_q U_{mnq}} e^{-U_{mnq}r/c}. \quad (3.38)$$

Выражение (3.38) обладает лучшей сходимостью, чем (3.37), так как наряду со знакопеременными свойствами ряда имеет экспоненциальную зависимость, резко возрастающую с увеличением порядка суммирования.

С учетом изложенного суммарная плотность энергии в i -й точке шумового поля помещения при работе стационарного источника шума может быть определена по формуле

$$\varepsilon_i = P \left[\frac{\Phi e^{-m_b r_i}}{\Omega c r_i^2} + (1 - \tilde{\alpha}) \sum_m \sum_n \sum_q \frac{\Phi_m \Phi_n \Phi_q \Phi_m^0 \Phi_n^0 \Phi_q^0}{B_m B_n B_q U_{mnq}} e^{-U_{mnq} r/c} \right], \quad (3.39)$$

где r_i – расстояние до i -й расчетной точки. Соответственно, формула для определения уровней звукового давления будет иметь вид

$$L_i = L_p + 10 \lg \left[\frac{\Phi e^{-m_b r_i}}{\Omega r_i^2} + c(1 - \tilde{\alpha}) \sum_m \sum_n \sum_q \frac{\Phi_m \Phi_n \Phi_q \Phi_m^0 \Phi_n^0 \Phi_q^0}{B_m B_n B_q U_{mnq}} e^{-U_{mnq} r/c} \right]. \quad (3.40)$$

На основе (3.37) можно произвести оценку соответствия между формулами, описывающими распределение плотности отраженной энергии в диффузных и квазидиффузных полях. Для этого выполним анализ выражения (3.37). Найдем величину средней плотности отраженной энергии, проинтегрировав выражение (3.37) по объему помещения

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{V} \int_V P(1 - \tilde{\alpha}) \sum_m \sum_n \sum_q \frac{\Phi_m \Phi_n \Phi_q \Phi_m^0 \Phi_n^0 \Phi_q^0}{B_m B_n B_q U_{mnq}} dV. \quad (3.41)$$

Обозначив
$$D_i = \frac{1}{B_i} \int_0^{l_j} \varphi_i dx_j = \frac{2 \sin \mu_i \cos \beta_i}{\mu_i + 0,5 \sin(2\mu_i) \cos(2\beta_i)}, \quad (3.42)$$

запишем выражение (3.41) в виде

$$\bar{\varepsilon} = \frac{P(1 - \tilde{\alpha})}{V} \sum_m \sum_n \sum_q \frac{D_m D_n D_q \Phi_m^0 \Phi_n^0 \Phi_q^0}{U_{mnq}}. \quad (3.43)$$

В табл.3.1 приведены значения $D_i (i=1,2,3,4)$, рассчитанные для симметричных граничных условий. Анализ значений D_i показывает, что сумма ряда в выражении (3.37) в основном определяется его первым членом

$$\bar{\varepsilon} \approx P(1 - \tilde{\alpha}) \frac{D_{m=1} D_{n=1} D_{q=1} \Phi_{m=1}^0 \Phi_{n=1}^0 \Phi_{q=1}^0}{V U_{111}}. \quad (3.44)$$

Различия уровней отраженной энергии, определяемых с использованием (3.43) и (3.44), не превышают 0,5 дБ, и в основном меньше 0,1 дБ.

Таблица 3.1

Значения коэффициентов D_i

kl_j	D_i			
	$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=4$
0.07	1.0006	0	-0.0009	0
0.01	1.0008	0	-0.0010	0
0.02	1.0017	0	-0.0022	0
0.04	1.0033	0	-0.0041	0
0.06	1.0050	0	-0.0060	0
0.10	1.0082	0	-0.0098	0
0.20	1.0161	0	-0.0196	0
0.30	1.0237	0	-0.0293	0
0.60	1.0450	0	-0.0555	0
0.80	1.0581	0	-0.0716	0
1.00	1.0702	0	-0.0872	0

Приняв согласно данным табл.3.1 произведение $D_{m=1} D_{n=1} D_{q=1} = 1$ и сделав упрощение $U_{111} \approx c\tilde{\alpha}/l_{cp}$, получим

$$\bar{\varepsilon} = \frac{P(1 - \tilde{\alpha}) \Phi_{m=1}^0 \Phi_{n=1}^0 \Phi_{q=1}^0}{V \tilde{\alpha} l_{cp}}. \quad (3.45)$$

Если источник расположен вблизи геометрического центра помещения, можно принять произведение $\Phi_{m=1}^0 \Phi_{n=1}^0 \Phi_{q=1}^0 = 1$ и записать (3.45) в виде, практически совпадающем с формулой диффузного поля,

$$\bar{\varepsilon} = \frac{4P(1 - \tilde{\alpha})}{\tilde{\alpha} c S}. \quad (3.46)$$

Различия в уровнях отраженной энергии, полученных по формулам (3.43), (3.44) и (3.46) для соразмерных помещений, составляют при равномерном распределении звукопоглощения по ограждениям не более 0,5 дБ, а при неравномерном – 1,5 дБ. Таким образом, из анализа следует, что между методами статистического энергетического подхода и диффузного поля имеется связь. Оба метода получены с использованием закона сохранения энергии, но на различных уровнях: на дифференциальном для элементарного объема при статистическом энергетическом подходе и интегральном для всего объема помещения в методе диффузного поля.

Так как в выражении (3.38) ряд знакопеременный и имеет под знаком суммы в знаменателе экспоненциальную зависимость, он обладает хорошей сходимостью, однако при компьютерной реализации необходимо иметь критерий, определяющий достаточность суммирования членов ряда (3.38).

Из результатов выполненного анализа видно, что первый член ряда в выражении (3.38) определяет среднюю по помещению величину плотности отраженной звуковой энергии, которая соответствует результатам расчетов по методу диффузного поля. Следовательно, для условий, близких к диффузным, достаточно учитывать только первый член ряда, вклад которого является определяющим. Для помещений со значительным звукопоглощением, а также для несоизмеримых помещений, начинают играть заметную роль последующие знакопеременные члены ряда. Они определяют процесс перераспределения звуковой энергии по помещению, выражающийся в повышении ее в ближней к источнику шума зоне и уменьшении в дальней зоне по сравнению со средним значением. В этом случае достаточный порядок суммирования членов ряда можно определять с использованием предложенной Антоновым А.И. формулы

$$N \approx 0,9 l_{\max} 10^{0,17\theta} \sqrt{l_{\text{cp}} V^3 \theta V}, \quad (3.47)$$

где θ - задаваемая величина степени, при которой член ряда с порядковым номером N имеет модуль в 10^{θ} раз меньше по сравнению с первым членом ряда; l_{\max} – максимальный размер помещения.

Так как сумма знакопеременного ряда быстро сходится, величину степени можно принимать в пределах $\theta \approx 1,5 \dots 2,0$. При $\theta = 2$

$$N = 2,5 l_{\max} / V^{0,17} \sqrt{l_{\text{cp}}}. \quad (3.48)$$

3.5. Сравнительный анализ результатов расчетов аналитическими методами с данными экспериментальных исследований

Цель выполненного сравнительного анализа - получение объективной оценки о степени соответствия аналитических расчетных методов реальному распределению энергии в квазидиффузном звуковом поле помещений. В общем виде задача анализа состояла в получении сравнительных данных при сопоставлении расчетов, выполненных на основе разработанных методов, с другими методами и с результатами эксперимента.

Учитывая, что методы реализации расчетной модели с использованием методов изображений и разделения переменных применимы для прямоугольных помещений правильной геометрической формы, при сравнении использованы помещения, имеющие форму, близкую к прямоугольному параллелепипеду. При этом рассмотрены соразмерные, длинные и плоские помещения при наличии и отсутствии в них звукопоглощающих облицовок, с различными условиями расположения в помещениях рассеивающих звук предметов (станков, оборудования, убранства и т.п.). Для обеспечения наибольшей достоверности все экспериментальные данные получены при работе в помещениях одного точечного источника шума.

При сравнении использовались: метод диффузного поля; метод геометрической теории акустики в интерпретации метода мнимых источников; метод "Руководства по расчету и проектированию шумоглушения в промышленных зданиях" [66] (в дальнейшем метод НИИСФа).

Выбор расчетных методов для сравнительного анализа определялся, исходя из особенностей их подхода к оценке распределения звуковой энергии в помещениях, принятых при их разработке (геометрическая и статистическая теории акустики, эмпирический подход).

Оценка количественных показателей совпадения расчетных и экспериментальных данных выполнена на основе статистической обработки. Расхождения между расчетными данными и экспериментом характеризовались статистическими показателями, а именно, средним расхождением

$$\Delta \bar{L} = \sum_{i=1}^N \Delta L / N, \quad (3.49)$$

средним квадратическим отклонением

$$\Delta \bar{L}_2 = \sqrt{\sum (\Delta L - \Delta \bar{L})^2 / N}, \quad (3.50)$$

где N – количество расчетных точек. Величина $\Delta \bar{L}_2$ определяет соответствие форм кривых расчетных и экспериментальных графиков.

Для выполнения сравнительного анализа расчетных и экспериментальных данных разработана программа, позволяющая производить одновременные расчеты уровней звукового давления перечисленными методами.

Программа разработана для персональных компьютеров под управлением операционной системы WINDOWS – 95 и выше. Текст программы написан на языке Visual Basic, отлажен и откомпилирован в выполняемый модуль. В целом программа состоит из блоков исходных данных, расчета энергетических параметров шума, вывода результатов. При написании использованы возможности Visual Basic 5.0 по обеспечению удобства работы пользователя с программой. Вид диалоговых окон приведен на рис. 3.2.

Ввод исходных данных предусмотрен из файлов или непосредственно набором с клавиатуры или мышью. Вводимые из файла данные могут корректироваться путем внесения необходимых изменений в размеры помещений, мощность источника, места его положения, октавной полосы исследований, температурно-влажностных условий помещения и др. Данная процедура полезна при выполнении исследовательских задач, например, при исследовании влияния высоты помещения или коэффициентов звукопоглощения поверхностей на спады уровней звукового давления. В программе предусмотрена возможность корректировки средней длины свободного пробега отраженных звуковых волн с учетом влияния на нее рассеивающих звук предметов и других факторов. Корректировка может выполняться набором с клавиатуры или непосредственно при выполнении программы в случае подключения к ней программы по расчету средней длины свободного пробега.

Разработанная программа дает возможность производить расчет как суммарных уровней звукового давления (прямую и отраженную составляющие) в исследуемой полосе частот от одного источника, так и уровни только отраженной энергии. Последнее позволяет более полно анализировать влияние различных факторов на характер распределения отраженной энергии.

Так как программа предназначена для решения исследовательских задач, и в частности, для сравнительного анализа, в ней предусмотрены процедуры по определению величин $\Delta\bar{L}_1$ и $\Delta\bar{L}_2$ по формулам (3.49) и (3.50).

Вывод результатов уровней звукового давления осуществляется в виде файлов, а также непосредственно на экран в форме графиков (см. рис.3.2). Возможно также получение отдельных уровней звукового давления в любой конкретной точке помещения.

Проверка полученных расчетных формул в *соразмерных производственных помещениях* показала, что методы разделения и изображения достаточно хорошо описывают распределение энергии при разных пропорциях помещений. Близкие к ним значения, как и следовало ожидать, дают методы мнимых источников и диффузного поля. Наибольшие расхождения в соразмерных помещениях (5 дБ и более) дает эмпирический метод НИИСФа. Это связано с тем, что метод разработан только для длинных и плоских помещений и, естественно, не учитывает условий формирования отраженного поля в соразмерных помещениях. Иллюстрация результатов расчетов в производственном помещении без звукопоглощающих облицовок приведена на рис. 3.3.

Методы проверены также в соразмерном помещении при отсутствии и наличии на потолке помещения звукопоглощающего материала. Исследование произведено в зале реконструируемого здания расчетно-кассового центра банка до и после устройства подвесного звукопоглощающего потолка. Соотношение размеров помещения до устройства потолка было 3,75:3,12:1, а после устройства составило 4,29:3,57:1. Помещение пустое. Полы и перекрытия бетонные, стены оштукатурены. Графики уровней приведены на рис.3.4. Видно, что при внесении звукопоглощения точность аналитических методов остается удовлетворительной. Однако, при этом они несколько занижают уровни шума, а методы мнимых источников и диффузного поля, наоборот, их завышают.

Проверка аналитических методов в *длинных производственных помещениях* показала, что они лучше, чем методы диффузного поля и мнимых источников, описывают спады уровней звукового давления. Различия увеличиваются тем более, чем больше звукопоглощение помещения. Достаточно хорошее совпадение, что и следовало ожидать, в длинных помещениях дает метод НИИСФа. В качестве иллюстрации на рис. 3.5 и 3.6 приведены графики уровней звукового давления в длинных помещениях различных размеров и с различным звукопоглощением поверхностей. В сильно заглушенных помещениях (см. рис. 3.6) точность метода мнимых источников практически соизмерима с точностью статистических энергетических методов.

Проверка разработанных аналитических *методов в плоских производственных помещениях* показывает, что они дают наиболее удовлетворительное описание распределения отраженной энергии. Близкие к ним результаты получены также методом НИИСФа. Это хорошо видно на графиках рис.3.7.

Методы проверены также в плоском помещении без наличия и с устройством звукопоглощения (см. рис.3.8). В качестве такого помещения использовано чердачное помещение строящегося здания с плоской кровлей. Исследование выполнялось до и после укладки теплоизоляции из минераловатных плит толщиной 12 см по полу чердака. Стены помещения гладкие бетонные. Потолок выполнен из ребристых железобетонных плит, уложенных с уклоном 3% к центру помещения. Внутри помещения имеются вертикальные опорные элементы и трубы вентиляции и канализации. Средняя высота помещения 1,8 м. Соотношения размеров помещения 6.6:5.2:1. Видно, что аналитические методы хорошо описывают распределение энергии как в незаглушенных, так и заглушенных помещениях.

В целом выполненная оценка разработанных аналитических методов показывает, что они могут использоваться для расчета уровней звуковой энергии в соразмерных, длинных и плоских помещениях. При этом точность методов разделения переменных и изображений примерно одинакова и они могут равноправно использоваться при оценке распределения шума в производственных помещениях. В то же время следует

отметить, что скорость расчета с использованием метода разделения переменных в несколько раз превышает скорость расчетов с использованием метода изображений. В этой связи при большом количестве расчетов предпочтительней использовать метод разделения переменных.

ГЛАВА 4. ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД РЕАЛИЗАЦИИ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ШУМОВЫХ ПОЛЕЙ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЙ

4.1. Интегро-интерполяционная модель плотности отраженной энергии в квазидиффузных шумовых полях

Физический процесс формирования отраженного звукового поля характеризуется интегральным уравнением сохранения энергии (см. главу 2). Так, например, в общем случае при нестационарном шумовом режиме для длинного (одномерного) помещения уравнение баланса отраженной энергии на отрезке $[x_1, x_2]$ за время $\Delta t = t_2 - t_1$ имеет вид

$$\int_{x_1}^{x_2} [\varepsilon(x, t_2) - \varepsilon(x, t_1)] F dx = \int_{t_1}^{t_2} [q(x_1, t) - q(x_2, t)] F dt - \int_{x_1}^{x_2} \int_{t_1}^{t_2} c m_g \varepsilon(x, t) F dx dt + \int_{x_1}^{x_2} \int_{t_1}^{t_2} f(x, t) F dx dt, \quad (4.1)$$

где F – площадь поперечного сечения помещения; $q(x, t) = -\eta(x) \frac{\partial \varepsilon}{\partial t}(x, t)$ – поток отраженной энергии; $f(x, t)$ – плотность отраженной энергии, вводимой в объем источниками.

Если существуют непрерывные производные $\frac{\partial \varepsilon}{\partial t}$ и $\frac{\partial}{\partial x} \left(\eta(x) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right)$, то из уравнения баланса следует дифференциальное уравнение для плотности отраженной энергии

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\eta(x) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + f(x, t) - c m_g \varepsilon = 0. \quad (4.2)$$

Таким образом, в случае реализации уравнения в частных производных второго порядка разностными методами при написании разностных уравнений, приближенно описывающих процесс формирования отраженного поля, естественно исходить из уравнения баланса.

Метод энергетического баланса (интегро-интерполяционный метод) широко применяется на практике преимущественно при решении задач теплопроводности [9,50,54]. Анализ опыта приложения метода к решению практических задач показывает, что его можно так же использовать и при расчетах энергетических параметров отраженных звуковых полей.

Суть метода заключается в разбиении объема помещения на ряд геометрических форм, в пределах которых характер изменения плотности отраженной энергии с известной степенью точности может быть принят линейным, и составлении уравнения баланса отраженной энергии для каждого элементарного объема. Распределение отраженной энергии получается из решения системы уравнений. При решении задач указанным методом выполняются следующие операции:

- помещение, для которого определяется решение, разбивается на элементарные объемы в виде параллелепипедов со сторонами $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ и определяются узловые точки сетки; каждому элементарному объему соответствует одна узловая точка сетки;

- для всех внутренних и граничных объемов записываются уравнения балансов отраженной энергии, включающие значения потоков отраженной энергии на границах объемов; при записи уравнений баланса для объемов, прилегающих к границам, используются граничные условия;

- аппроксимируются путем выражения через значения сеточной функции члены, входящие в уравнение баланса отраженной энергии; при этом аппроксимационные выражения для потоков должны удовлетворять условиям согласования.

Поскольку число элементарных объемов равно числу узлов пространственного разбиения, то в результате этих действий получается полная система алгебраических уравнений – разностная схема, при реализации которой можно определить разностное решение.

Следует отметить одно важное обстоятельство, свидетельствующее о практической значимости интегро-интерполяционного метода при решении задач о распределении отраженной звуковой энергии в квазидиффузных звуковых полях.

Как показано в главе 2, коэффициент переноса отраженной энергии η в общем случае является переменной по объему помещения величиной. В этом случае уравнение (2.15) будет иметь вид

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} - \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\eta(x, y, z) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\eta(x, y, z) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta(x, y, z) \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) \right] + c m_g \varepsilon = 0, \quad (4.3)$$

где $\eta(x, y, z)$ – значения коэффициента переноса в точках с координатами x, y, z .

Соответственно, для случая стационарного квазидиффузного поля вместо (2.16) имеем

$$\left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\eta(x, y, z) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\eta(x, y, z) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta(x, y, z) \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) \right] - c m_0 \varepsilon = 0. \quad (4.4)$$

Решение уравнений (4.3) и (4.4) более сложно, чем решение уравнений (2.15) и (2.16). Поэтому при разработке аналитических методов решений задачи величина коэффициента η принималась нами постоянной по всему объему помещения. Как показывают выше приведенные результаты сравнения расчетных и экспериментальных данных, такое осреднение коэффициента η для большинства производственных помещений не вносит существенных погрешностей в определение уровней звукового

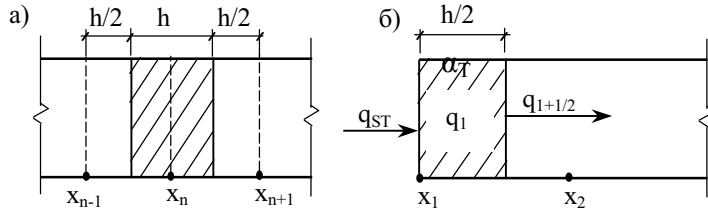


Рис.4.1. Схемы разбиения длинного (одномерного) помещения на элементарные объемы

давления. Однако в ряде случаев, и особенно, при решении исследовательских задач необходимо использовать переменные значения η . Такие возможности при реализации уравнений (4.3) и (4.4) дает метод энергетического баланса.

Рассмотрим применение интегро-интерполяционного метода для решения задач в помещениях со стационарным квазидиффузным звуковым полем. Для упрощения выкладок проиллюстрируем описанную выше методику на примере длинного помещения типа коридора или тоннеля.

Так как размеры помещения в поперечном сечении значительно меньше длины, и соответственно, плотность отраженной энергии в поперечном сечении можно принять с достаточной точностью постоянной, отраженное шумовое поле можно считать одномерным. Поглощение и ввод отраженной энергии происходит на всех поверхностях помещения.

Для этого случая уравнение распределения отраженной звуковой энергии без учета поглощения звука в воздухе можно записать в виде

$$\frac{d}{dx} \left[\eta(x) \frac{d\varepsilon}{dx} \right] - \mu(x)\varepsilon + q_S(x) = 0, \quad (4.5)$$

где $q_S(x) = q(w)L/S$; $q(w) = P(1 - \alpha(x))\cos\theta/(\Omega r^2(x))$ - поток отраженной энергии, вводимой в помещение после первого акта отражения прямой энергии в сечение с координатой x ; P - мощность источника шума; θ - угол между падающим звуковым лучом прямой энергии и поверхностями помещения в сечении с координатой x ; $r(x)$ - расстояние от источника шума до поверхностей помещения в сечении с координатой x ; $\alpha(x)$ - средний коэффициент звукопоглощения поверхностей помещения в сечении с координатой x ; L, S - периметр и площадь поперечного сечения помещения; $\mu(x) = \frac{\alpha(x)cL}{2(2 - \alpha(x))S}$ - показатель поглощения отраженной звуковой энергии на поверхностях помещения в сечении с координатой x .

Разобьем весь объем по длине помещения на равные параллелепипеды с длиной по координате x равной h (рис.4.1). Пространственная сетка $\{x_n\}_{n=1}^N$ имеет, соответственно, шаг $h = x_{n+1} - x_n$.

Уравнение баланса отраженной звуковой энергии для внутреннего элемента имеет вид

$$-q_{n+1/2} + q_{n-1/2} + \int_{x_{n-1/2}}^{x_{n+1/2}} (-\mu\varepsilon + q_S) dx = 0, \quad (4.6)$$

где $q_{n\pm 1/2} = -\eta(x) \frac{d\varepsilon}{dx} \Big|_{x_{n\pm 1/2}}$ - потоки отраженной энергии на границах элемента.

Уравнение (4.6) представляет собой закон сохранения энергии для элементарного объема: первый и второй члены - потоки энергии на границах с соседними объемами; третий и четвертый члены - соответственно, поглощение отраженной энергии на границах и ввод отраженной энергии в среду объема. Все составляющие уравнения баланса отнесены к площади поперечного сечения и выражены в Вт/м².

При вычислении потока, поглощаемого на границах, можно считать, что плотность энергии не изменяется на отрезке $[x_{n-1/2}, x_{n+1/2}]$, то есть

$$\int_{x_{n-1/2}}^{x_{n+1/2}} \mu \varepsilon dx \approx \varepsilon_n \int_{x_{n-1/2}}^{x_{n+1/2}} \mu dx. \quad (4.7)$$

Вычисление потока $q_{n\pm 1/2}$ можно производить исходя из предположения о малом изменении потока $q(x)$ на соответствующих интервалах. Очевидно, что при малых h поток мало изменяется. Из выражения (2.5) имеем

$$q(x) = -\eta(x) \frac{d\varepsilon}{dx} \quad \text{или} \quad \frac{d\varepsilon}{dx} = -\frac{q(x)}{\eta(x)}. \quad (4.8)$$

Проинтегрируем равенство (4.8) по отрезку $[x_{n-1}, x_n]$

$$\int_{x_{n-1}}^{x_n} \frac{d\varepsilon}{dx} dx = \varepsilon_n - \varepsilon_{n-1} = - \int_{x_{n-1}}^{x_n} \frac{q(x)}{\eta(x)} dx.$$

Предполагая, что $q(x)$ мало меняется на отрезке $[x_{n-1}, x_n]$, положим $q(x) \approx q_{n-1/2}$ и вынесем $q_{n-1/2}$ за интеграл. Тогда получим

$$\varepsilon_n - \varepsilon_{n-1} \approx -\frac{q_{n-1/2}}{\eta} \int_{x_{n-1}}^{x_n} \frac{dx}{\eta(x)}. \quad (4.9)$$

Потоки энергии через границы элементарного объема могут быть выражены через разности плотностей отраженной энергии в узлах сетки

$$q_{n+1/2} \approx \eta_{n+1/2} \frac{\varepsilon_n - \varepsilon_{n+1}}{h}; \quad q_{n-1/2} \approx \eta_{n-1/2} \frac{\varepsilon_{n-1} - \varepsilon_n}{h}, \quad (4.10)$$

где $\eta_{n+1/2}$, $\eta_{n-1/2}$ – коэффициенты переноса отрезков $[x_n, x_{n+1}]$ и $[x_{n-1}, x_n]$. Соответственно

$$\eta_{n+1/2} = h \left[\int_{x_n}^{x_{n+1}} \frac{dx}{\eta(x)} \right]^{-1}; \quad \eta_{n-1/2} = h \left[\int_{x_{n-1}}^{x_n} \frac{dx}{\eta(x)} \right]^{-1}.$$

Очевидно, что аппроксимация (4.10) удовлетворяет условию согласования потоков.

Подставляя полученные выражения для потоков в уравнение баланса (4.6) для элементарного объема, получаем разностное уравнение

$$\eta_{n+1/2} \frac{\varepsilon_{n+1} - \varepsilon_n}{h} + \eta_{n-1/2} \frac{\varepsilon_{n-1} - \varepsilon_n}{h} + (q_{sn} - \mu_n \varepsilon_n) h = 0, \quad (4.11)$$

где $\mu_n = \frac{1}{h} \int_{x_{n-1/2}}^{x_{n+1/2}} \mu(x) dx$, $q_{sn} = \frac{1}{h} \int_{x_{n-1/2}}^{x_{n+1/2}} q_s(x) dx$ – средние по длине элементарного объема значения μ и q_s .

В случае непрерывности функций $\mu(x)$ и $q_s(x)$ интегралы можно заменить квадратурными формулами, а также положить, что $q_{sn} \approx q_s(x_n)$ и $\mu_n \approx \mu(x_n)$. Коэффициенты переноса $\eta_{n\pm 1/2}$ можно вычислять одним из следующих способов: $\eta_{n\pm 1/2} = \eta(x_{n\pm 1/2})$; $\eta_{n\pm 1/2} = [\eta(x_{n\pm 1}) + \eta(x_n)]/2$;

$$\eta_{n\pm 1/2} = 2\eta(x_n)\eta(x_{n\pm 1})/[\eta(x_n) + \eta(x_{n\pm 1})].$$

В случае постоянства величин η по помещению после преобразований из (4.11) можно получить

$$\varepsilon_{n+1} + \varepsilon_{n-1} - \varepsilon_n \left[2 + \mu(x_n) \frac{h^2}{\eta} \right] + q_s(x_n) \frac{h^2}{\eta} = 0. \quad (4.12)$$

Для объемов, прилегающих к торцам помещения, разностные уравнения имеют несколько иной вид. Например, при $x = 0$ (см. рис. 4.1,б) имеем

$$\frac{\eta}{h} (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) - \frac{\alpha_T c \varepsilon_1}{2(2 - \alpha_T)} + q_{ST} + \frac{h}{2} [q_S(x_1) - \mu(x_1) \varepsilon_1] = 0$$

Откуда после преобразования получаем

$$\varepsilon_2 - \varepsilon_1 \left[1 + \frac{\alpha_T c h}{2(2 - \alpha_T) \eta} + \frac{h^2}{2\eta} \mu(x_1) \right] + \frac{h^2}{2\eta} q_S(x_1) + q_{ST} \frac{h}{\eta} = 0, \quad (4.13)$$

где α_T – коэффициент звукопоглощения на торце помещения; q_{ST} – поток отражений прямого звука от торцевой поверхности.

В случае, когда величина η , переменная в формуле (4.13) следует принимать $\eta_{1\pm 1/2} = \eta(x_{1\pm 1/2})$.

Аналогично записывается разностная аппроксимация для объема при $x=L$

$$\varepsilon_{N-1} - \varepsilon_N \left[1 + \frac{\alpha_T c h}{2(2 - \alpha_T) \eta} + \frac{h^2}{2\eta} \mu(x_N) \right] + \frac{h^2}{2} q(x_N) + q_{ST} \frac{h}{\eta} = 0. \quad (4.14)$$

При переменном η на торце принимается $\eta_{n-1/2} = \eta(x_{n-1/2})$.

Если помещение представляется трехмерным, весь объем можно разбить на элементарные параллелепипеды со сторонами Δx , Δy , Δz . В этом случае в общем виде для каждого i -го элементарного объема баланс отраженной энергии с учетом поглощения звука в воздухе может быть записан как

$$\sum_{j=1}^N (q_{ji} - q_{ij}) S_{ij} + \sum_{k=1}^{6-N} (q(w)_{ik} - q(\alpha)_{ik}) S_{ik} - c m_6 \varepsilon_i V_i = 0, \quad (4.15)$$

где q_{ji} и q_{ij} – потоки энергии, приходящие из j -го объема в i -й, и, наоборот, уходящие из i -го в j -й через поверхность S_{ij} ; $q(w)_{ik}$ и $q(\alpha)_{ik}$ – потоки энергии, соответственно, вводимой в i -й объем после первых отражений прямого звука и поглощаемой на k -й поверхности i -го объема, являющейся поверхностью ограждения помещения с площадью S_{ik} ; N – количество j -х объемов, контактирующих с i -м объемом; $6-N$ – количество граней i -го объема, являющихся поверхностями ограждений помещения; $V_i = \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$ – объем i -го элементарного параллелепипеда; ε_i – плотность отраженной звуковой энергии в i -м объеме.

Потоки энергии q_{ij} и q_{ji} определяются как

$$q_{ij} = \eta_{ij} (\varepsilon_i - \varepsilon_j) / h_{ij}; \quad q_{ji} = \eta_{ji} (\varepsilon_j - \varepsilon_i) / h_{ij}, \quad (4.16)$$

где h_{ij} – шаг сетки в направлении j -го объема.

Величины потоков $q(w)_{ik}$ и $q(\alpha)_{ik}$ определяются по формулам

$$q(w)_{ik} = \frac{P(1 - \alpha_k) \cos \theta_{ki}}{\Omega \cdot r_{ki}^2}; \quad (4.17)$$

$$q(\alpha)_{ik} = \frac{\alpha_{ki} \cdot c \varepsilon_i}{2(2 - \alpha_{ki})}, \quad (4.18)$$

где α_{ki} – коэффициент k -ой поверхности i -го объема; r_{ki} – расстояние от источника шума до центра k -ой поверхности i -го объема; θ_{ki} – угол между падающим звуковым лучем и k -ой поверхностью.

Следует отметить, что поступление энергии $q(w)$ происходит в первые от поверхности элементарные объемы, и, следовательно, для внутренних объемов, не соприкасающихся с поверхностями помещения, баланс отраженной энергии определяется как

$$\sum_{j=1}^6 (q_{ij} - q_{ji}) S_{ij} - c m_6 \varepsilon_i V_i = 0. \quad (4.19)$$

Метод баланса можно применять для оценки распределения отраженной энергии в системах акустически связанных помещений [1,45].

В этом случае, если соседние элементарные объемы принадлежат разным помещениям, а связь в этом месте осуществляется через открытые проемы, потоки энергии могут быть найдены по формулам

$$q_{ij} = (\eta_i \varepsilon_i - \eta_j \varepsilon_j) / h_{ij}; \quad q_{ji} = (\eta_j \varepsilon_j - \eta_i \varepsilon_i) / h_{ij}, \quad (4.20)$$

где η_i и η_j – коэффициенты переноса отраженной энергии в помещениях, к которым принадлежат i -й и j -й объемы.

При определении значений η_i и η_j должны соответственно использоваться средние длины свободного пробега отраженных звуковых волн разных помещений, то есть $l_{срi}$ и $l_{срj}$.

При наличии между элементарными объемами соседних помещений звукоизолирующей конструкции потоки находятся как

$$q_{ij} = \frac{\tau_{ij} c \varepsilon_i}{2(2 - \alpha_i)}; \quad q_{ji} = \frac{\tau_{ji} c \varepsilon_j}{2(2 - \alpha_j)}, \quad (4.21)$$

где τ_{ij} – коэффициент звукопроницаемости конструкции на участке между i -м и j -м объемами; α_i и α_j – коэффициенты звукопоглощения конструкции соответственно со стороны i -го и j -го объемов.

В случае необходимости учета прямой энергии, проходящей через конструкцию в соседний объем, поток проникающей прямой энергии может быть найден по формуле

$$q(w)_j = P \tau_{ij} \cos \theta_{ij} / (\Omega r_j^2), \quad (4.22)$$

где r_j – расстояние от источника шума до звукоизолирующей конструкции на участке j -го элементарного объема.

При этом предполагается, что прошедшая энергия диффузно рассеивается в ближней к звукоизолирующей конструкции зоне помещения, то есть в первом за конструкцией слое элементарных объемов.

4.2. Расчет стационарных шумовых полей численным методом

Общее распределение плотности отраженной энергии в системе акустически связанных помещений находится из решения полученной системы алгебраических уравнений. При этом полные значения плотности звуковой энергии в любом i -ом элементарном объеме помещения с источником шума определяются по принципу суперпозиции

$$\varepsilon_{полi} = \varepsilon_{отрi} + \varepsilon_{прi}.$$

Здесь $\varepsilon_{прi}$ – плотность звуковой энергии в i -ом объеме, обусловленная прямым звуком; $\varepsilon_{отрi}$ – плотность отраженной энергии в i -м объеме, определяемая по результатам решения системы уравнений.

Значения суммарных уровней шума находятся как

$$L_i = 10 \lg(\varepsilon_{полi} \cdot c / I_0). \quad (4.23)$$

В помещениях без источника шума уровни вычисляются по формуле

$$L_i = 10 \lg(\varepsilon_{\text{отр}} \cdot c / I_0) . \quad (4.24)$$

Рассмотренный интегро-интерполяционный метод позволяет решать задачи о распределении отраженной звуковой энергии в помещениях не только простой, но и сложной формы, а также получать распределение энергии в системах акустически связанных производственных помещений.

Получаемые при решении системы разностных уравнений значения плотности отраженной звуковой энергии во всех элементарных объемах помещения позволяют производить построение шумовых карт, а также оценивать эффективность применения звукоизолирующих и звукопоглощающих конструкций в системах акустически связанных помещений.

Для обеспечения точности, достаточной при решении указанных выше задач, необходимо иметь пространственную сетку с большим количеством элементарных объемов. Как показали выполненные нами исследования, для производственных зданий требуемая точность обеспечивается при разбиении помещения на элементарные ячейки с объемом, равным 1 м^3 . Это требует решения системы из 1000 и более разностных уравнений. При таких условиях важное значение приобретает выбор метода решения системы линейных уравнений. Метод должен быть приспособлен к применению в современных ЭВМ и при минимуме затрат времени обеспечивать приемлемую точность.

Современные методы решения линейных систем $Ax = b$ условно делятся на точные и приближенные. К точным методам можно отнести метод Гаусса, а к приближенным - широко используемые при расчетах на ЭВМ методы простой итерации и метод Зейделя.

Одним из лучших методов решения систем линейных алгебраических уравнений общего вида является метод последовательного исключения Гаусса с выбором главного элемента [39]. Однако у него есть существенный недостаток, связанный с тем, что расчет по формулам данного метода требует примерно N^3 арифметических операций, и, следовательно, при достаточно больших N потребуются значительные затраты машинного времени. При использовании данного метода возникают также проблемы с хранением в памяти ЭВМ промежуточной информации.

Более приспособленными для реализации на ЭВМ являются методы простой итерации [21]. Достоинством их является меньшее чем в методе Гаусса количество арифметических действий. Методы становятся особенно выгодными при решении систем, у которых значительное число коэффициентов равно нулю. Такие системы появляются при решении уравнений в частных производных, и в частности, в данном случае эллиптического уравнения, описывающего распределения плотности отраженной звуковой энергии.

Процесс итераций приводит к выполнению однообразных операций и сравнительно легко программируется на ЭВМ. Действительно, при начальных приближениях x_{i0} ($i = 1, 2, \dots, N$) вычисляются последовательно приближения по формуле простых итераций [40]

$$x_{i(j+1)} = x_{i(j)} - \frac{1}{d_{ij}} \left(\sum_{k=1}^n a_{ik} x_{k(j)} - b_i \right) \quad (4.25)$$

до тех пор, пока $x_{i(j+1)} - x_{i(j)} > \xi$, где (j) – номер итерации, ξ – заданная погрешность вычислений. Итерационный процесс сходится при условии, если величина модуля каждого диагонального элемента матрицы A больше суммы модулей всех остальных элементов.

Наиболее удобным при программировании является модификация метода простой итерации в виде метода Зейделя. В этом случае итерационный процесс подобен описанному для метода простых итераций, однако уточненные значения $x_{i(j+1)}$ сразу подставляются в последующие уравнения. Формула итерационного процесса имеет вид [40]

$$x_{i(j+1)} = x_{i(j)} - \frac{1}{d_{ij}} \left(\sum_{k=1}^{i-1} a_{ik} x_{k(j+1)} + \sum_{k=1}^N a_{ik} x_{k(j)} - b_i \right) . \quad (4.26)$$

Условия сходимости остаются теми же, что и в методе простых итераций. Достоинством его является необходимость хранения в памяти минимального количества необходимой информации. При этом метод Зейделя в большинстве случаев имеет лучшую сходимость, чем метод простой итерации.

Основываясь на изложенном, нами разработана компьютерная программа расчета уровней звукового давления стационарных шумовых полей помещений с использованием интегро-интерполяционного метода. В программе реализация системы линейных уравнений выполняется методом Зейделя. Программа позволяет производить расчеты в помещениях сложных форм, для которых не применимы рассмотренные выше аналитические методы реализации статистической энергетической модели шумового поля.

Если при расчетах необходимо использовать переменные по объему помещения коэффициенты $\eta(x, y, z)$, их вычисление можно производить с помощью программы, описанной в параграфе 2.5. Ее возможно включать в качестве независимого модуля в основную расчетную программу. Однако следует отметить, что для большинства практически важных случаев при расчетах с достаточной точностью можно использовать постоянные коэффициенты, определяемые по формуле (2.11).

Оценка точности метода произведена при сравнительном анализе расчетных и экспериментальных данных, выполненном в помещениях различных объемно-планировочных параметров. Сравнение расчетов и эксперимента выполнено на двух группах производственных помещений.

На первом этапе оценки ставилась задача выявления соответствия данных расчетного метода действительному распределению звуковой энергии в помещениях простой формы. Исследования произведены в группе натуральных производственных помещений, форма которых близка к прямоугольному параллелепипеду. Количество оборудования, находящегося в помещениях, было незначительным и не имело существенного влияния на формирование звуковых полей. Акустические характеристики для всех ограждающих поверхностей были примерно одинаковыми. Коэффициенты звукопоглощения определялись по результатам измерения времени реверберации, а также принимались по данным для соответствующих производственных помещений [7].

Установлено, что расчетный метод дает хорошую сходимость результатов с данными эксперимента. На рис.4.2. и 4.3 в качестве примера приведены данные расчетов для двух помещений этой группы.

Помещение на рис.4.2 соответствует характерной группе подсобных помещений предприятий. Стены помещения в нижней части окрашены масляной краской, потолок и верхняя часть стен оштукатурены. Штриховыми линиями на рис.4.2 обозначены доверительные интервалы статистической энергетической модели (см. главу 2).

Помещение, приведенное на рис.4.3, представляло собой строящийся цех размерами 72×36×6 м. Оборудование в цехе отсутствовало. Средний коэффициент звукопоглощения поверхностей на частотах 4000 и 1000 Гц составлял 0,1. Видно, что расхождение результатов не превышает величину порядка 3 дБ на значительном удалении от источника возбуждения.

В процессе второго этапа исследовалось распределение энергии в производственных помещениях сложной геометрической формы и в акустически связанных помещениях, а также в помещениях с большим количеством оборудования. Наличие таких помещений характерно для целого ряда производств, в частности, для железнодорожного транспорта, химических предприятий и др. Необходимо было выяснить возможность использования численного метода для анализа шума в подобных условиях.

На рис.4.4. даны результаты исследования распределения шума в помещении, представляющем собой коридор, на одной стороне которого располагалась небольшая рекреация, а на второй стороне – рекреация, акустически связанная большим проемом с соседним помещением. Видно, что хорошее совпадение результатов наблюдается не только вблизи источника, но и на значительном удалении от него в связанном помещении. На границе перехода из основного помещения с источником шума в связанное получено значительное увеличение спадов уровней звукового давления как в случае натуральных измерений, так и при расчете. Наиболее заметно спад возрастает при увеличении звукопоглощения вторичного помещения.

Подобное исследование выполнено также на одном из предприятий железнодорожного транспорта. Объект исследования представлял собой систему акустически связанных достаточно большими проемами помещений. Источник шума располагался на месте наиболее шумного оборудования. Расположения источника и линии измерения даны на схеме объекта (рис. 4.5). При сравнении расчетных данных с натурными измерениями установлено хорошее согласование результатов. В качестве примера на рис.4.5 приведены данные исследований в октавной полосе с частотой 1000 Гц для двух линий измерения. Видно, что наибольшее расхождение результатов в удаленных точках не превышает величин порядка 4 дБ.