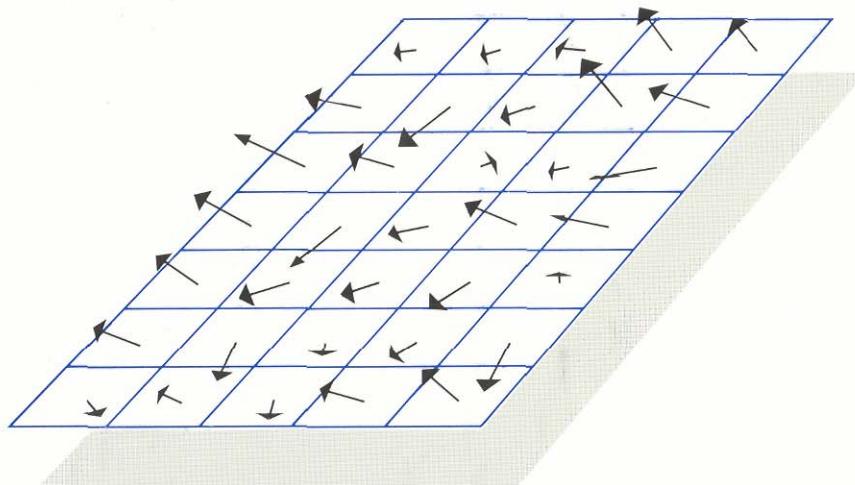


Интенсивность звука



Настоящая брошюра имеет целью ознакомить читателя с основами акустической интенсивиметрии. К излагаемому материалу относится как основная теория, так и практическое применение акустической интенсивиметрии. Хотя данная брошюра является введением в упомянутую область акустики, при изложении материала предполагается, что читатель ознакомлен с принципами измерений звукового давления. В противном случае настоятельно рекомендуется обратиться к изданной фирмой Брюль и Кьер брошюре «Измерение звука».

	Стр.		Стр.
Введение	3	Усреднение по пространству	17
Звуковое давление и звуковая мощность	4	Фоновые шумы	19
Понятие интенсивности звука	5	Классификация источников звука	20
Причины и цели измерений интенсивности звука	6	Графическое представление распределения интенсивности звука	21
Звуковые поля	7	Применение в области строительной акустики	24
Звуковое давление и колебательная скорость частиц	10	Интенсивметрическая аппаратура	25
Методы определения интенсивности звука	11	Методы интенсивметрических измерений	26
Интенсивметрический зонд	13	Другие применения и специальные темы	29
Опорные значения и уровни	14	Практические примеры	32
Примеры	15	Приложение: ограничения интенсивметрических методов	36
Применение интенсивности звука при определении звуковой мощности	16	Дополнительная литература	42

Август 1989 г.

Введение

Акустическая измерительная техника и теория акустики не всегда развивались равными темпами. Опубликованная лордом Рэлеем основополагающая научная работа «Теория звука» стала основой современной акустики. Фундаментальной величиной этой акустической теории была *интенсивность звука*. Однако, до разработки применимого на практике интенсивметрического метода прошло сто лет.

Развитие электроники в начале двадцатого века медленно привело акустическую измерительную технику на уровень теории акустики. К основным достижениям можно отнести усилитель на триоде, созданный Л. де Форестом в 1906 г., и первый конденсаторный микрофон, сконструированный Е. Ц. Вентем в 1915 г. Устройство, патентованное Х. Ф. Олсоном в 1932 г., способствовало измерениям интенсивности звука, но допускало применение лишь в идеальных условиях. Несмотря на несколько других более или менее не-

удачных конструкций, допускающей применение на практике интенсивметрической аппаратуры создать не удалось.

Началом эры более широкого практического применения акустической интенсивметрии можно считать конец 70-х годов, когда Ф. И. Фахи и И. Ы. Чунг независимо друг от друга, но почти одновременно в 1977 г. использовали методы цифровой обработки сигналов в связи с акустической теорией. Прогресс в области разработки и производства микрофонов открыл возможности надежных интенсивметрических измерений с помощью двух разнесенных на малое расстояние микрофонов-приемников звукового давления.

Упомянутый метод акустической интенсивметрии нашел широкое применение уже в течение относительно короткого времени с его внедрения. Этот метод эффективен как для теоретических акустиков, так и для инженеров и техников.

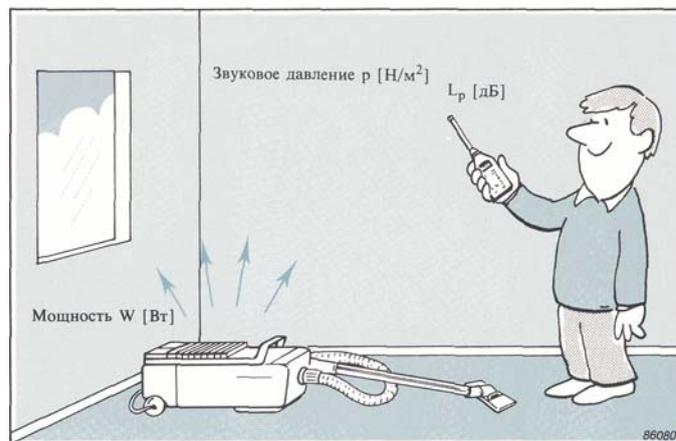
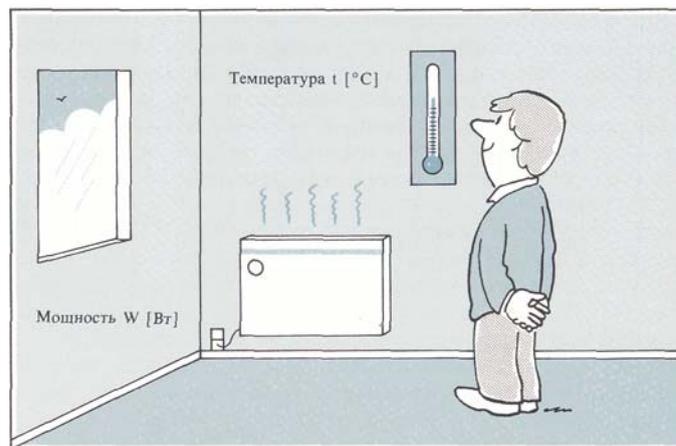


Звуковое давление и звуковая мощность

Источник звука излучает звуковую мощность, причем характерной величиной соответствующего звукового поля является звуковое давление. Таким образом, звуковая мощность представляет собой причину, а звуковое давление является последствием. Аналогичным образом связаны друг с другом тепло и теплота. Электрический радиатор излучает тепло в помещении, в результате чего увеличивается температура в этом помещении. Следовательно, температура является величиной, при помощи которой можно описать ощущение тепла или холода. Разумеется, что температура среды в помещении также зависит от параметров этого помещения, степени теплоизоляции, присутствия других источников тепла и др. Однако, количество излучаемого электрическим радиатором тепла на единицу электрической энергии вообще не зависит от окружающей среды и ее параметров. Звуковая мощность и звуковое давление связаны друг с другом аналогичным образом. Слух человека воспринимает звуковое давление, но причиной этого восприятия является звуковая мощность, излучаемая источником звука.

Слишком большое звуковое давление может быть причиной повреждения слуха человека. Следовательно, при оценке субъективных эффектов звука или шума, например, меры его раздражимости или опасности для слуха, необходимо учитывать звуковое давление. Измерения звукового давления относительно просты. Изменения давления, воздействующие на барабанную перепонку и воспринимаемые как звук, идентичны изменениям давления, воспринимаемым мембраной конденсаторного микрофона звукоизмерительного прибора.

Звуковое давление, воспринимаемое слухом или измеряемое при помощи снабженной микрофоном аппаратуры, зависит от расстояния, на котором находится источник звука, и от акустических условий окружающей среды (параметров *звукового поля*), в которой распространяются звуковые волны. Звуковое поле в закрытом пространстве зависит от размеров этого пространства (например, помещения) и от параметров звукопоглощения ограничивающих это пространство поверхностей (например, стен, перегородок и т.п.). Следовательно, на основе результатов измерений звукового давления нельзя всегда однозначно определить количество излучаемого источником (например, машиной) звука или шума. С соответствующей целью необходимо определить звуковую мощность, излучаемую исследуемым источником, так как именно эта величина не зависит (или зависит лишь мало) от акустических параметров окружающей среды и поэтому является уникальным дескриптором шумности источника звука.



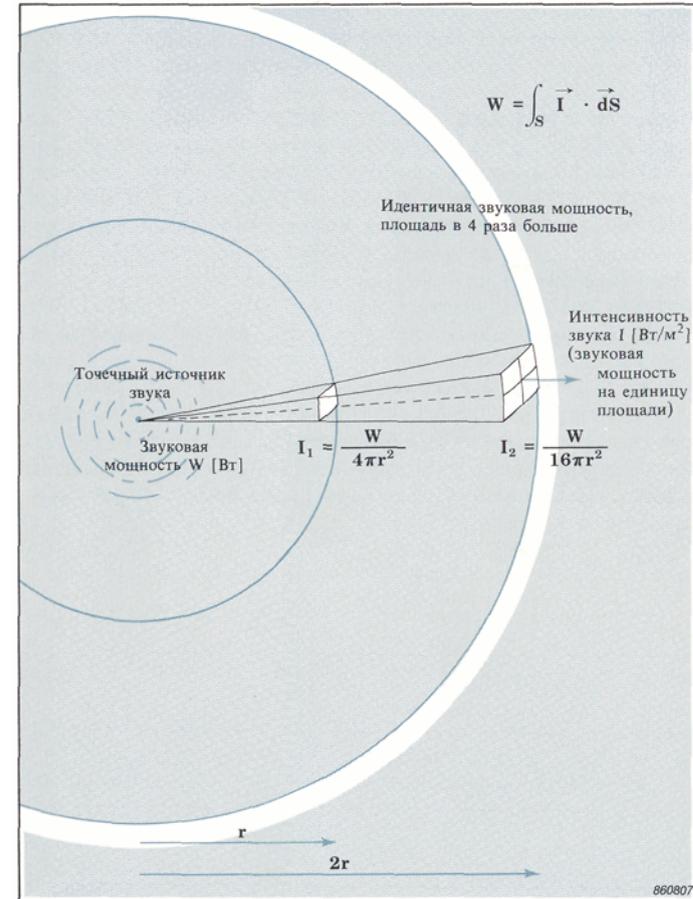
Понятие интенсивности звука

Всякого рода машинное и другое оборудование, создающее механические колебания, излучает звуковую энергию. *Звуковая мощность* является мерой скорости излучения звуковой энергии, т.е. отнесенной к единице времени звуковой энергией. *Интенсивность звука* отображает скорость потока звуковой энергии в определенной точке звукового поля, т.е. проходящую через единичную площадь звуковую мощность. Международная система единиц (СИ) определяет равную 1 м² единицу площади. Следовательно, единицей интенсивности звука в СИ является Вт/м² (ватт на квадратный метр).

Интенсивность звука также отображает направление потока звуковой энергии в соответствующей точке звукового поля. Следовательно, интенсивность звука является *векторной* величиной, характеризуемой абсолютным значением и направлением. С другой стороны, звуковое давление представляет собой *скалярную* величину, совершенно определяемую абсолютным значением. Интенсивность звука обычно измеряется в направлении *нормали* (угол 90°) к определенной единичной площади, через которую проходит поток звуковой энергии.

Нужно подчеркнуть, что интенсивность звука является средним по времени скорости потока звуковой энергии через единичную площадь. В некоторых случаях звуковая энергия перемещается вперед и назад. Такой поток энергии вообще не влияет на измеряемую интенсивность звука. В отсутствии отличающегося от нуля суммарного потока звуковой энергии в определенном направлении соответствующая этому направлению интенсивность звука равна нулю.

На приложенном рисунке показан источник, излучающий звуковую энергию. Вся излучаемая источником звуковая энергия должна проходить через поверхность, окружающую источник звука. Так как интенсивность звука является отнесенной к единичной площади звуковой мощностью, на практике нетрудно измерить *среднюю по пространству* интенсивность звука на поверхности, окружающей источник звука, и затем путем умножения результата на площадь этой поверхности определить излучаемую упомянутым источником звуковую мощность. Нужно подчеркнуть, что в свободном звуковом поле как интенсивность звука, так и звуковое давление следуют закону обратных квадратов. Это видно на приложенном рисунке, где площадь поверхности, окружающей источник звука на расстоянии 2 r, в 4 раза больше площади поверхности, окружающей этот источник на расстоянии r. Однако, излучаемая источником звуковая мощность не изменяется с расстоянием и поэтому интенсивность звука (отношение звуковой мощности к площади) должна уменьшаться с увеличением расстояния от источника звука.



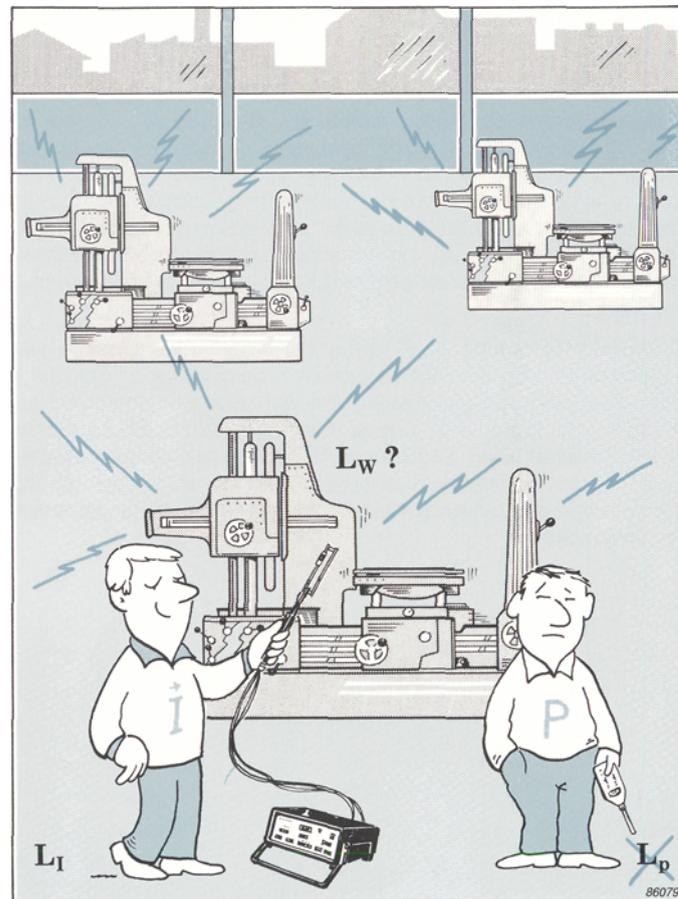
Причины и цели измерений интенсивности звука

На основе результатов измерений звукового давления в цехе можно сделать заключения о том, если для работников в этом цехе существует опасность повреждения слуха. В случае, если установлено присутствие такой опасности, обычно необходимо принять меры по снижению шума. Однако, при решении соответствующей задачи нужно количественно оценить шум, излучаемый отдельными машинами. Поэтому необходимо определить излучаемую отдельными машинами звуковую мощность и затем осуществить классификацию этих машин. После выявления самой шумной машины можно принять меры по снижению ее шума. При этом часто целесообразно выявить и отыскать локализацию отдельных узлов и деталей, излучающих шум.

При решении всех перечисленных выше задач эффективна акустическая интенсивметрия. Раньше было можно измерять лишь звуковое давление, к невыгодам которого относится его зависимость от окружающих условий. Звуковую мощность можно определить только на основе результатов измерений звукового давления, проведенных в точно определенных условиях, в которых выполнены заранее установленные предположения о параметрах звукового поля. Такие условия обеспечены лишь в специальных акустических камерах или помещениях, например, в безэховой или реверберационной камере. Традиционные методы определения звуковой мощности основаны на предположении того, что исследуемый источник звука или шума находится именно в такой специальной акустической камере.

Интенсивность звука можно измерять в любом звуковом поле, причем вообще не нужны любого рода предположения. Следовательно, имеется возможность измерять интенсивность звука непосредственно на месте эксплуатации исследуемого источника звука, например, машинного оборудования. Кроме того, измерения присущей отдельным машинам, узлам и деталям интенсивности звука можно проводить даже в присутствии других источников, излучающих звук или шум. Эта возможность дана тем, что стационарный фоновый шум вообще не сказывается на звуковой мощности, определяемой на основе результатов измерений интенсивности звука.

Поскольку интенсивность звука содержит информацию как о величине, так и о направлении, она весьма эффективна при выявлении, идентификации и определении локализации источников звука или шума. Следовательно, акустическая интенсивметрия дает возможность исследований распределения и потоков звуковой энергии в полях излучения сложного машинного оборудования непосредственно на месте его эксплуатации.

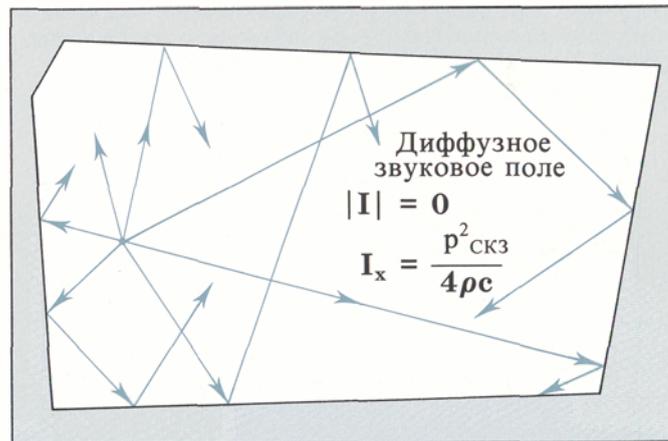


Звуковые поля

Звуковым полем называется пространство, в котором находятся звуковые волны. При классификации звуковых полей учитываются способ и условия распространения звуковых волн. Ниже описываются некоторые звуковые поля и присущие им отношения между звуковым давлением и интенсивностью звука. Нужно подчеркнуть, что эти отношения точно математически определены **только** в описываемых ниже специальных звуковых полях, т.е. в свободном и диффузном полях.

Свободное звуковое поле

Свободным звуковым полем называется поле, в котором звуковые волны распространяются в идеализированном свободном пространстве без всякого рода отражений. Такие условия встречаются на открытом воздухе (на достаточном расстоянии от поверхности земли) и в безэховых (заглушенных) камерах и помещениях, где падающие на стены звуковые волны совершенно поглощаются. Характерным для распространяющихся в свободном поле звуковых волн является понижение уровня звукового давления и интенсивности звука на 6 дБ при двукратном увеличении расстояния (в направлении распространения звуковой волны) от источника звука. По существу, это свойство соответствует закону обратных квадратов. В свободном звуковом поле математически определено отношение между звуковым давлением и интенсивностью звука (точнее, между амплитудами этих акустических величин). Это математическое отношение дает возможность определения звуковой мощности, излучаемой источником звука в свободном поле. Соответствующий метод описан в рекомендации ИСО 3745.



Диффузное звуковое поле

Характерными для диффузного звукового поля являются многократные отражения звуковых волн, в результате которых эти волны распространяются во всех направлениях с идентичными амплитудой и вероятностью. Аппроксимацией диффузного звукового поля являются поля в реверберационных камерах и помещениях. Хотя суммарная интенсивность звука в диффузном звуковом поле равна нулю, имеется теоретическое отношение, связывающее звуковое давление с *односторонней интенсивностью звука* (I_x). Односторонняя интенсивность звука является интенсивностью звука в одном направлении при пренебрежении идентичной составляющей в противоположном направлении. Одностороннюю интенсивность звука нельзя измерять с помощью стандартной интенсивметрической аппаратуры. Однако, эта величина полезна, так как на основе результатов измерений звукового давления и односторонней интенсивности звука можно определить звуковую мощность, излучаемую соответствующим источником в диффузном звуковом поле. Соответствующий метод описан в рекомендации ИСО 3741.

Активное и реактивное звуковые поля

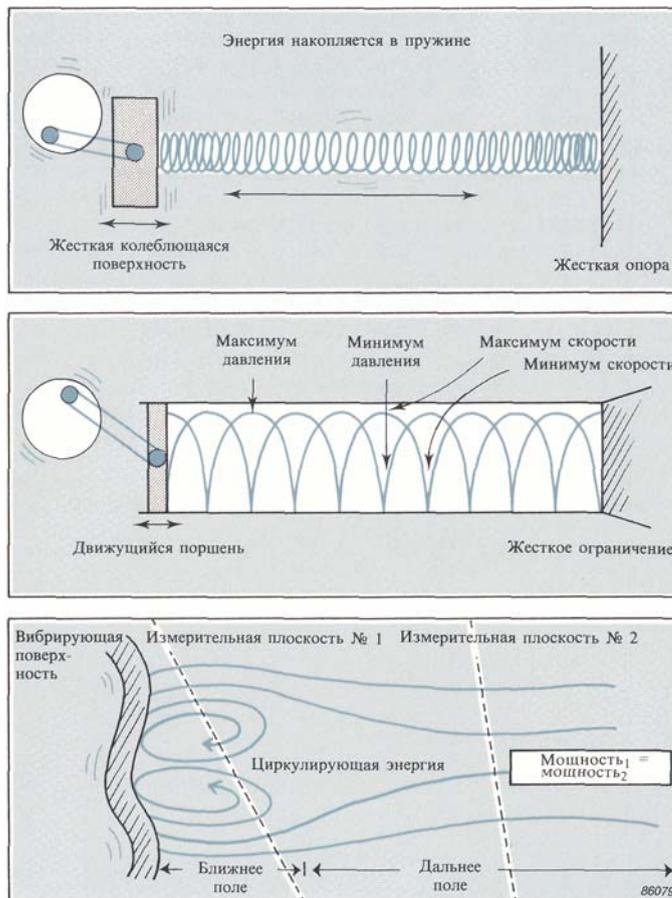
Распространение звуковых волн всегда связано с потоком звуковой энергии. Однако, отсутствие распространения звуковых волн не исключает присутствие звукового давления. Характерным для *активного* звукового поля является поток звуковой энергии. Наоборот, в чисто *реактивном* звуковом поле отсутствует поток звуковой энергии. Поток энергии может быть в любой момент времени направлен от источника звука, но излученная энергия всегда возвратится по истечении определенного времени. Звуковая энергия накапливается аналогично накоплению механической энергии в пружине. Следовательно, суммарная интенсивность звука равна нулю. В общем, любое звуковое поле имеет активную и реактивную составляющие. Результаты измерений звукового давления в реактивном звуковом поле могут быть ненадежными, так как реактивная составляющая звукового поля вообще не связана с излучаемой источником звуковой мощностью. Однако, даже в таких условиях можно с высокой надежностью измерять интенсивность звука. Так как интенсивность звука связана с *потоком* звуковой энергии, реактивная составляющая звукового поля вообще не сказывается на результатах интенсивметрических измерений. Ниже описываются два примера реактивных звуковых полей, встречающихся на практике.

Поле стоячих волн в канале

Предположим, что на одном конце канала установлен поршень, движения которого сопровождаются колебаниями воздуха в канале. Канал на другом конце закрыт материалом, отражающим волны давления. В результате сложения волн, распространяющихся в обоих направлениях, получают зоны максимального и минимального давления, расположенные через определенные расстояния вдоль канала. В случае, если канал закрыт совершенно жестким материалом, то вся энергия отражается и суммарная интенсивность равна нулю. Наоборот, если используемый материал поглощает энергию, то значение суммарной интенсивности отличается от нуля. Отметим, что стоячие звуковые волны встречаются не только в каналах, трубах и т.п., а также в помещениях (в области низких частот).

Ближнее поле источника звука

На очень малых расстояниях от источника звука воздух действует как пружино-массовая система, накапливающая энергию. Звуковая энергия циркулирует, а не распространяется. Область, в которой происходит циркуляция звуковой энергии, называется ближним полем источника звука. В этой области нельзя измерять звуковое давление, а звуковую мощность можно определять только на основе результатов измерений интенсивности звука. К преимуществам интенсивметрических измерений в ближнем поле относится большое отношение сигнала к шуму, связанное с малым расстоянием от источника звука.



Звуковое давление и колебательная скорость частиц

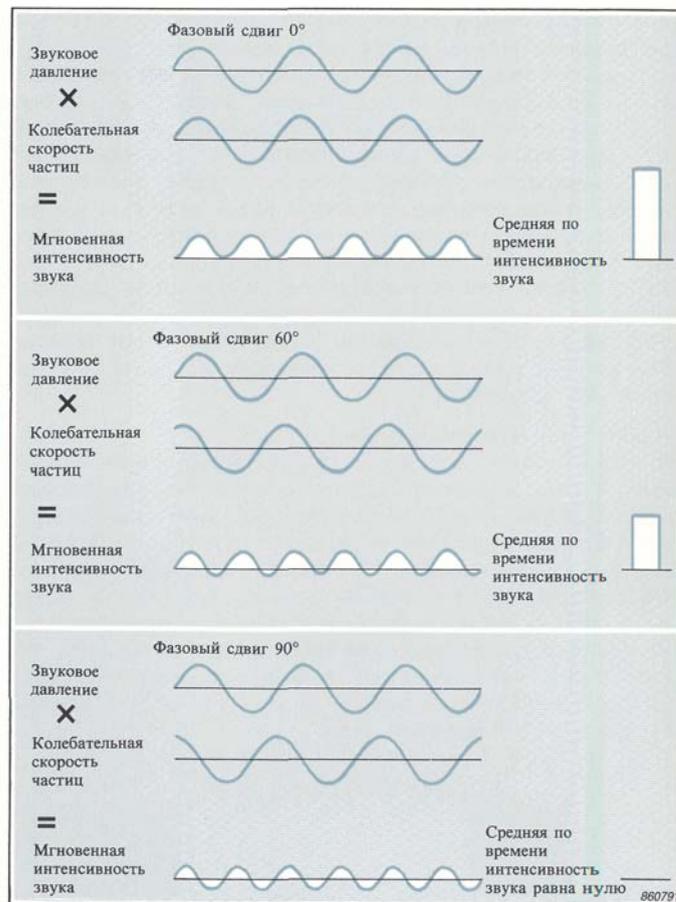
Перемещение частицы воздуха из нейтрального среднего положения сопровождается временным увеличением давления. Увеличившееся давление стремится вернуть частицу в ее исходное положение и передать возмущение соседней частице. Поочередные увеличения и уменьшения давления (сжатия и разрежения воздуха) распространяются в среде в виде звуковой волны. Характерными для соответствующего процесса являются два параметра, т.е. давление (местные увеличения и уменьшения по отношению к статическому давлению среды) и колебательная скорость частиц, которые совершают колебательные движения по отношению к фиксированным исходным положениям. Интенсивность звука является произведением звукового давления на колебательную скорость частиц. Приведенные ниже выражения показывают, что интенсивность звука также является звуковой мощностью, отнесенной к единичной площади, и, следовательно, подтверждают описанное раньше определение интенсивности звука.

В активном звуковом поле происходят одновременные изменения звукового давления и колебательной скорости частиц. Максимумы звукового давления

$$\begin{aligned} \text{Интенсивность} &= \text{давление} \times \text{колебательная скорость частиц} \\ &= \frac{\text{сила}}{\text{площадь}} \times \frac{\text{расстояние}}{\text{время}} = \frac{\text{энергия}}{\text{площадь} \times \text{время}} = \frac{\text{мощность}}{\text{площадь}} \end{aligned}$$

совпадают с максимумами колебательной скорости частиц. Следовательно, звуковое давление и колебательная скорость частиц находятся в *фазе* друг с другом и в результате их перемножения является суммарная интенсивность звука. В реактивном звуковом поле звуковое давление и колебательная скорость частиц *сдвинуты по фазе* на 90° (на четверть длины волны) друг относительно друга. Результатом умножения звукового давления на колебательную скорость частиц в данном случае является *мгновенная* интенсивность звука, величина которой изменяется вокруг нуля по синусоидальному закону. Следовательно, *усредненная по времени* интенсивность звука равна нулю.

В диффузном звуковом поле происходят случайные изменения фазовых углов звукового давления и колебательной скорости частиц. Следовательно, суммарная интенсивность звука равна нулю.



Методы определения интенсивности звука

Уравнение Эйлера: определение колебательной скорости частиц

Интенсивность звука является усредненным по времени произведением звукового давления и колебательной скорости частиц. Измерения звукового давления весьма просты и соответствующая аппаратура содержит лишь один микрофон. Наоборот, измерения колебательной скорости частиц относительно сложны. Колебательная скорость частиц связана линеаризованным уравнением Эйлера с *градиентом звукового давления* (т.е. с темпом изменений звукового давления с расстоянием). Градиент звукового давления можно измерять с помощью аппаратуры, снабженной двумя микрофонами на малом взаимном расстоянии. Подстановкой результатов таких измерений и решением упомянутого уравнения Эйлера можно определить колебательную скорость частиц.

По существу, уравнение Эйлера является вторым законом Ньютона, используемым в газовой среде. Второй закон Ньютона связывает ускорение массы с действующей на нее силой. На основе известных силы и массы можно математическим путем определить ускорение. Интегрирование ускорения по времени дает скорость.

В уравнении Эйлера *градиент давления* является причиной ускорения газовой среды плотностью ρ . На основе известных градиента давления и плотности среды можно определить ускорение. Скорость получается путем интегрирования ускорения по времени.



Сэр Айзек Ньютон

$$F = ma$$

$$a = \frac{F}{m}$$

$$v = \int \frac{F}{m} dt$$



Леонард Эйлер

$$a = - \frac{1}{\rho} \text{grad } p$$

В одном направлении

$$\frac{\partial u}{\partial t} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r}$$

$$u = - \int \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} dt$$

860809

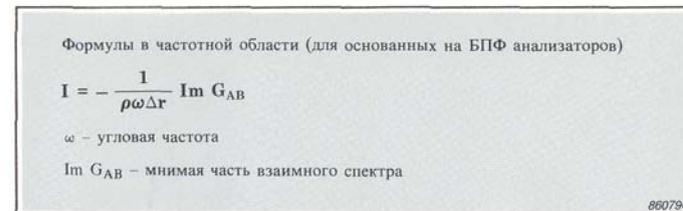
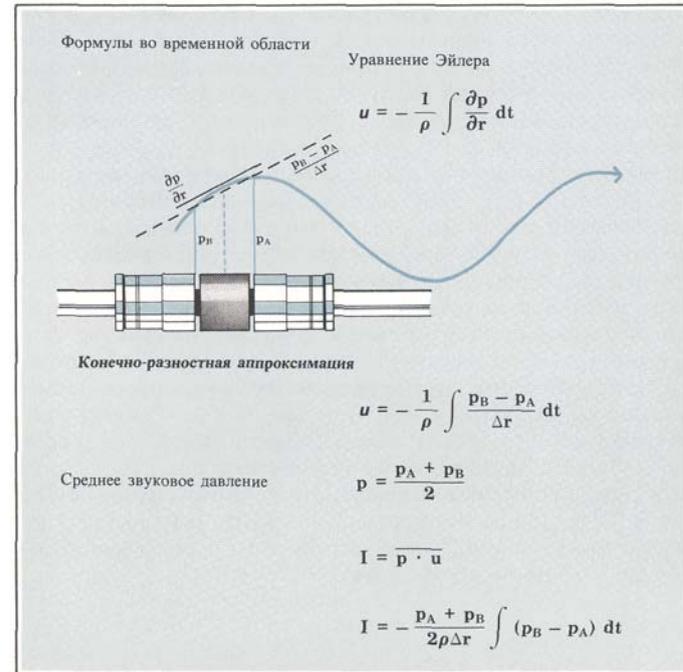
Конечно-разностная аппроксимация

Градиент звукового давления является непрерывной функцией, т.е. функцией, изменяющейся плавно, без скачков и т.д. При помощи зонда с двумя микрофонами, разнесенными на малое расстояние, можно получить кусочно-линейную аппроксимацию соответствующей градиенту давления функции. Используемый метод заключается в измерении двух значений звукового давления, определении разности и делении последней на расстояние между микрофонами зонда. Такая аппроксимация называется конечно-разностной аппроксимацией. Описанный метод в графическом представлении аналогичен построению касательной к кругу путем ее аппроксимации прямой, проходящей через две точки соответствующей окружности.

Определение интенсивности звука

Путем интегрирования градиента звукового давления получается колебательная скорость частиц. При оценке колебательной скорости частиц учитывается точка, совпадающая с акустическим центром двухмикрофонного интенсиметрического зонда и находящаяся между входящими в состав последнего микрофонами. Эта точка также учитывается при определении приближенного значения звукового давления, т.е. среднего значения воспринимаемого обоими микрофонами зонда звукового давления. Путем умножения мгновенных значений звукового давления на мгновенные значения колебательной скорости частиц получают мгновенные значения интенсивности звука. Результатом усреднения по времени мгновенных значений упомянутого произведения является искомая интенсивность звука.

Аппаратура для измерений и анализа интенсивности звука состоит из интенсиметрического зонда и анализатора. Оборудованный двумя микрофонами интенсиметрический зонд воспринимает звуковое давление и преобразует соответствующие акустические сигналы в эквивалентные электрические сигналы. Анализатор осуществляет нужную обработку этих сигналов, усреднение и вычисления, нужные для определения интенсивности звука. Математическое обоснование и учитываемые уравнения вообще не новы. Новым является применение современных методов обработки сигналов, допускающих решение упомянутых уравнений. Нужные в процессе обработки операции можно выполнять при помощи или электронных интеграторов и фильтров (аналоговых или цифровых), способствующих пошаговому решению определяющих уравнений, или современного анализатора, основанного на быстром преобразовании Фурье. Современные анализаторы определяют интенсивность звука на основе мнимой части взаимных спектров (математический термин) сигналов, отдаваемых микрофонами интенсиметрического зонда. Учитываемые формулы в обоих случаях эквивалентны друг другу и дают в конечном счете идентичный результат - интенсивность звука.

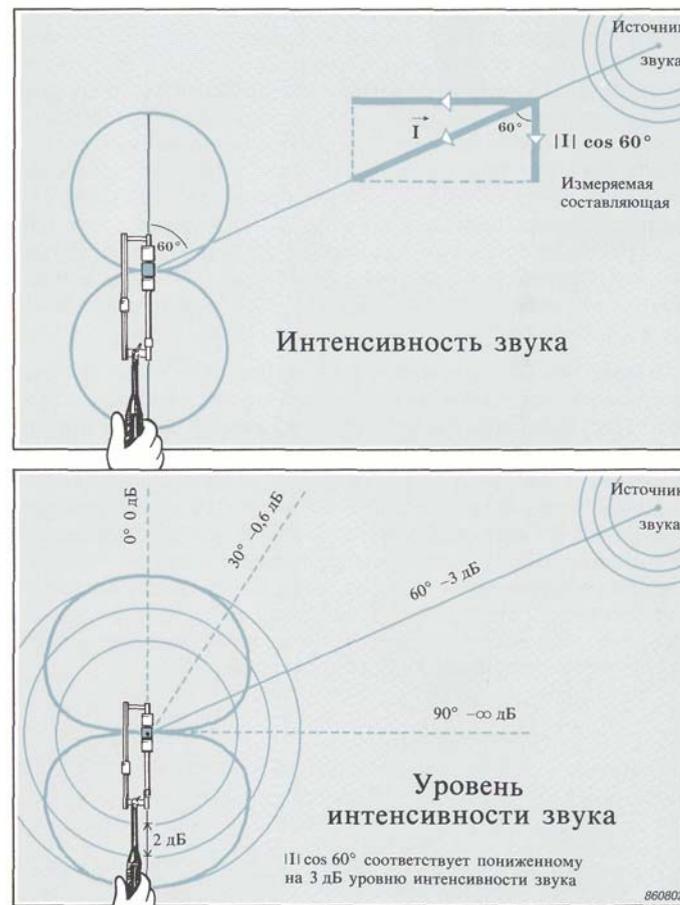


Интенсиметрический зонд

Интенсиметрические зонды фирмы Брюль и Кьер снабжены двумя микрофонами, установленными лицевыми сторонами друг против друга, и жесткой распорной деталью между микрофонами. Такая конфигурация в отношении частотной характеристики и характеристик направленности лучше конфигураций, в которых микрофоны расположены параллельно, установлены задними сторонами друг против друга или закреплены лицевыми сторонами друг против друга *без* распорной детали. Три распорные детали определяют эффективное расстояние между микрофонами интенсиметрических зондов фирмы Брюль и Кьер, т.е. расстояние 6, 12 или 50 мм. Применение определенной распорной детали зависит от диапазона частот, учитываемого при определении интенсивности звука. В области низких и средних частот используются полудюймовые микрофоны. Микрофоны диаметром 1/4 дюйма используются в области более высоких и высоких частот, так как меньшие размеры оптимальны с точки зрения уменьшения интерференции.

Характеристики направленности

Характеристика направленности интенсиметрической системы с двухмикрофонным зондом имеет в двумерном представлении вид цифры восемь. Эта характеристика называется косинусной характеристикой направленности и достигнута за счет конструкции и параметров интенсиметрического зонда и методов вычислений, осуществляемых анализатором. Так как звуковое давление является скалярной величиной, датчик давления должен обладать всенаправленной характеристикой, т.е. его чувствительность не должна зависеть от направления падающих звуковых волн. Наоборот, интенсивность звука является векторной величиной. При помощи двухмикрофонного интенсиметрического зонда нельзя измерять векторы интенсивности звука, а лишь составляющие последних, совпадающие с продольной осью зонда. По существу, комплектный вектор интенсивности звука имеет три составляющие, направленные перпендикулярно друг к другу. Эти составляющие со взаимными углами 90° по направлениям совпадают с направлениями осей пространственной системы координат. Звуковые волны, падающие под углом 90° относительно продольной оси интенсиметрического зонда, не создают составляющую в направлении этой оси, так как на оба микрофона воздействует идентичное звуковое давление. Следовательно, колебательная скорость частиц и интенсивность звука равны нулю. В случае звуковых волн, падающих под любым углом (θ) относительно продольной оси интенсиметрического зонда, составляющие интенсивности звука, совпадающие по направлению с упомянутой осью, имеют меньшие максимальных значения. Уменьшение обусловлено фактором $\cos \theta$, определяющим косинусную характеристику содержащей зонд интенсиметрической системы.

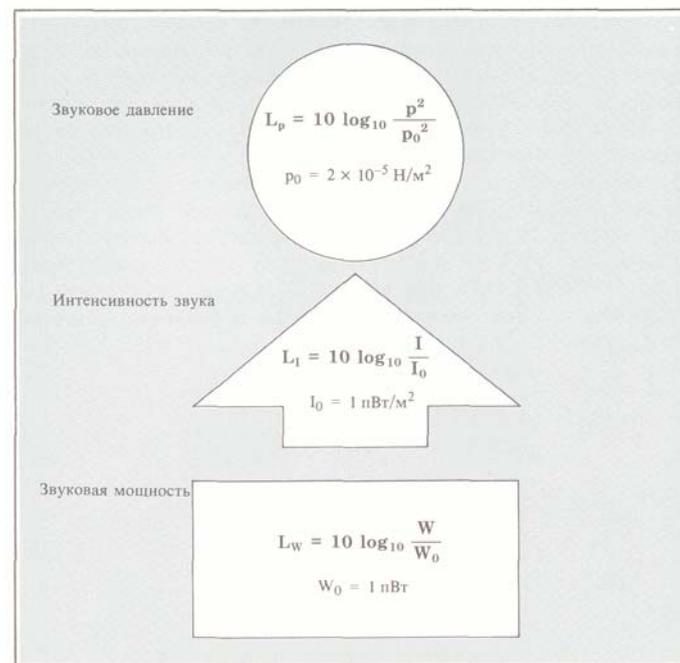


Опорные значения и уровни

Уровни звукового давления, интенсивности звука, звуковой мощности и колебательной скорости частиц (соответственно $(L_p, L_i, L_w \text{ and } L_u)$) имеют единицами дБ (децибел). Эти единицы отображают отношение соответствующей величины к определенному опорному значению этой величины. Отметим, что опорное значение звукового давления соответствует приблизительно порогу слышимости.

Опорные значения интенсивности звука, звуковой мощности и колебательной скорости частиц связаны с опорным значением звукового давления отношениями, отображающими связь этих величин в свободном звуковом поле. Следовательно, в свободном звуковом поле с определенными параметрами получаются идентичные численные значения уровней в дБ независимо от измеряемой величины, т.е. идентичные в смысле численных значений уровни звукового давления, интенсивности звука и колебательной скорости частиц (в направлении распространения звуковых волн). По существу, эти численные значения в дБ несколько отличаются друг от друга из-за округления соответствующих опорных значений. Действительные различия зависят от характеристического импеданса (ρc) среды, в которой измеряются упомянутые акустические величины. Отметим, что символом p обозначена плотность среды, а c обозначает скорость распространения звука в этой среде. Упомянутые различия обычно пренебрежимо малы при измерениях в воздухе (за исключением условий, соответствующих большим высотам над уровнем моря). Во избежание неясностей уровням звуковой мощности обычно придают единицу Б (бел), причем $10 \text{ дБ} = 1 \text{ Б}$.

в свободном звуковом поле уровни звукового давления и интенсивности звука в направлении распространения звуковых волн принимают идентичные численные значения в дБ. По существу, измерять интенсивность звука в свободном звуковом поле вообще не нужно. Однако, практические измерения обычно проводятся в условиях, отличающихся от условий свободных звуковых полей. Поэтому на практике уровни звукового давления и интенсивности звука отличаются друг от друга. Разность этих уровней является важной величиной, называемой показателем давление-интенсивность. Отметим, что эта величина раньше называлась показателем реактивности или показателем фазы (с различными знаками).



В свободном звуковом поле $I = \frac{p_{rms}^2}{\rho c}$

Если $\rho c = 400 \text{ Н} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^{-3}$ $L_p = L_i = L_u$

то $\rho c = 415 \text{ Н} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^{-3}$ при $+20 \text{ }^\circ\text{C}$ и 1013 мбар

$\therefore L_i = L_p - 0,16 \text{ дБ}$

860803

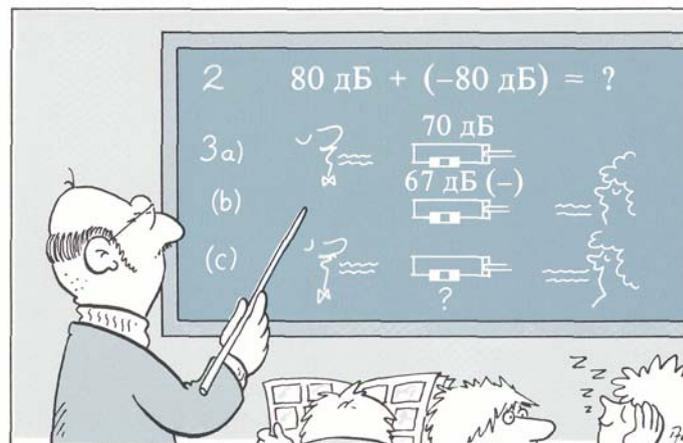
Примеры

Применение различных опорных значений и единиц дБ для различных акустических величин часто связано с затруднениями. В случае сомнений могут помочь приведенные ниже примеры.

1. Газонокосилка с приводом от двигателя излучает звуковую мощность 0,01 Вт. Задача состоит в оценке приближенных значений уровней звукового давления и интенсивности звука на расстоянии 1,5 м от этой газонокосилки. На открытом воздухе можно предположить излучение звука, аналогичное излучению в свободном звуковом поле, причем поверхность земли можно считать почти идеальным акустическим отражателем. Следовательно, при излучении звуковой мощности можно учитывать полушария с площадью поверхности $2\pi r^2$. Площадь на расстоянии 1,5 м ($r = 1,5$ м) составляет *прибл.* 14 м^2 . Следовательно, интенсивность звука равна $0,01/14 \text{ Вт/м}^2$ и уровень интенсивности звука составляет 88,5 дБ отн. 1 пВт/м². Численное значение уровня звукового давления в свободном звуковом поле приблизительно равно численному значению уровня интенсивности звука, т.е. оно составляет 88,5 дБ отн. 20 мкПа.

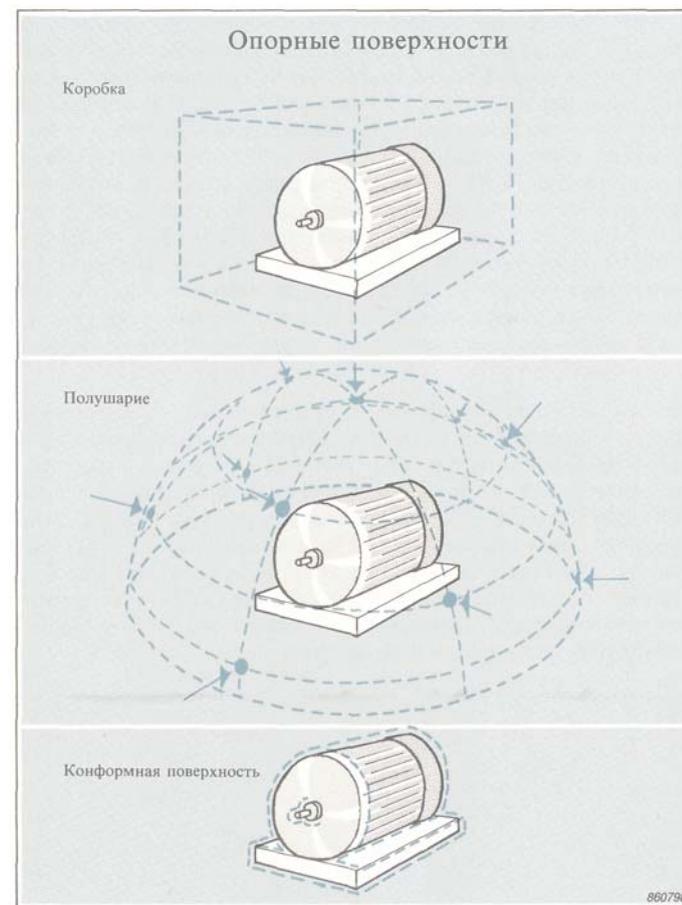
2. Равенство, записанное в верхней части доски на рисунке, иллюстрирует затруднения, связанные со сложением уровней в дБ (в частности в случае отрицательных значений уровней). В данном случае равное -80 дБ значение уровня интенсивности звука означает, что интенсивность звука намного меньше соответствующего опорного значения (1 пВт/м²). Именно поэтому численное значение уровня (не *направление*) имеет отрицательный знак. Результат сложения указанных уровней близок значению 80 дБ, так как влиянием значения -80 дБ можно пренебречь. По существу, уровни интенсивности звука указанного порядка (-80 дБ) вообще не встречаются на практике и не поддаются реальным измерениям.

Последним вопросом является сложение уровней интенсивности звука в различных направлениях, т.е. своего рода векторное сложение. Задача заключается в определении общего уровня интенсивности звука в случае, когда обе лица на рисунке говорят одновременно. В общем нельзя просто суммировать или вычитать уровни интенсивности звука, а при выполнении арифметических операций необходимо учитывать абсолютные значения интенсивности звука. При преобразовании используется выражение $I = I_0 10^{L/10}$. Однако, на основе известного отношения, устанавливающего равносильность изменения уровня на 3 дБ двукратному изменению соответствующего абсолютного значения, можно существенно упростить расчеты. Уровень интенсивности звука в условно отрицательном направлении на 3 дБ ниже уровня интенсивности в условно положительном направлении. Поэтому к лицу, говорящему в условно положительном направлении, возвращается половина интенсивности звука. Это соответствует понижению на 3 дБ уровня интенсивности звука в условно положительном направлении и поэтому конечным результатом является общий уровень 67 дБ



Применение интенсивности звука при определении звуковой мощности

Применение интенсивности звука (а не звукового давления) при определении звуковой мощности имеет ряд преимуществ, главными из которых являются возможность проведения измерений на месте эксплуатации исследуемого источника звука (например, машины и др.), в присутствии фоновых шумов и/или в ближнем звуковом поле. Однако, самым важным достоинством этого метода является его простота. Звуковая мощность, излучаемая источником звука, дается произведением средней по пространству интенсивности звука на поверхности, окружающей этот источник, на площадь этой поверхности. При применении упомянутого метода нужно прежде всего определить учитываемую опорную поверхность. В качестве учитываемой опорной поверхности можно выбрать любую замкнутую поверхность, окружающую только исследуемый источник звука, а не другие источники или стоки (поглотители). Всегда предполагается, что пол совершенно отражает звуковые волны и поэтому он вообще не входит в состав учитываемой поверхности. С теоретической точки зрения учитываемая опорная поверхность может находиться на любом расстоянии от источника звука. Ниже рассматриваются три практических примера. Первый пример: коробка. Учитываемая опорная поверхность в виде коробки может иметь любые форму и размеры. Площадь такой геометрической поверхности легко определить. Плоские стенки способствуют существенному упрощению процесса усреднения интенсивности звука. Несложным путем можно определить звуковую мощность, присущую отдельным стенкам. Путем сложения результатов можно вычислить общую мощность, излучаемую источником звука внутри учитываемой замкнутой поверхности в виде коробки. Второй пример: полушарие. К преимуществам учитываемой опорной поверхности в виде полушария относится возможность ограничения числа точек замера интенсивности звука. В случае всенаправленного источника звука в свободном звуковом поле интенсивность звука имеет идентичные значения во всех точках поверхности в виде полушария. Рекомендация ИСО 3745, устанавливающая метод определения звуковой мощности на основе результатов измерений звукового давления, предлагает применение опорной поверхности в виде полушария с 10 точками замера (по трем точкам на трех окружностях и одна точка в вершине полушария). Число точек замера нужно увеличить в случае, если результаты измерений интенсивности звука в различных точках полушария существенно отличаются друг от друга. Третий пример: конформная поверхность. Конформная опорная поверхность в смысле формы точно соответствует действительной поверхности источника звука и находится на малом расстоянии от последнего. Расположенные на такой учитываемой поверхности точки замера находятся в ближнем поле исследуемого источника звука, так что обычно обеспечено достаточно большое отношение сигнала к шуму. Результаты измерений интенсивности звука можно без затруднений отнести к местоположениям отдельных источников и стоков звуковой энергии.

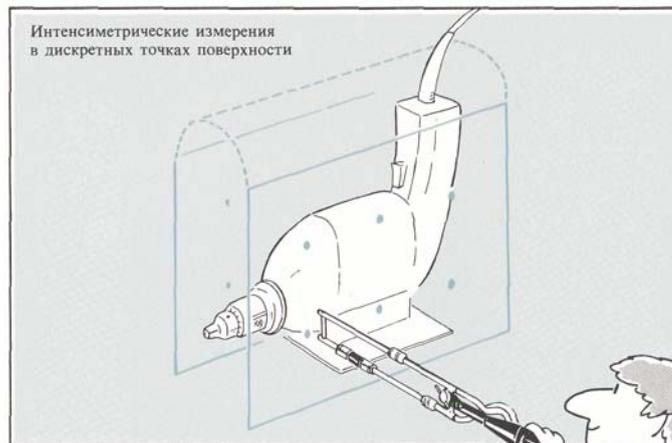
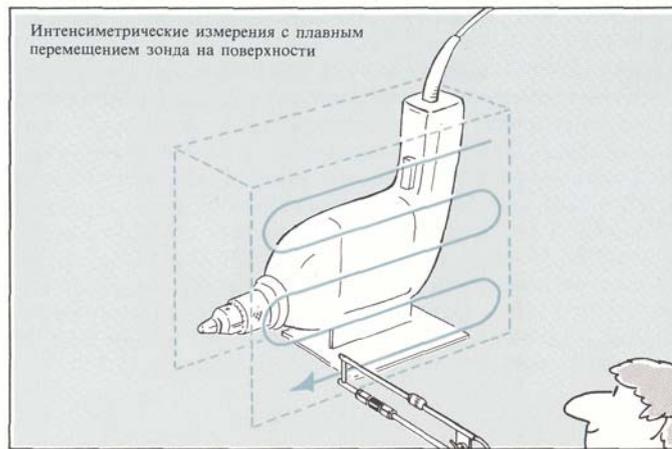


Усреднение по пространству

После определения учитываемой опорной поверхности нужно выбрать метод усреднения по пространству значений интенсивности звука, получаемых в результате измерений в перпендикулярных к упомянутой поверхности направлениях. Отметим, что учитываемая опорная поверхность может быть задана или физической сеткой, или расстояниями от определенных опорных точек. При интенсивметрических исследованиях можно применять два метода усреднения по пространству. Эти методы кратко рассматриваются ниже.

Усреднение при плавном перемещении интенсивметрического зонда

Определив достаточно большое значение времени усреднения используемой интенсивметрической аппаратуры, интенсивметрический зонд плавно перемещают по учитываемой опорной поверхности (как бы наносить краску на эту поверхность). В результате получается единое значение, являющееся средним по пространству значением интенсивности звука. Излучаемая исследуемым источником звуковая мощность определяется путем умножения упомянутого результирующего значения на площадь учитываемой опорной поверхности. Общую учитываемую поверхность также можно подразделить на подходящие сегменты и повторить описанную процедуру с учетом всех этих сегментов. Общая излучаемая звуковая мощность в таком случае дается суммой присущих отдельным сегментам значений звуковой мощности.



Усреднение при интенсивметрических измерениях в дискретных точках

При применении данного метода усреднения по пространству нужно подразделить учитываемую опорную поверхность на малые сегменты и путем измерений в одной точке каждого сегмента определить присущие всем сегментам дискретные значения интенсивности звука. Точки замера часто определяются при помощи подходящей сетки. Сетка может иметь вид решетки из веревок, проволоки и т.п., а иногда используют линейку, рулетку или мерную ленту. На основе результатов измерений определяется среднее значение интенсивности звука. Путем умножения последнего на общую площадь учитываемой опорной поверхности можно определить излучаемую источником звуковую мощность.

Ни один из описанных выше методов не подходит для всех ситуаций, встречающихся на практике. В некоторых случаях целесообразно воспользоваться обоими методами. Метод усреднения при плавном перемещении интенсивметрического зонда с математической точки зрения более точно аппроксимирует вычисление пространственного интеграла и часто дает более точные результаты чем метод усреднения при интенсивметрических измерениях в дискретных точках. Однако, при применении упомянутого первым метода необходимо тщательно соблюдать требования к неизменной скорости и однородному расположению траекторий перемещения интенсивметрического зонда. С другой стороны, метод усреднения при интенсивметрических измерениях в дискретных точках обычно обеспечивает надежную сходимость и воспроизводимость результатов. Оба описанных метода могут быть учтены при создании автоматических систем, особенно эффективных при повторяющихся измерениях акустических параметров идентичных или аналогичных объектов. Применение обоих методов также способствует дальнейшему уменьшению погрешностей.

Фоновые шумы

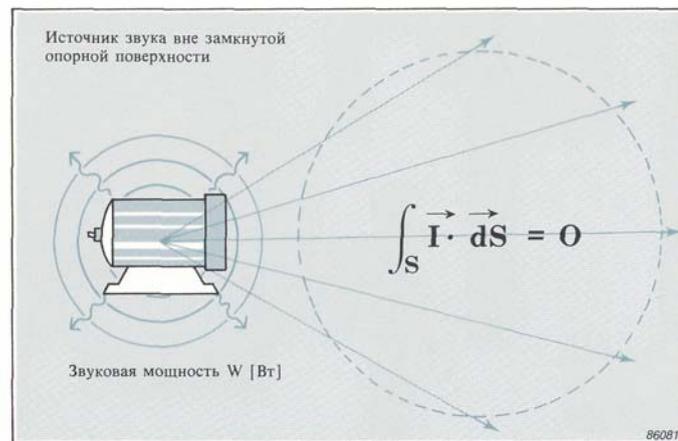
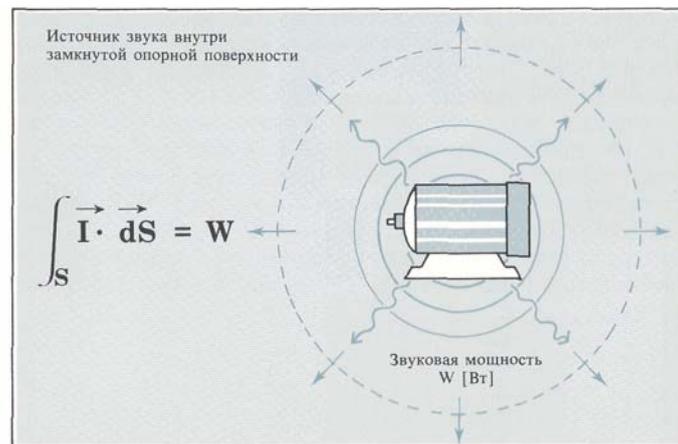
Одно из главных преимуществ основанного на акустической интенсивности метода определения звуковой мощности заключается в возможности его применения даже в присутствии стационарных фоновых шумов с высокими уровнями.

Предположим замкнутую поверхность в пространстве - ее форма вообще не важна. В случае, если эта поверхность окружает источник звука, то можно определить среднюю интенсивность звука на этой поверхности и путем умножения результата на площадь последней вычислить звуковую мощность, излучаемую упомянутым источником звука.

Повторение описанного процесса после установки источника звука вне учитываемой опорной поверхности дает равное нулю значение общей звуковой мощности. Разумеется, что при измерениях интенсивности звука будет обнаружен некоторый поток звуковой энергии в учитываемую поверхность. Однако, идентичный поток энергии будет выходить из этой поверхности. В конечном итоге общая звуковая мощность, излучаемая из учитываемой поверхности, будет нулевой.

Описанный результат будет получен лишь в случае, если уровни фоновых шумов не изменяются (или изменяются мало) во времени. Другими словами, при условии *стационарности* фоновых шумов. Отметим, что при достаточно большом времени усреднения используемой аппаратуры вообще не играют роли небольшие случайные флуктуации уровней фоновых шумов. Другим важным условием является отсутствие поглощения звука внутри учитываемой замкнутой поверхности. В противном случае некоторая доля фоновых шумов будет поглощена, что обусловит нарушение равновесия потоков звуковой энергии в и из учитываемой опорной поверхности.

Фоновые шумы можно рассматривать как звуки, излучаемые находящимися вне учитываемой опорной поверхности источниками. Присутствие таких источников вообще не влияет на определяемую звуковую мощность, излучаемую источником звука внутри учитываемой опорной поверхности. На практике можно с непревышающей 1 дБ погрешностью определять звуковую мощность источников звука с уровнями на 10 дБ ниже уровней фоновых шумов. Отметим, что уменьшение размеров учитываемой опорной поверхности способствует увеличению отношения сигнала к шуму и, следовательно, дальнейшему уменьшению влияния фоновых шумов.



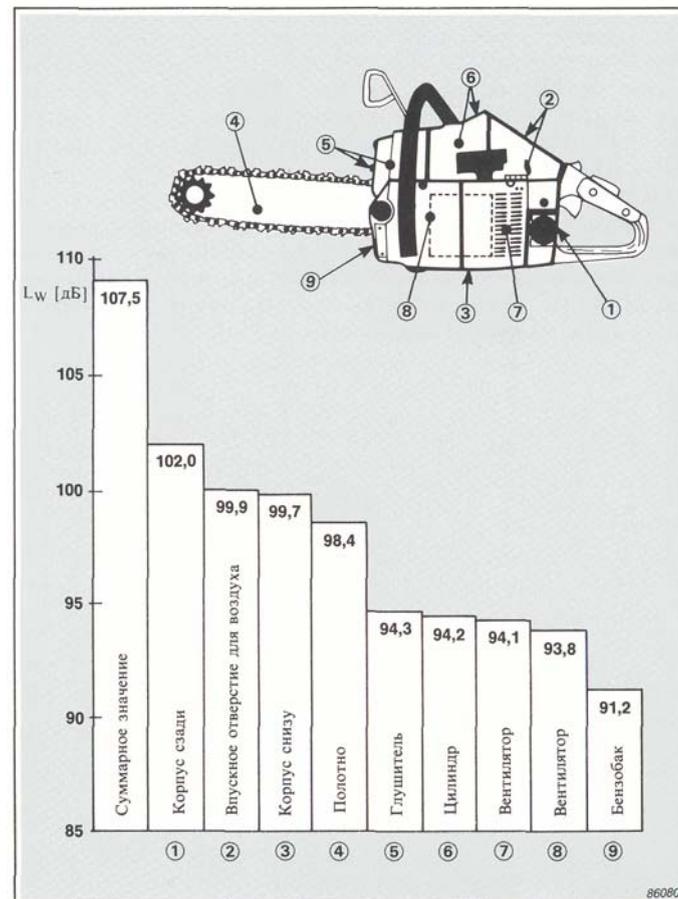
860811

Классификация источников звука

Сложные объекты (машины, конструкции и т.п.) могут содержать несколько источников, излучающих звук, и одновременно могут в некоторых местах поглощать звук. Для надежной оценки методов снижения шума необходимо определить количество излучаемого отдельными источниками шума. Другими словами, необходимо определить звуковую мощность, излучаемую отдельными источниками звука исследуемого объекта.

Выявление, идентификация и классификация источников звука вообще несложны при применении методов акустической интенсиометрии. При соответствующих интенсиометрических измерениях учитываются опорные поверхности, окружающие отдельные узлы, блоки, компоненты и т.п. Находящиеся вне таких поверхностей источники звука рассматриваются как источники фоновых шумов (при этом предполагается стационарность фоновых шумов). Общая излучаемая звуковая мощность дается суммой звуковых мощностей, излучаемых отдельными узлами, блоками, компонентами и т.п. Например, при исследованиях шума, излучаемого показанной на рисунке цепной пилой, не было можно выделить все отдельные источники шума. Однако, эти исследования показали главные области излучения шума. Для принятия эффективных мер по снижению шума было необходимо уделить внимание и модифицировать конструкцию нескольких узлов и деталей упомянутой цепной пилы.

Интенсиометрические методы весьма просты и эффективны. Исследования можно проводить на месте эксплуатации объектов, что само по себе представляет существенный прогресс в области технической акустики. Традиционные методы предъявляли требования к акустической изоляции (например, при помощи звукоизолирующих покрытий, оболочек, перегородок и др.) отдельных узлов и компонентов исследуемых объектов (например, узлов дизельного двигателя и т.п.). Звуковое давление можно было определять лишь в специальных акустических условиях, т.е. исследуемые объекты было необходимо установить в безэховую или реверберирующую камеру. Соответствующие исследования были весьма трудоемки и занимали значительное время.



Графическое представление распределения интенсивности звука

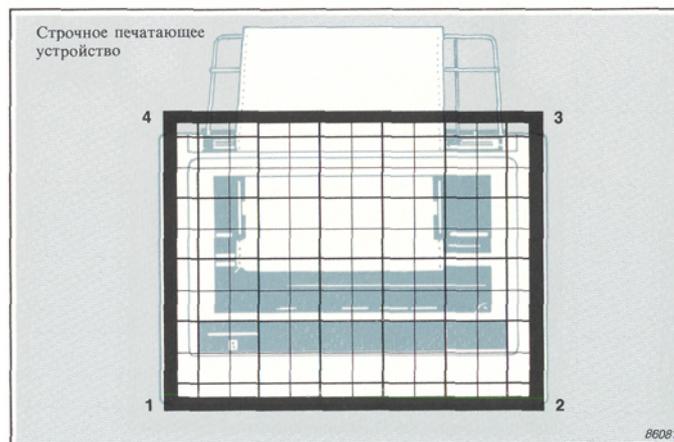
Все задачи борьбы с акустическими шумами являются прежде всего задачами выявления, идентификации и определения локализации источников шума. Акустическая интенсивметрия предлагает ряд методов, эффективных при решении этих задач и имеющих значительные преимущества перед традиционными методами.

Контурные и трехмерные графики

Контурные и трехмерные графики дают возможность наглядного и детального представления звуковых полей, создаваемых источниками звука. По этим графикам можно выявить и точно определить локализацию различных источников и стоков звуковой энергии.

Для определения учитываемой опорной поверхности используется сетка. В равномерно распределенных точках на этой поверхности (точках сетки) измеряется интенсивность звука в перпендикулярных к поверхности направлениях. На основе результатов этих измерений можно определить звуковую мощность, излучаемую источником внутри учитываемой опорной поверхности. Получаемые в результате измерений в отдельных точках значения хранятся, так что наконец имеется в наличии матрица значений интенсивности звука, соответствующих отдельным точкам упомянутой сетки. Путем интерполирования и соединения прямыми точек, в которых определены идентичные значения интенсивности звука, можно создать контуры равной интенсивности звука. Такие контуры называются кривыми равной интенсивности звука и могут быть отнесены к дискретным частотам, определенным частотным полосам или к общему учитываемому диапазону частот. Аналогичным образом можно создать графики, содержащие кривые равной интенсивности звука в отрицательном направлении. По таким графикам легко выявить и определить локализацию стоков звуковой энергии.

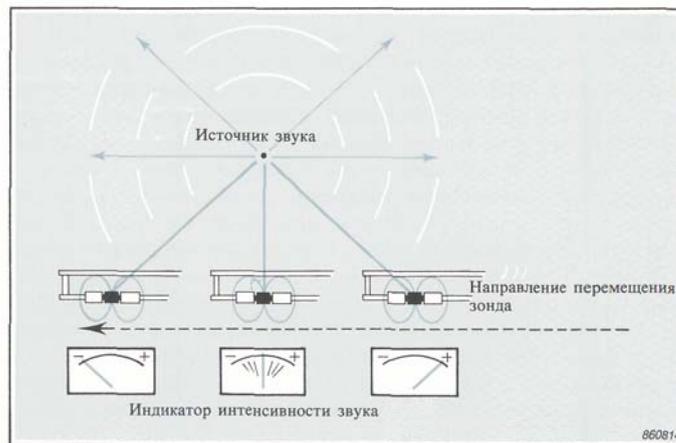
На основе хранящихся результатов интенсивметрических измерений также можно создать трехмерные графики, наглядно иллюстрирующие звуковые поля различных источников звука. Трехмерные графики отображают распределение уровней интенсивности звука (на вертикальной оси отложены уровни интенсивности звука) в пространстве над учитываемой сеткой. При трехмерном представлении можно учитывать интенсивность звука в условно положительном и отрицательном направлениях. Однако, для хранения, обработки и представления интенсивметрических данных необходима аппаратура, обладающая соответствующими способностями и возможностями. На приложенных рисунках в качестве примеров показаны контурный и трехмерный графики распределения интенсивности звука, излучаемого печатающим устройством. По этим графикам легко видеть, что самое





большое излучение звука происходит через отверстие для бумаги в верхней части и отверстие для выключателя в правом нижнем углу корпуса упомянутого печатающего устройства.

Разумеется, что в виде контурных и трехмерных графиков также можно представить распределение звукового давления. Однако, в графическом виде можно представить и распределение интенсивности звука в ближнем поле источника, в котором сохранена высокая степень корреляции между результатами измерений интенсивности звука и действительными местоположениями отдельных источников и стоков звуковой энергии. Это способствует увеличению разрешения и более точной идентификации отдельных источников и стоков звуковой энергии. Нужно снова подчеркнуть, что интенсивметрические исследования можно проводить в любых акустических условиях.



Отыскание локализации источников звука — метод поиска точек перемены знака интенсивности звука

Характеристику направленности двухмикрофонного интенсивметрического зонда можно использовать при быстром поиске локализации источников звука. Звуковым волнам, падающим под углом 85° относительно продольной оси зонда, соответствуют положительные значения интенсивности звука, в то время как падающим под углом 95° звуковым волнам соответствуют отрицательные значения интенсивности звука. Таким образом, даже небольшому изменению угла падения звуковых волн соответствует перемена знака интенсивности звука.

В процессе отыскания локализации источника звука перемещают интенсивметрический зонд так, что его продольная ось движется параллельно плоскости, в которой предполагается местоположение искомого источника, и непрерывно наблюдают за индикаторным устройством, показывающим значения и знак (направление) интенсивности звука. В некотором положении интенсивметрического зонда произойдет внезапное изменение направления интенсивности звука. Характерными для этого положения являются быстрые изменения знака показываемых индикаторным устройством интенсивметрической аппаратуры значений интенсивности звука. В этом положении звуковые волны падают под углом 90° относительно продольной оси интенсивметрического зонда и поэтому это положение соответствует местоположению искомого источника звука. Отметим, что описанный метод эффективен лишь при отыскании локализации единого или преобладающего источника звука. Присутствие других источников или стоков звуковой энергии обычно значительно затрудняет расшифровку результатов.

Применение в области строительной акустики

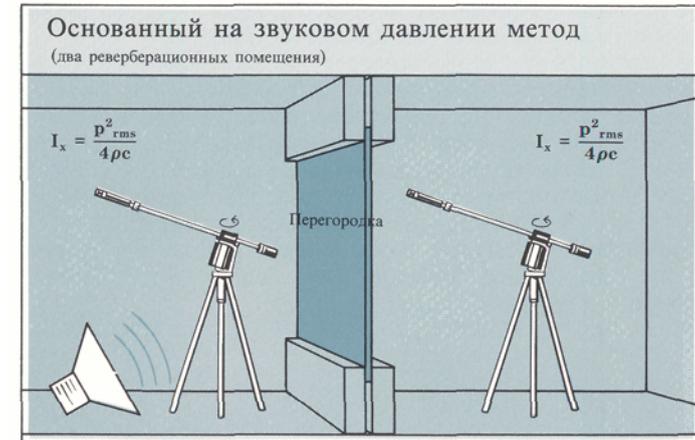
Основанные на акустической интенсивности методы находят широкое применение в области строительной и архитектурной акустики. По существу, степень подавления шумов, звукоизоляция и звукопоглощение непосредственно связаны со звуковой мощностью. Следовательно, при экспериментальных исследованиях целесообразно прежде всего измерять интенсивность звука и полагать звуковое давление дополнительной величиной.

Определение коэффициента ослабления звука

Традиционный метод определения коэффициента ослабления звука установлен стандартом ИСО 140. Этот метод предъявляет требования к установке исследуемого объекта (перегородки и т.п.) в отверстие между двумя независимо и взаимно изолированными реверберационными камерами или помещениями. Разумеется, что создание такого комплекта связано с большими денежными затратами. В передаточном и приемном реверберационных помещениях определяются средние по пространству уровни звукового давления, на основе которых можно определить падающую на исследуемый объект и пропущенную им интенсивность звука. В приемном реверберационном помещении также измеряется время реверберации. На основе результатов описанных измерений вычисляется присущий исследуемому объекту коэффициент ослабления звука.

При применении основанного на акустической интенсивности метода определения коэффициента ослабления звука достаточно одного реверберационного помещения, а в большинстве случаев возможны измерения в нормальных условиях, встречающихся на практике. В передаточном реверберационном помещении определяются средние по пространству уровни звукового давления (аналогично описанному выше традиционному методу), а в приемном помещении с помощью интенсивметрической аппаратуры измеряется пропущенная исследуемым объектом интенсивность звука. Приемное помещение не должно быть слишком гулким, так как отраженные звуковые волны могут быть поглощены, пропущены или снова отражены исследуемым объектом. Во избежание таких затруднений целесообразно снабдить приемное помещение некоторым количеством поглощающего звук материала.

Основанный на акустической интенсивности метод также дает возможность исследований различных участков исследуемых объектов, в частности сложных объектов (например, перегородок, содержащих окна, вентиляционные отверстия и др.). Полые строительные элементы могут находиться в реверберационном помещении, а соответствующие коэффициенты ослабления звука могут быть определены изнутри таких объектов.



Интенсиметрическая аппаратура

В общем, аппаратура для измерений и анализа интенсивности звука состоит из интенсиметрического зонда, анализатора и интенсиметрического калибратора. Фирма Брюль и Кьер изготавливает и поставляет широкий ассортимент интенсиметрической аппаратуры и прикладного программного обеспечения, способствующих созданию как универсальных, так и специальных интенсиметрических систем.

Анализаторы

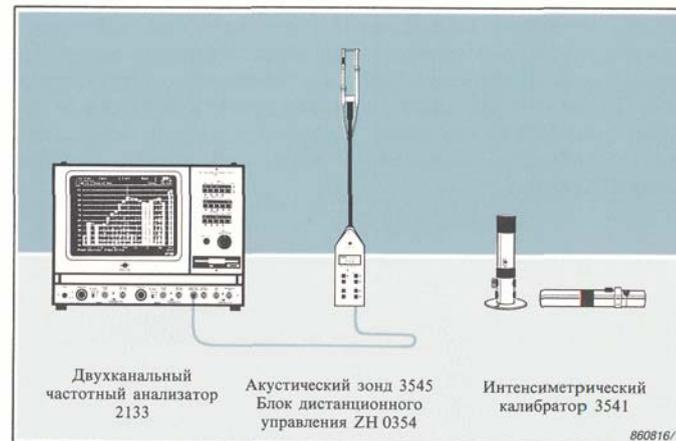
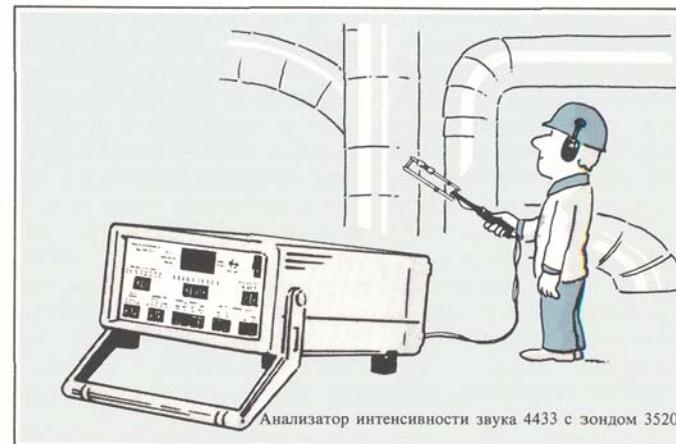
Анализаторы 2133, 2032/2034 и 4433 фирмы Брюль и Кьер рассчитаны на применение в области акустической интенсиметрии. Анализатор 2133 работает в реальном масштабе времени и его цифровые фильтры способствуют параллельному анализу в полосах шириной 1/1, 1/3 и 1/12 октавы. Анализаторы 2032 и 2034 основаны на быстром преобразовании Фурье и дают возможность интенсиметрических исследований в узких частотных полосах. Портативный, работающий от батарей анализатор 4433 является идеальным прибором для интенсиметрических исследований и октавного анализа в полевых условиях.

Двухмикрофонные интенсиметрические зонды

Акустические зонды 3519, 3520 и 3545 фирмы Брюль и Кьер дают возможность интенсиметрических измерений в широких диапазонах и допускают совместное применение блоков дистанционного управления интенсиметрической аппаратурой.

Интенсиметрический калибратор

Интенсиметрический калибратор 3541 фирмы Брюль и Кьер создает в малой акустической камере связи звуковое поле с точно определенными опорными уровнями звукового давления, колебательной скорости частиц и интенсивности звука. Следовательно, имеется возможность калибровки содержащих микрофонные комплекты каналов интенсиметрической аппаратуры и проверки определяемых этой аппаратурой значений интенсивности звука и колебательной скорости частиц. Прибор 3541 также способствует определению остаточной интенсивности интенсиметрических систем и дает возможность определения показателя остаточной разности давление-интенсивность, отображающего меру фазового рассогласования каналов этих систем



Методы интенсиметрических измерений

Поскольку в настоящее время не имеется общепринятых стандартов и рекомендаций для интенсиметрических измерений, ниже кратко рассматриваются аспекты и факторы, которые необходимо учитывать при измерениях и анализе интенсивности звука.

Калибровка

Калибровка микрофонов, входящих в состав интенсиметрического зонда, осуществляется с помощью пистонфона или интенсиметрического калибратора, отдающего опорный сигнал с точно определенными уровнем и частотой. Проверка интенсиметрической аппаратуры осуществляется путем сравнения показываемого ее индикатором значения с опорным значением уровня интенсивности звука, создаваемой интенсиметрическим калибратором. Поскольку интенсивность звука также зависит от плотности воздуха, изменяющейся с температурой и статическим давлением, необходимо внести соответствующую поправку. Отметим, что эта поправка обычно пренебрежимо мала (за исключением больших высот над уровнем моря). Интенсиметрический калибратор также используется с целью проверки степени согласованности по фазе каналов интенсиметрической аппаратуры. В соответствующем процессе определяются значения показателя давление-интенсивность и динамической способности этой аппаратуры.

Усреднение по времени

Для доведения до минимума *случайной погрешности* необходимо использовать время усреднения, гарантирующее стабильные и воспроизводимые результаты. Нужно время усреднения можно определить путем повторных измерений с поочередным увеличением времени усреднения. Соответствующие измерения нужно повторять до достижения сходных результатов.

Усреднение по пространству

При интенсиметрических измерениях с плавным перемещением используемого зонда необходимо равномерно перекрыть учитываемую опорную поверхность. Скорость перемещения интенсиметрического зонда в составляющих целое число циклах должна быть неизменной. При интенсиметрических измерениях в дискретных точках число точек замера на учитываемой опорной поверхности зависит от изменений измеряемой интенсивности звука. В случае больших изменений интенсивности звука необходимо соответствующим образом увеличить число точек замера. По существу, опытным путем легко определить нужное число дискретных точек замера. Сходимые результаты повторных измерений на различных поверхностях или в различных точках идентичной поверхности указывают на правильность процесса усреднения по пространству.

Фоновые шумы

При условии стационарности фоновых шумов можно сохранить непревышающую 1 дБ погрешность интенсиметрических измерений даже в случае, если уровни этих шумов превышают на макс. 10 дБ уровни звука, излучаемого исследуемым источником. Влияние фоновых шумов легко оценить путем определения звуковой мощности после устранения или выключения исследуемого источника звука. Отметим, что уменьшение расстояния от исследуемого источника звука способствует уменьшению влияния фоновых шумов и повышению надежности и точности интенсиметрических измерений.

Выбор распорной детали

В интенсивметрических зондах фирмы Брюль и Кьер можно использовать распорные детали, определяющие равное 6, 12 или 50 мм расстояние между акустическими центрами входящих в состав этих зондов микрофонов. Предположения теории акустической интенсивметрии определяют верхний предел диапазона частот, в котором можно проводить интенсивметрические измерения. *Уменьшение* расстояния между микрофонами способствует *увеличению* верхнего предела упомянутого частотного диапазона. Рассогласование фазовых характеристик каналов интенсивметрической аппаратуры ограничивает снизу диапазон частот, в котором можно проводить интенсивметрические измерения. *Увеличение* расстояния между микрофонами способствует *уменьшению* нижнего предела упомянутого частотного диапазона. Отметим, что упомянутый нижний предел также зависит от параметров исследуемого звукового поля. *Показатель давление-интенсивность* связан со степенью надежности и удобства интенсивметрических измерений в определенном звуковом поле.

График на приложенном рисунке дает возможность определения пределов диапазона частот, в котором можно проводить интенсивметрические измерения с непревышающей заданное значение погрешностью. Однако, для применения этого графика необходимо определить показатель давление-интенсивность исследуемого звукового поля. Этот показатель дается просто разностью присущих звуковому полю уровней звукового давления и интенсивности звука. Выше упоминалось, что нижний предел рабочего диапазона частот также зависит от степени рассогласования фазовых характеристик каналов используемой интенсивметрической аппаратуры. Консервативной оценкой общей фазовой погрешности интенсивметрической аппаратуры фирмы Брюль и Кьер является значение $\pm 0,3^\circ$. Определим в качестве примера пределы диапазона частот при интенсивметрических измерениях в поле с равным -3дБ показателем давление-интенсивность. Легко видеть, что при применении распорной детали, устанавливающей равное 12мм расстояние между акустическими центрами микрофонов интенсивметрического зонда, нижний предел рабочего частотного диапазона составляет прилб. 250 Гц. Для измерений в области более низких частот необходима распорная деталь, придающая упомянутому расстоянию значение 50мм. При применении такой распорной детали получается нижний предел прилб. 63Гц. Однако, увеличение расстояния между микрофонами интенсивметрического зонда обуславливает уменьшение верхнего предела рабочего частотного диапазона (в данном случае уменьшение до значения прилб. 1,25 кГц). Следовательно, при применении лишь одной распорной детали нельзя осуществлять интенсивметрические исследования в широком диапазоне частот.

Общее рассогласование фазовых характеристик
каналов интенсивметрической аппаратуры (зонд и анализатор)

Показатель
давление-интенсивность
 $L_p - L_I$

0 дБ
3 дБ
10 дБ

Расстояние между микрофонами,
 Δr

6 мм

Диаметр 1/4 дюйма

12 мм

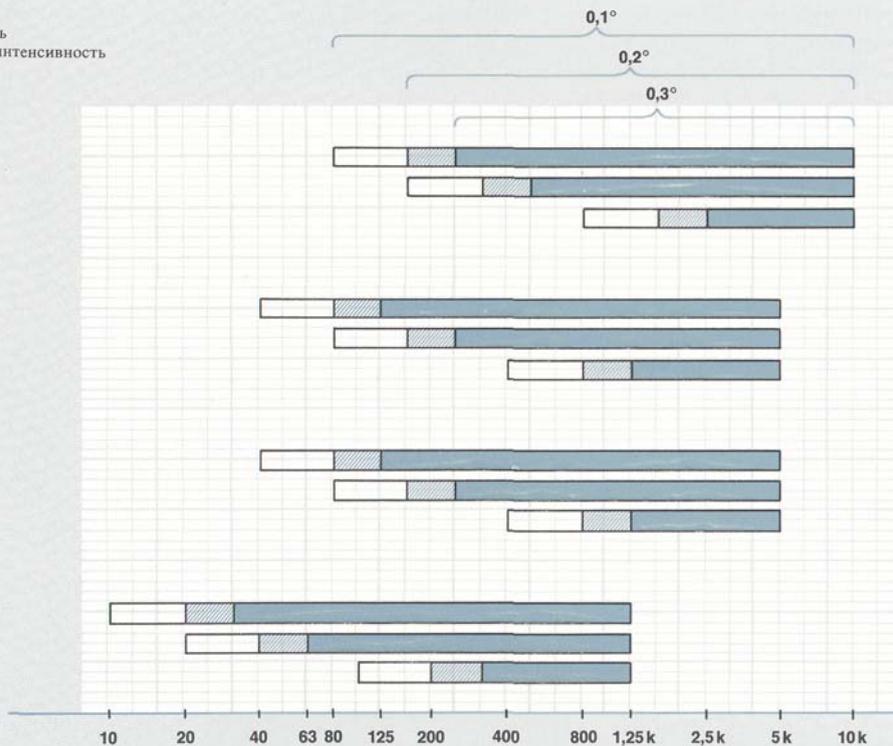
Диаметр 1/4 дюйма

12 мм

Диаметр 1/2 дюйма

50 мм

Диаметр 1/2 дюйма



Частотные диапазоны для интенсивметрических измерений с непревышающей 1 дБ погрешностью в зависимости от показателя давление-интенсивность расстояния между микрофонами и значения рассогласования фазовых характеристик

860817/1

Другие применения и специальные темы

В предыдущих разделах были рассмотрены области, в которых акустическая интенсивность уже нашла и сегодня находит широкое применение. Другие области применения интенсивностных методов в настоящее время находятся на стадии исследований. Примеры таких новых областей кратко рассматриваются ниже.

Интенсивностные исследования со стробированием

На практике часто исследуются акустические шумы, излучаемые машинным и другим оборудованием, совершающим вращательные и/или возвратно-поступательные движения. Особый интерес представляют исследования выбранных участков сигналов, отображающих такие шумы. Путем измерения исследуемого сигнала на протяжении определенного интервала, соответствующего части рабочего цикла оборудования (т.е. путем стробирования), и повторения этого процесса с учетом относительно большого числа рабочих циклов можно при помощи усреднения обеспечить нужную стационарность обрабатываемого сигнала. При таких измерениях необходима синхронизация используемой интенсивностной аппаратуры. С этой целью можно использовать фотоэлектрическое пусковое устройство, запускающее аппаратуру синхронно с прохождением светоотражающей метки на движущейся детали исследуемого оборудования. Генерируемые таким образом пусковые импульсы запускают или прекращают происходящий на протяжении определенного временного интервала процесс измерения и анализа интенсивности звука. Следовательно, имеется возможность подробных исследований выбранных участков рабочих циклов машинного и другого оборудования (например, начальных участков процесса сгорания двигателей), определенных кратковременных звуков в процессе производства изделий и др. Метод стробирования можно использовать при измерениях и анализе как интенсивности звука, так и звукового давле-

ния. На основе результатов интенсивностных исследований со стробированием можно выявлять локализацию источников звука, создавать относящиеся к определенным временным интервалам контурные графики и др.

Определение эффективности излучения

Физические поверхности излучают звуковую энергию путем сообщения их механических колебаний окружающему воздуху. Эффективность этого процесса называется эффективностью излучения. Этот параметр важен при разработке разного рода изделий и дает возможность оценки звуковой мощности, излучаемой поверхностями этих изделий. Эффективность излучения определена отношением интенсивности излучаемого звука к интенсивности звука, которую излучал бы поршень, совершающий колебательные движения со скоростью, идентичной скорости колебательного движения учитываемой поверхности. Интенсивность звука, излучаемого поверхностью, можно измерять при помощи двухмикрофонного зонда и соответствующей интенсивностной аппаратуры, а скорость колебательного движения этой поверхности можно определять с помощью акселерометра и соответствующей виброметрической аппаратуры.

Определение векторов интенсивности звука

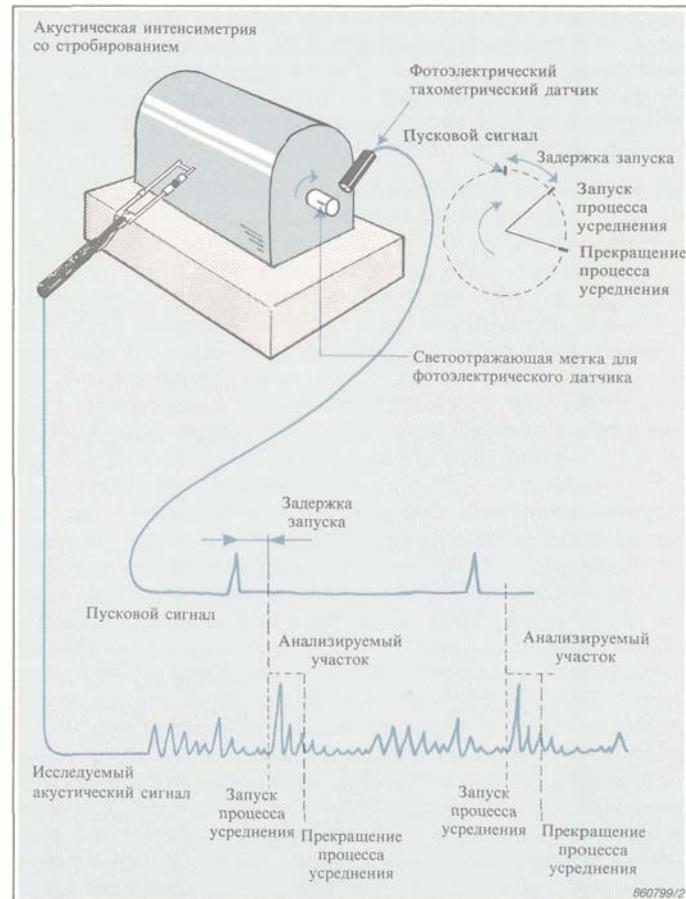
Интенсивность звука является векторной величиной. На практике обычно определяется лишь одна составляющая вектора интенсивности звука, т.е. составляющая, совпадающая с направлением продольной оси используемого интенсивностного зонда. Однако, все три составляющие векторов интенсивности звука можно измерять одновременно при помощи трех пар микрофонов, установленных во взаимно перпендикулярных направлениях. При обработке соответствующих сигналов и определении параметров векторов интенсивности звука используется вычислительная машина. 41

Интенсиметрия распространяющихся в твердых телах колебаний

Содержащий два микрофона интенсиметрический зонд дает возможность измерений интенсивности звука, распространяющегося в воздухе или в другой газовой среде. Аналогично можно измерять интенсивность колебаний, распространяющихся в твердых телах (например, в плите, балке и др.). При таких измерениях используются два акселерометра, размещенных на малом расстоянии на поверхности исследуемого объекта и соединенных с подходящей интенсиметрической аппаратурой. Соответствующие методы используются для исследований потоков энергии в больших и сложных механических системах, излучающих акустический шум.

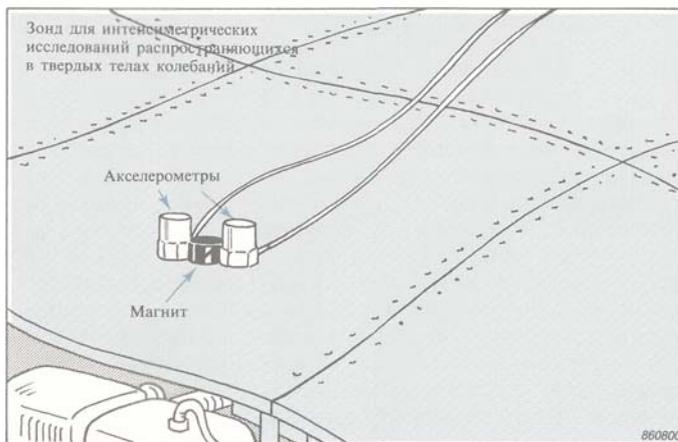
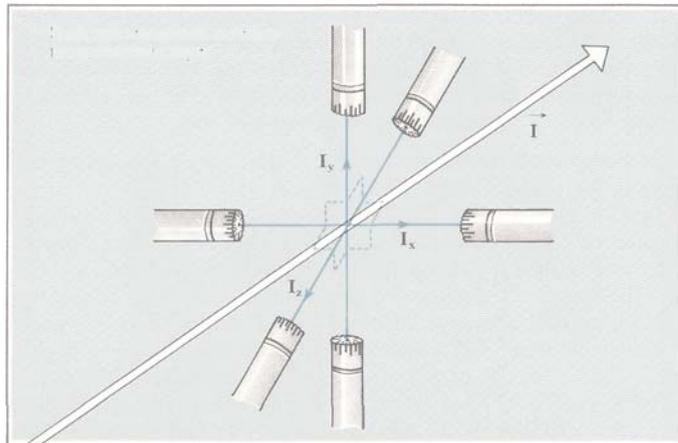
Интенсиметрические исследования в каналах

Исследования потоков энергии в каналах, воздуховодах, вентиляционных трубах и т.п. уже длительное время привлекают интерес соответствующих специалистов. В настоящее время можно при таких исследованиях использовать эффективные методы акустической интенсиметрии, способствующие созданию диаграмм сложного распределения интенсивности звука в каналах и трубах, определению звуковой мощности и др. При измерениях в присутствии воздушных потоков нужно интенсиметрический зонд снабдить ветрозащитным колпаком, способствующим уменьшению шумов аэродинамического происхождения. Отметим, что интенсиметрические измерения нельзя проводить в высокоскоростных воздушных потоках.



Пространственное преобразование звуковых полей

На основе корреляции между результатами измерений звукового давления вблизи источника звука и в определенных опорных точках можно получить подробное описание звукового поля в содержащих точки замера плоскостях и в других учитываемых плоскостях. Таким образом можно найти оценки звукового давления и интенсивности звука в дальнем звуковом поле, т.е. на больших расстояниях от источника звука. Исследования такого рода и преобразования звуковых полей важны для машиностроительной промышленности, так как различными стандартами и рекомендациями установлены максимально допустимые уровни шума на больших расстояниях от выпускаемых этой промышленностью изделий. Упомянутые выше методы уже на стадии конструирования и разработки дают возможность прогнозирования и предварительной оценки уровней шума в дальнем звуковом поле на основе результатов акустических исследований в ближнем поле различных источников звука.



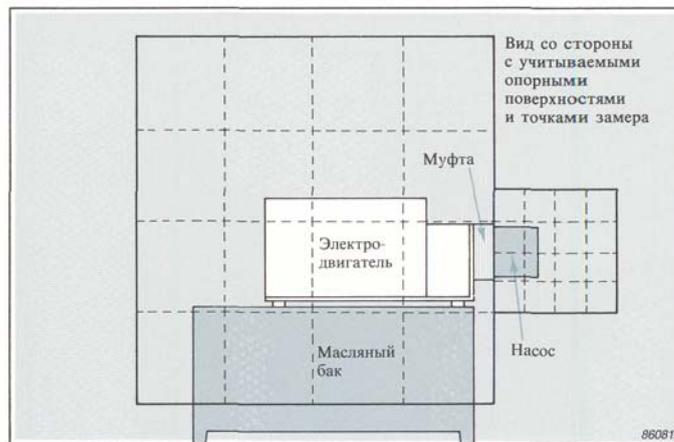
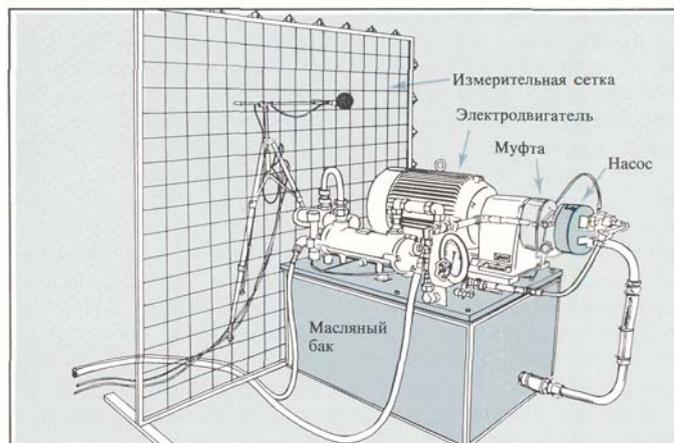
Практические примеры

Два практических примера, рассматриваемых ниже, иллюстрируют важность и эффективность методов акустической интенсивности. В этих примерах показано, что акустическая интенсивность способна дать ясные ответы на связанные с акустическими шумами практические вопросы.

1. Эффективный метод уменьшения шума агрегата, содержащего насос и приводной электродвигатель

Агрегат, содержащий насос и приводной электродвигатель, создавал шум со слишком высокими уровнями. Излучаемая этим агрегатом звуковая мощность была определена на основе результатов измерений звукового давления, проведенных в реверберационном помещении. Равный 88,4 дБ общий уровень звуковой мощности был неприемлемым. Приводной электродвигатель был затем отсоединен от насоса. На основе результатов новых измерений звукового давления был определен равный 65 дБ уровень звуковой мощности, излучаемой приводным электродвигателем. Поэтому главным источником шума оказался насос.

Однако, описанные выше исследования не осуществлялись в условиях нормальной эксплуатации агрегата. Чтобы проверить приведенное выше заключение, необходимо было определить звуковую мощность, излучаемую нагруженным насосом. При применении основанного на измерениях звукового давления метода единой возможностью было применение совершенной звукоизоляции приводного электродвигателя. Обеспечение такой звукоизоляции оказалось весьма затруднительным. Единым эффективным решением в данной ситуации было применение методов акустической интенсивности, способствующих определению звуковой мощности целых агрегатов и их узлов (здесь насоса и приводного электродвигателя) непосредственно на месте эксплуатации. Так как агрегат был установлен в реверберационном помещении,



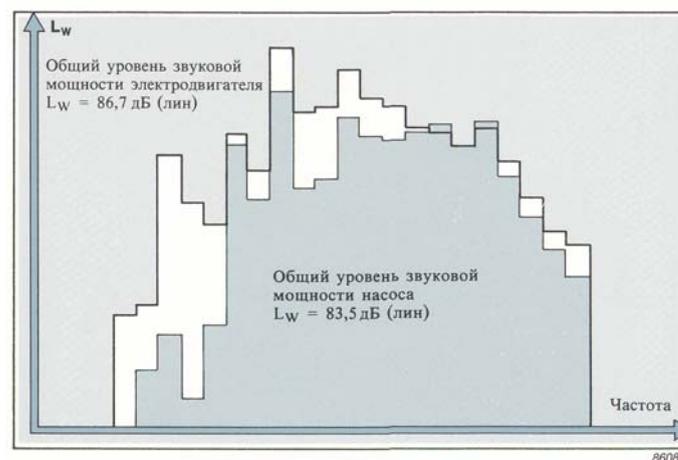
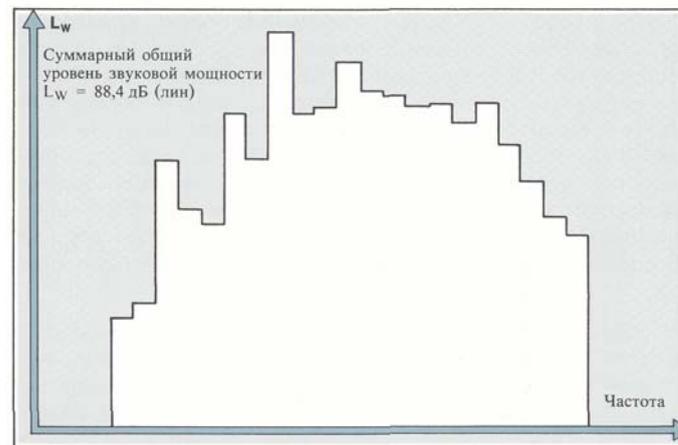
интенсиметрические исследования проводились в этих условиях. Однако, связанные с перемещением агрегата в реверберационное помещение затраты были совершенно ненужными, так как интенсиметрические исследования можно было проводить на месте его эксплуатации. Такая возможность является одним из главных преимуществ акустической интенсиметрии.

Первым шагом в процессе определения звуковой мощности было задание учитываемых опорных поверхностей. В данном случае были заданы две коробки, определенные прямоугольными рамами с решетками из проволоки. Эти решетки соответствовали измерительным сеткам и определяли точки замера интенсивности звука. Одна из этих коробок окружала насос, а другая содержала приводной электродвигатель с его масляным баком. Обе коробки находились на малом расстоянии от агрегата с целью сохранения как можно большего отношения сигнала к шуму. Фоновые шумы в описанных условиях были обусловлены отражениями звуковых волн от стен реверберационного помещения.

Затем были проведены измерения интенсивности звука в заданных точках. На основе полученных результатов были с учетом обоих опорных поверхностей определены уровни звуковой мощности, излучаемой насосом и приводным электродвигателем, т.е. значения соответственно 83,5 дБ и 86,7 дБ. Эти результаты, указывающие на преобладающий вклад излучаемого электродвигателем шума, не могли бы быть получены на основе результатов измерений звукового давления в отсутствии упомянутой выше надежной звукоизоляции отдельных узлов.

Причина высокого уровня излучаемой узлом приводного электродвигателя звуковой мощности заключалась в том, что этот узел излучал в виде шума механические колебания, сообщаемые ему насосом. Большие поверхности электродвигателя и его масляного бака эффективно излучали акустический шум. Шум агрегата существенно уменьшился после устранения масляного бака. По существу, соответствующее заключение можно было сделать на основе опыта, но интенсиметрические исследования дали специалистам нужное обоснование и подтвердили правильность принятого решения.

Отметим, что описанные выше исследования проводились в диффузном звуковом поле с характерным для него большим значением разности звукового давления и интенсивности звука, т.е. большим значением показателя давление-интенсивность. Даже эти неблагоприятные условия не сказались на действительности окончательных результатов.



860810

2. Выявление и идентификация путей распространения звука через стены

Звук может входить в здания различными путями. Стены не являются единими путями распространения звука. Звук также может распространяться в воздухе, через отверстия, вентиляционные каналы и др. Стены могут быть изготовлены из различных материалов и могут содержать окна, двери и другие элементы с пониженной степенью звукоизоляции. Несмотря на возможность установки источника звука в одно помещение и определения параметров передачи звука на основе результатов измерений усредненного по пространству звукового давления в соседнем помещении, данный метод не всегда допустит выявление путей распространения звука в это приемное помещение. Причиной дополнительных затруднений и погрешностей может быть присутствие стоячих звуковых волн.

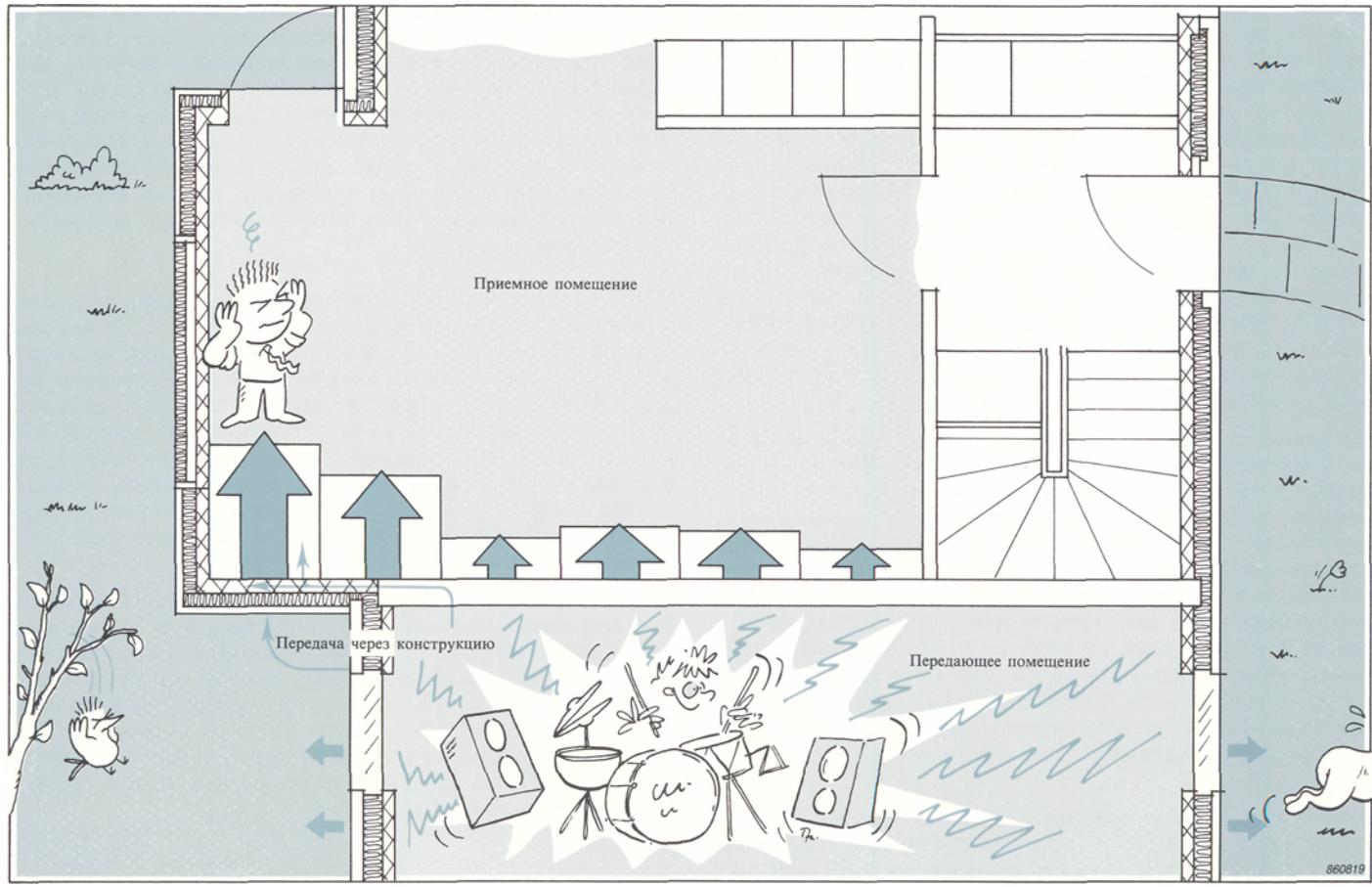
На основе результатов интенсивметрических измерений можно определить звуковую мощность, проходящую через различные сегменты стены или перегородки. Контурные диаграммы, созданные с применением тех же результатов, дают возможность выявления локализации источников и путей распределения звука. Использовать можно также метод, заключающийся в плавном перемещении интенсивметрического зонда вдоль исследуемой стены или перегородки и в поиске зон, в которых происходят изменения направления (знака) интенсивности звука, т.е. метод, описанный раньше в связи с построением графиков распределения интенсивности звука. На основе результатов таких исследований можно отыскать локализацию зон с пониженной степенью звукоизоляции.

В квартире, схематически показанной на приложенном рисунке, были проведены несложные исследования акустических условий. В одном помещении был установлен источник

звука, а в смежном помещении измерялась и анализировалась интенсивность звука. На основе результатов этих измерений были определены значения звуковой мощности, пропущенной стеной и перегородкой между упомянутыми помещениями. В помещении, в котором проводились измерения, был с целью улучшения акустических условий и увеличения отношения сигнала к шуму помещен звукопоглощающий материал. Благодаря этому материалу удалось обеспечить не превышающее прибл. 0,5 с время реверберации упомянутого помещения.

Описанные исследования привели к неожиданным результатам. Самые высокие уровни звуковой мощности были обнаружены в левом углу приемного помещения (см. рисунок), т.е. вблизи участка стены, который вообще не находился между обоими помещениями. Измерения звукового давления вблизи внешней стороны упомянутого участка показали, что распространяющийся в воздухе вне здания звук вообще не мог быть причиной упомянутых выше высоких уровней внутри помещения. Поэтому было установлено, что единой возможной причиной такой ситуации был корпусной звук, распространяющийся в конструкции здания.

Исследуемая стена была создана из нескольких материалов. Участок, расположенный слева на рисунке, был частью шлакобетонного сборочного блока, а остаток стены (перегородка) был изготовлен из бетона. Участок из шлакобетона ввиду относительно малой массы пропускал звук в большей мере, чем участок из бетона. Эта ситуация не была очевидной, а полученный при помощи акустической интенсивметрии результат не мог бы быть получен на основе измерений звукового давления.



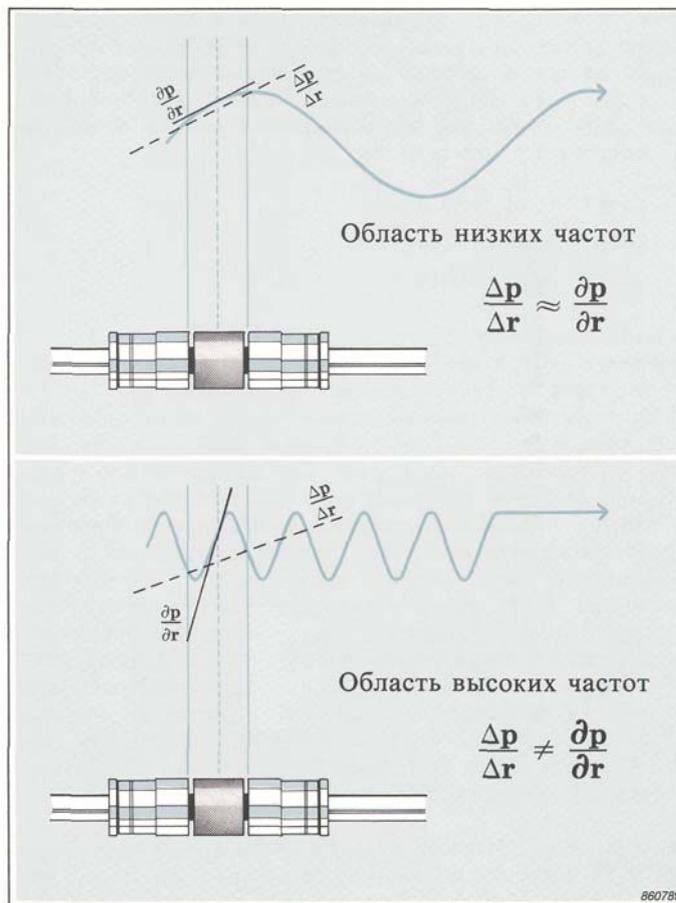
Приложение: ограничения интенсивметрических методов

В разделе, названном «Методы интенсивметрических измерений», были даны основные указания по методам и технике интенсивметрических измерений. Ниже рассматриваются ограничения этих методов, причем подробно обсуждаются именно ограничения, связанные с рабочим диапазоном частот интенсивметрической аппаратуры и с показателем давление-интенсивность исследуемых звуковых полей.

Верхний предел частоты: погрешности аппроксимации

Погрешности аппроксимации, ограничивающие сверху рабочий диапазон частот используемой интенсивметрической аппаратуры, являются систематическими погрешностями, обусловленными применением метода конечно-разностных приближений. Суммарная систематическая погрешность остается неизменной при всех интенсивметрических измерениях и приводит к тому, что получаемые результаты меньше истинных значений интенсивности звука. Причина этой погрешности заключается в аппроксимации касательной к кривой зависимости звукового давления от расстояния (градиента звукового давления) прямой, проходящей через соответствующие расстоянию между микрофонами используемого интенсивметрического зонда точки. Погрешность этой аппроксимации увеличивается в случае, если упомянутая кривая сильно и быстро изменяется в зависимости от расстояния. Такая ситуация возникает всегда, когда длина волны звука мала по сравнению с упомянутым выше расстоянием между микрофонами (см. приложенный рисунок).

Определенному значению эффективного расстояния между акустическими центрами микрофонов интенсивметрического зонда соответствует определенный верхний предел частоты, выше которого существенно увеличивается суммарная систематическая погрешность. Для сохранения непревышающей 1 дБ суммарной погрешности длина волны исследу-



емого звука должна по меньшей мере в шесть раз превышать упомянутое выше расстояние, определенное используемой распорной деталью интенсивметрического зонда. Для интенсивметрических зондов фирмы Брюль и Кьер с их стандартными распорными деталями действительны следующие значения верхнего предела частоты:

50мм: макс. 1,25 кГц

12мм: макс. 5 кГц

6мм: макс. 10 кГц

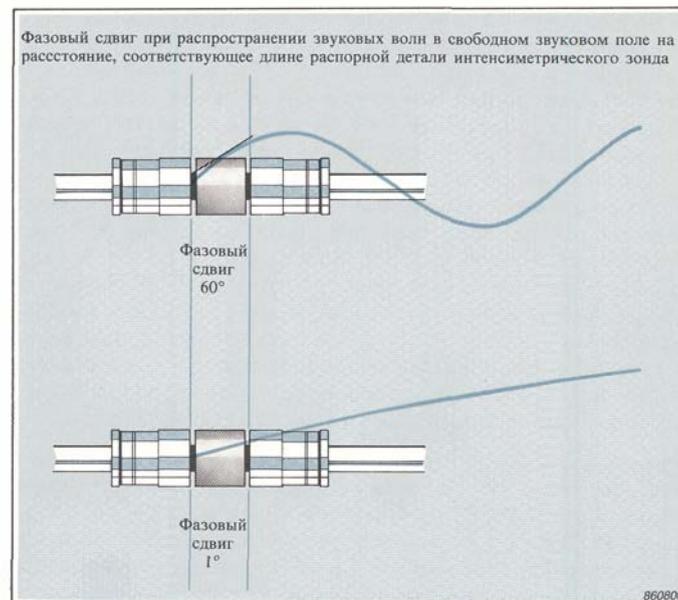
Нижний предел частоты:

погрешности из-за рассогласования фазовых характеристик

Погрешности, обусловленные рассогласованием фазовых характеристик обоих каналов используемой интенсивметрической аппаратуры, определяют нижний предел частоты при интенсивметрических измерениях. При изложении материала в данной брошюре термином фаза был обозначен сдвиг по фазе между звуковым давлением и колебательной скоростью частиц. На данном месте этот термин используется в смысле фазового сдвига волны в зависимости от *времени* или *расстояния*. Одна длина волны может быть представлена сдвигом на 360° . Расстояние между микрофонами интенсивметрического зонда можно отнести к доли длины звуковой волны или к фазовому сдвигу между соответствующими точками. Интенсивность звука непосредственно связана с этим фазовым сдвигом. Отсутствие изменения фазы равносильно отсутствию распространения звука и, следовательно, нулевой интенсивности звука.

Фазовый сдвиг также связан с временем, на протяжении которого звуковая волна распространяется на расстояние между акустическими центрами микрофонов интенсивметриче-

ского зонда. Обеспечение временного разделения является основным условием правильного измерения интенсивности звука. Однако, характерной для всякого рода интенсивметрической аппаратуры является небольшая временная задержка между обоими каналами. Эта задержка обуславливает небольшой фазовый сдвиг, присутствие которого является причиной определенных погрешностей. Эти погрешности называются погрешностями из-за несовпадения по фазе. В случае качественной интенсивметрической аппаратуры (зонда и анализатора) можно в качестве консервативной оценки



принять значение $\pm 0,3^\circ$. Суммарная погрешность из-за несовпадения по фазе является систематической погрешностью и приводит к тому, что в зависимости от ее знака получаемые результаты измерений меньше или больше истинных значений интенсивности звука. Для сохранения непревышающей 1 дБ суммарной погрешности сдвиг фазы на расстоянии, соответствующем расстоянию между акустическими центрами микрофонов интенсивметрического зонда, должен по меньшей мере в пять раз превышать значение упомянутого выше несовпадения по фазе.

Для минимальной погрешности в области высоких частот длина волны исследуемого звука должна по меньшей мере в шесть раз превышать определенное используемой распорной деталью интенсивметрического зонда расстояние между акустическими центрами микрофонов. В таком случае длина распорной детали соответствует прибл. 1/6 длины звуковой волны и соответствующий фазовый сдвиг составляет прибл. 60° . Разумеется, что потом можно пренебречь погрешностью порядка $\pm 0,3^\circ$. Другое справедливо в области низких частот. Например, длина волны звука с частотой 63 Гц равна прибл. 5,5 м. Фазовый сдвиг, соответствующий распорной детали длиной 12 мм, в таком случае равен всего $0,8^\circ$. Следовательно, погрешность из-за несовпадения по фазе, составляющая $+ 0,3^\circ$, в данном случае приведет к большим ошибкам в результатах интенсивметрических измерений.

Рассмотрим теперь применение распорной детали, длина которой превышает указанное выше значение. В случае распорной детали длиной 50 мм, т.е. детали, длина которой прибл. в четыре раза превышает длину упомянутой распорной детали (12 мм), фазовый сдвиг равен $3,3^\circ$ (т.е. прибл. в четыре раза больше упомянутого значения $0,8^\circ$) и поэтому погрешность результатов интенсивметрических измерений

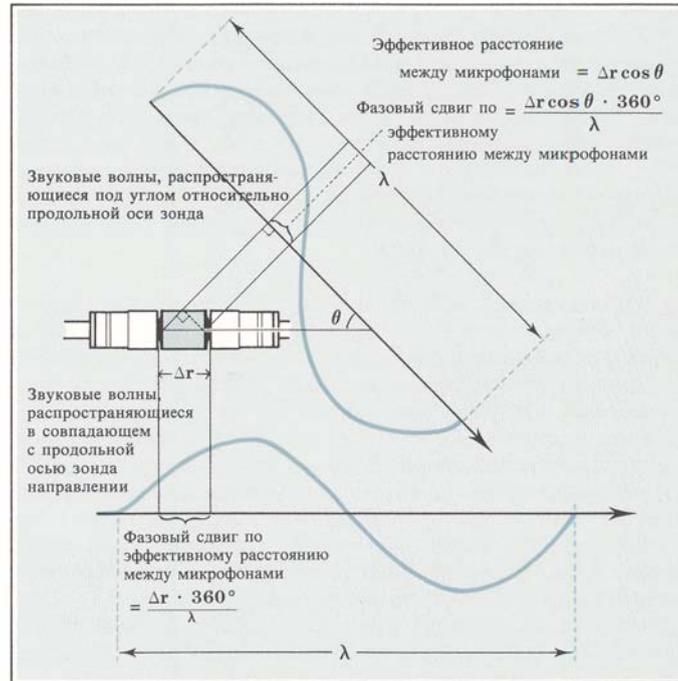
можно считать приемлемой. По существу, уменьшение погрешности из-за несовпадения по фазе является главной причиной применения относительно больших распорных деталей при интенсивметрических измерениях в области низких частот. Отметим, что приведенные выше в качестве примеров значения погрешностей действительны лишь в условиях свободного звукового поля при распространении звуковых волн в направлении, совпадающем с продольной осью интенсивметрического зонда. В общем, фазовый сдвиг уменьшается по мере роста угла падения звуковых волн и меньше указанных значений в реактивных и диффузных звуковых полях. К счастью, определение фазового сдвига не является лишь вопросом догадок или приближенной оценки. Более точные методы излагаются ниже.

Показатель давление-интенсивность и фаза

Фазовый сдвиг уменьшается по мере роста угла между направлением падения звуковых волн и продольной осью интенсиметрического зонда. Другими словами, росту этого угла соответствует уменьшение эффективного расстояния между акустическими центрами микрофонов зонда. Увеличение упомянутого угла (уменьшение фазового сдвига) приводит к уменьшению интенсивности звука, соответствующему умножению на фактор $\cos \theta$. Однако, изменения угла падения звуковых волн вообще не сказываются на звуковом давлении. Эта скалярная величина сохраняет неизменное значение. Следовательно, увеличение угла падения звуковых волн приводит к увеличению разности между уровнями интенсивности звука и звукового давления. Поэтому увеличивается и влияние погрешностей из-за рассогласования фазовых характеристик и в результате сужается диапазон частот, в котором можно с приемлемой погрешностью проводить интенсиметрические измерения.

Разность между интенсивностью звука и звуковым давлением также встречается в реактивных и диффузных звуковых полях, в которых интенсивность звука может принимать малые значения даже при больших значениях звукового давления. Соответствующий параметр называется показателем давление-интенсивность, который дается разностью уровней звукового давления и интенсивности звука.

Показатель давление-интенсивность является важным индикатором степени точности интенсиметрических измерений. Важность этого параметра дана его связью с фазовым сдвигом, соответствующим данному длине распорной детали интенсиметрического зонда расстоянию. На основе результатов измерений можно определить показатель давление-интенсивность и соответствующий фазовый сдвиг. Пу-



$$L_1 - L_p + 10 \log_{10} \left(\frac{\rho c}{400} \right) = 10 \log_{10} \left(\frac{\lambda}{\Delta r} \cdot \frac{\phi}{360^\circ} \right)$$

$L_1 - L_p$ – измеряемый показатель давление-интенсивность

ϕ – фазовый сдвиг по эффективному расстоянию между микрофонами Δr

$10 \log_{10} \left(\frac{\rho c}{400} \right)$ – поправочный член, которым обычно можно пренебречь

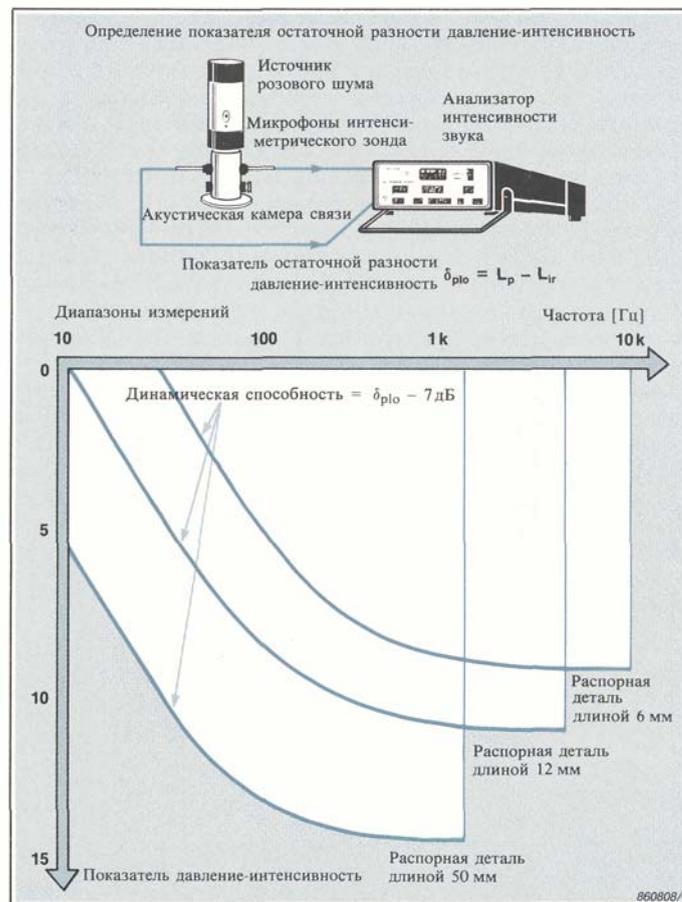
860793/1

тем сопоставления значения последнего со значением несоответствия по фазе можно оценить ошибку в результатах интенсивметрических измерений. Формула, по которой определяется значение фазового сдвига в градусах, приведена снизу рисунка. При помощи этой формулы можно сделать заключение о том, если погрешность из-за несоответствия по фазе значительна по отношению к фазовому сдвигу, соответствующему данному длине распорной детали интенсивметрического зонда расстоянию.

В общем звуковом поле фазовый сдвиг принимает различные значения в различных точках. С точки зрения теории в таком случае необходимо определять показатель давление-интенсивность во всех точках замера интенсивности звука. Однако, на практике обычно достаточно определить среднее *глобальное* значение, т.е. значение разности общего уровня звукового давления и среднего по пространству уровня интенсивности звука. Результат в большинстве практических случаев является достаточным индикатором степени точности интенсивметрических измерений.

Показатель остаточной разности давление-интенсивность и динамическая способность

На данном месте нужно приступить к количественному выражению рассогласования фазовых характеристик. Показатель давление-интенсивность описывает фазовый сдвиг, соответствующий данному длине распорной детали интенсивметрического зонда расстоянию между акустическими центрами его микрофонов. Аналогичным образом можно рассогласование фазовых характеристик каналов интенсивметрической аппаратуры описать при помощи *показателя остаточной разности давление-интенсивность*.



Интенсиметрическая аппаратура должна определить нулевое значение интенсивности звука при подаче идентичного акустического сигнала на оба микрофона используемого зонда. Однако, это предположение является идеальным, а на практике рассогласование фазовых характеристик каналов интенсиметрической аппаратуры всегда приводит к некоторой разности обрабатываемых сигналов и, следовательно, к определению ненулевого значения интенсивности звука. Эту остаточную интенсивность звука можно приравнять к определенному шумом порогу, т.е. нижнему пределу рабочего динамического диапазона, ниже которого аппаратура не способна измерять интенсивность звука. Этот предел не является фиксированным, а изменяется в зависимости от уровня звукового давления. Однако, разность уровней звукового давления и интенсивности звука вообще не изменяется при подаче идентичного акустического сигнала на оба микрофона используемого интенсиметрического зонда. Упомянутая разность называется показателем остаточной разности давление-интенсивность, на основе которого можно определить значение выраженного в градусах и обусловленного рассогласованием фазовых характеристик отклонения. Формула, используемая при определении этого значения, приведена снизу предыдущего рисунка.

Присущее используемой интенсиметрической аппаратуре значение показателя остаточной разности давление-интенсивность можно определить по результатам измерений в акустической камере связи, в которой на оба микрофона интенсиметрического зонда подается идентичный акустический сигнал. Для сохранения не превышающей 1дБ общей погрешности результатов интенсиметрических измерений необходимо, чтобы выраженный в градусах фазовый сдвиг, соответствующий данному длиной распорной детали интенсиметрического зонда расстоянию между акустическими центрами его микрофонов, в пять раз превышал выраженное в градусах отклонение, обусловленное рассогласованием фазовых характеристик каналов используемой интенсиметрической аппаратуры. Это требование равносильно требованию, согласно которому значение показателя давление-интенсивность должно быть на 7 дБ меньше значения показателя остаточной разности давление-интенсивность. Следовательно, путем вычитания 7 дБ из значения показателя остаточной разности давление-интенсивность можно определить *динамическую способность*, определяющую предел показателя давление-интенсивность с учетом сохранения заданной погрешности интенсиметрических измерений. Теперь имеется возможность создания и графического представления присущих отдельным распорным деталям границ, определяющих пределы показателя давление-интенсивность и частоты, т.е. диапазоны, в которых возможны интенсиметрические измерения с не превышающей заданное значение общей погрешностью. Верхний предел установлен погрешностями, обусловленными конечно-разностной аппроксимацией. Динамическая способность определяет предел показателя давление-интенсивность и нижний предел частоты. Примеры таких диапазонов и пределов показаны на приложенном рисунке.

Дополнительная литература

Акустическая интенсиметрия является прогрессивной областью, которая в течение последних лет быстро продвинулась и расширилась. Быстрый прогресс в этой области привел к все растущему количеству соответствующей технической литературы. Перечень более 60 работ, относящихся к акустической интенсиметрии и соответствующим темам, дается в изданной фирмой Брюль и Кьер публикации «Опорная литература - интенсивность звука и относящиеся к ней темы» ВА 0072-14 (1988г.). Другие статьи содержатся в трудах акустических конференций и конгрессов.

Фирма Брюль и Кьер находится на передовой позиции в области акустической интенсиметрии и непрерывно ведет исследования, разрабатывает новые и улучшает внедренные методы и открывает новые области применения соответствующей техники. Достижения в области акустической интенсиметрии описываются в кратких брошюрах, систематически издаваемых фирмой Брюль и Кьер.

Принципы и математическое обоснование акустической интенсиметрии

S. GADE.

"Sound Intensity (Part I Theory)." *Bruel&Kjaer Technical Review* 3, 3-39 (1982).

S. GADE.

"Sound Intensity (Part 2 Instrumentation and Applications)." *Bruel&Kjxr Technical Review* 4, 3-32 (1982).

S. GADE.

"Sound Intensity and its Application in Noise Control." *Sound and Vibration* March, 14-26 (1985).

История акустической интенсиметрии

C. F. CLAPP & F. A. FIRESTONE.

"The Acoustic Watt Meter — An Instrument for Measuring Sound Energy Flow." *J. Acoust. Soc. Am.* 13, 124-136 (1941).

H. F. OLSON.

"System Responsive to the Energy Flow of Sound Waves." *U.S. Patent No. 1,892,644* (1932).

T.J. SCHULTZ.

"Acoustic Wattmeter." *J. Acoust. Soc. Am.* 28, 693-699 (1956).

Современные формулировки

J. Y. CHUNG.

"Cross-Spectral Method of Measuring Acoustic Intensity Without Error Caused by Instrument Phase Mismatch." *J. Acoust. Soc. Am.* 64, 1613-1616 (1978).

F.J.FAHV.

"Measurement of Acoustic Intensity Using the Cross-Spectral Density of Two Microphone Signals." *J. Acoust. Soc. Am.* 62, 1057-1059 (Letter) (1977).

Области и примеры применения

ПУБЛИКАЦИИ ФИРМЫ БРЮЛЬ И КЪЕР

"Intensity Measurements." Collection of papers. BA7196 (1988).

B. FORSSEN & M. J. CROCKER.

"Estimation of Acoustic Velocity, Surface Velocity and Radiation Efficiency by use of the Two-Microphone Technique." *J. Acoust. Soc. Am.* 73, 1047-1053 (1983).

K. B. GINN & R. UPTON.

"Business Machines Measurements Using Sound Intensity." *Bruel&Kjær Application Note* BO 0126 (1986).

R. E. HALLIWELL & A. C. C. WARNOCK.

"Sound Transmission Loss: Comparison of Conventional Techniques with Sound Intensity Techniques." *J. Acoust. Soc. Am.* 77, 2094-2103.

P. KRUPPA.

"Measurement of Structural Intensity in Building Constructions." *Applied Acoustics* 19(1986)61-74.

T. G. NIELSEN.

"Intensity Measurement in Building Acoustics." *Briel & Kjaer Application Note* BO 0147 (1986).

T. G. NIELSEN & E. WALTON.

"Sound Power Determination of Household Appliances on the Production Line." *Bruel & Kjaer Application Note* BOOMS (1986).

J. PEKKINEN, HALTON OY, J. NUOTIO & K. B. GINN.

"Sound Insulation of Ventilation Elements using Sound Intensity Techniques." *Briel & Kjaer Application Note* BO 0151 (1986).

P. RASMUSSEN & T. L. MÖLLER

"Gated Sound-Intensity Measurements on a Diesel Engine." *BTiel&Kjisi Application Note* BO 0203 (1987).

B. G. van ZVL, P. J. ERASMUS & G. J. J. van der MERWE.

"Determination of Sound Reduction Indices in the Presence of Flanking Transmission." *Applied Acoustics* 19(1986)25-39.

M. L. S. VERCAMMEN, H. J. MARTIN & W. CORNELISSEN

"Application of the Intensity Measurement Technique to Building Acoustics and the Influence of an Absorbing Partition Wall on the Measured Intensity." *Applied Acoustics* 23(1988)45-62.

U. WILLOWS, J. HALD & K. B. GINN

"Acoustical Testing of a Diesel Engine using STSF." *Bruel&KjiBT Application Note* BO 0185 (1987).

Труды конференций

Proc. 1st. International Congress on Recent Developments in Acoustic Intensity Measurement., *CETIM, Senlis, France* (1981).

Proc. 2nd. International Congress on Recent Developments in Acoustic Intensity Measurement., *CETIM, Senlis, France* (1985).

Proc. Symposium on Acoustic Intensity, *Tokyo, Japan* (1987).

Статьи, посвященные акустической интенсиметрии, также содержатся в трудах конференций **INTER-NOISE** (начиная с 1978 г.).

Погрешности интенсивметрических измерений

S. GADE.

"**The Validity of Intensity Measurements.**" *Briel&Kjaer Technical Review* 4, 3-31 (1985).

A. F. SEVBERT.

"**Statistical Errors in Acoustic Intensity Measurements.**" *J. Sound Vib.* 75, 519-526 (1981).

P. S. WATKINSON.

"**The Practical Assessment of Errors in Sound Intensity Measurement.**" *J. Sound Vib.* 105, 255-263 (1986).

Документы ИСО

ISO 3740-3746.

"**Determination of Sound Power Levels of Noise Sources.**" See also ANSI S.1 31-36.

ISO 140/1-5.

"**Measurement of Sound Insulation in Buildings and of Building Elements.**" See also ANSI/ASTM E 336-77.

Мы надеемся, что данная брошюра является практическим введением в область акустической интенсивметрии и дает ответы на многие вопросы, относящиеся к этой области, и что она найдет применение в качестве практического пособия. За советами по вопросам акустической интенсивметрии и соответствующей аппаратуры можно обращаться к местным представительствам фирмы Брюль и Кьер или письменно по адресу

Брюль и Кьер
2850 Нэрум
Дания