

Министерство образования и науки РФ

Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет “ЛЭТИ”

АКУСТИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Учебное пособие

Санкт-Петербург
Издательство СПбГЭТУ “ЛЭТИ”
2004

УДК 331.432:534.831
ББК 22.32н
А 443

Авторы: В. А. Буканин, В. Н. Павлов, С. В. Петухова, А. О. Трусков.

А 443 Акустическая безопасность: Учеб. пособие / Под ред. В. Н. Павлова.
СПб.: Изд-во СПбГЭТУ “ЛЭТИ”, 2004. 84 с.

ISBN 5–7629–0583–7

Рассматриваются акустические и виброакустические опасные и вредные факторы среды обитания человека как в производственных условиях, так и в обычной жизни и деятельности. Дается характеристика инфразвука, вибрации, шума и ультразвука, приводятся сведения об источниках их возникновения, воздействии на организм и возможных отрицательных последствиях, в результате которых могут возникать как специфические заболевания – шумовая и вибрационная болезни, так и некоторые неспецифические проявления, не связанные с указанными болезнями. Рассматриваются критерии нормирования и основные нормативные требования по ограничению воздействия этих факторов на человека, регламентированные государственными стандартами, санитарными нормами и гигиеническими нормативами. Приводятся принципы снижения шума, ультразвука и инфразвука и практические рекомендации по расчёту параметров уменьшения акустических воздействий и защите в источнике образования, на пути распространения и в самом приёмнике.

Предназначено для студентов всех специальностей СПбГЭТУ “ЛЭТИ”.

УДК 331.432:534.831
ББК 22.32н

Рецензенты: кафедра безопасности жизнедеятельности СПбГТУ;
д-р техн. наук О. Н. Русак (СПбЛТА).

Утверждено
редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия

ISBN 5–7629–0583–7

© СПбГЭТУ “ЛЭТИ”, 2004

ВВЕДЕНИЕ

На человека воздействует большое число разнообразных по природе опасных и вредных физических факторов среды обитания, особое место среди которых занимают виброакустические факторы (шум и вибрация). Шум воспринимается с помощью органов слуха через ушные раковины или кости черепной коробки. Вибрация, воспринимаемая кожей человека или опорными поверхностями, передаётся через них и кости всему телу человека. При больших уровнях звука человек может получить акустическую травму, т. е. повреждение органов слуха, вызванное действием звуков чрезмерной силы. Акустическая травма может стать причиной понижения слуха и даже глухоты. Одновременное действие звука и вибрации может привести к виброакустической травме – как к повреждению органов слуха, так и к патологическим изменениям в тканях и органах.

Согласно мнению ряда учёных, занимающихся проблемами безопасности жизни и деятельности, в России 40 % рабочих мест не соответствуют гигиеническим нормам по шуму, а заболевания, связанные с виброакустическими факторами (шумовая болезнь и другие болезни органов слуха, а также вибрационная болезнь), составляют, соответственно, 12 и 25...26 % от всех профессиональных болезней.

Во многих случаях вибрация природных или технических систем вызывает шум, поэтому чаще всего эти вредные или опасные факторы, а также защита от них рассматриваются совместно. Сократив вибрацию в источнике или на пути распространения, можно значительно уменьшить и шум. Вопросы акустической или виброакустической безопасности занимают многие коллективы исследователей и конструкторов при разработке новой техники или усовершенствовании уже имеющейся, технологи производственных процессов и эксплуатационные службы. Тем не менее, знать основы акустической и виброакустической безопасности полезно всем, не зависимо от того, какой деятельностью человек занимается.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Инфразвук – звуковые колебания и волны с частотами, лежащими ниже полосы слышимых (акустических) частот – 16...20 Гц.

Ультразвук – звуковые колебания и волны с частотами, лежащими выше полосы слышимых (акустических) частот – 20 000 Гц.

Слышимый диапазон звука лежит в пределах 16...20 000 Гц. В соответствии с установившейся в настоящее время терминологией *шумом* называют всякий мешающий, нежелательный звук. Звук как физическое явление представляет собой волновое движение упругой среды; как физиологическое явление он определяется ощущением, воспринимаемым органом слуха при воздействии звуковых волн, слышимых человеком.

Вибрация, или структурный звук, – это периодическое изменение хотя бы одной координатной точки или системы, возникающее в упругих телах или телах, находящихся под действием переменного физического поля. В результате этого воздействия возникают механические колебания (колебательные движения), передающиеся человеку через всё тело или его конечности непосредственно или через упругую среду, например воздух, в виде шума.

Характеристики вибрации, инфразвука, ультразвука и шума

В качестве основных величин, участвующих в измерении и нормировании шума, а также в расчётах по шумоглушению, принимаются *звуковое давление* p , выражаемое в паскалях (Па) или ньютонах на квадратный метр (Н/м^2), $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$ и его *уровень* L , выражаемый в децибелах (дБ). *Звуковое давление* – переменная составляющая давления воздуха или газа, возникающая в результате звуковых колебаний. Звуковое давление p – это разность между мгновенным значением полного давления и средним давлением, которое наблюдается в среде при отсутствии звукового поля. Так, например, в воздухе на атмосферное давление, составляющее примерно 10^5 Па, накладывается звуковое давление источников звука или шума.

Уровнем звукового давления L называется величина, определяемая выражением

$$L = 20 \lg \frac{p_{\text{ср}}}{p_0},$$

где $p_{\text{ср}}$ – среднеквадратическое значение звукового давления в точке измерения, $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Па – пороговое значение звукового давления.

Ухо человека воспринимает среднеквадратическое звуковое давление на интервале $\tau = 30 \dots 40$ мс (период осреднения):

$$p_{\text{ср}} = \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_t^{t+\tau} p^2(t) dt},$$

где t – текущее время; $p(t)$ – текущее значение переменного звукового давления.

Децибел – единица измерения (десятая часть бела), названная в честь знаменитого изобретателя телефона Белла.

Пороговое значение звукового давления – это условно выбранное и принятое по международному соглашению значение звукового давления едва слышимого молодым человеком звука на частоте 1000 Гц. При данных условиях значение звукового давления будет соответствовать 0 дБ.

Акустическая мощность P , Вт, – характеристика источника шума, не зависящая от места расположения точки измерения, направленности излучения и условий распространения звуковых волн и определяющая полную

энергию W , излучаемую источником в окружающее пространство за единицу времени. Существует определённое соотношение между уровнем звуковой мощности, интенсивностью звука и уровнем звукового давления. Рассмотрим случай, когда машина со всех сторон окружена некоторой замкнутой поверхностью. Предположив, что направление распространения волн в любой точке на поверхности перпендикулярно к этой поверхности и что звуковая волна может рассматриваться как плоская либо сферическая, полную звуковую мощность, излучаемую машиной, найдём по выражению

$$P = \int_S I_i dS = \int_S \frac{p_i^2}{\rho c} dS_i ,$$

где I – интенсивность звука, Вт/м²; S – площадь всей поверхности, м²; p_i – звуковое давление на i -й элементарной площадке dS_i ; ρ – удельная плотность воздуха, кг/м³; c – скорость звука (в воздухе примерно 340 м/с).

Если уровень звукового давления выражать через интенсивность или звуковую мощность, то L определяется выражениями

$$L = 10 \lg \frac{I}{I_0} \text{ или } L = 10 \lg \frac{P}{P_0} ,$$

где $I_0=10^{-12}$ Вт/м² и $P_0=10^{-12}$ Вт – пороговые значения интенсивности и звуковой мощности, соответственно.

Параметры инфразвука и ультразвука, передающихся воздушным путём, не отличаются от параметров шума.

Колебательные перемещения объекта при вибрации включают в себя попеременно скорость в одном, а затем в обратном направлении. Такое изменение скорости означает, что объект находится в постоянном ускорении сначала в одном, а затем в обратном направлении. Вибрация может характеризоваться *амплитудными значениями перемещения d , скорости v и ускорения a* . Для ускорения синусоидального движения, значение виброускорения может рассчитываться исходя из частоты f , Гц, и смещения d , м: $a = d(2\pi f)^2$. Данное выражение может использоваться для преобразования измерений ускорения в смещения, но оно является точным только тогда, когда колебания происходят с одинаковой частотой.

Частота вибрации влияет на степень передачи вибрации телу (например, поверхности стула или ручке вибрационного инструмента), степень передачи через тело (например, от стула голове), а также последствия вибрации для организма. Отношение между смещением и ускорением движения также зависит от частоты колебаний: смещение на один миллиметр соответствует очень низкому ускорению при низких частотах, а не очень высокому ускорению при высоких частотах; смещение при вибрации, заметное человеческому глазу, не даёт возможности выявить ускорение вибрации.

Параметрами вибрации являются средние квадратические значения *виброскорости* v и *виброускорения* a или их *логарифмические уровни* L_v , L_a , дБ, определяемые соотношениями

$$L_v = 20 \lg \frac{v}{v_0}, \quad L_a = 20 \lg \frac{a}{a_0},$$

где v – среднее квадратическое значение виброскорости, м/с; $v_0 = 5 \cdot 10^{-8}$ – опорное значение виброскорости, м/с; a – среднее квадратическое значение виброускорения, м/с²; $a_0 = 10^{-6}$ – опорное значение виброускорения, м/с².

Параметрами контактного ультразвука являются пиковые значения виброскорости v или её логарифмические уровни L_v , определяемые по формуле

$$L_v = 20 \lg v/v_0,$$

где v – пиковое значение виброскорости, м/с; $v_0 = 5 \cdot 10^{-8}$ м/с – опорное значение виброскорости.

ШУМ

Классификация шума и воздействие его на человека

Если первоначально считалось, что следствием воздействия интенсивного шума является только ухудшение слуха, то теперь в результате более глубоких исследований установлено, что слух является лишь “воротами”, через которые шум проникает в организм. При этом повышается кровяное и внутричерепное давление, нарушается острота зрения, у работающих на шумных производствах наблюдается высокий процент нервных и сердечно-сосудистых заболеваний. В медицинской литературе существует специальный термин “шумовая болезнь”. Кроме того, при действии интенсивного шума у человека ослабляется внимание, замедляется скорость психических реакций, что способствует росту брака и уменьшению производительности труда.

Даже в отношении воздействия на человека шума малой интенсивности, не вызывающего шумовой болезни, в последнее время появилась концепция обременительности шума.

Особенности слухового восприятия шума

Человеческое ухо как приёмник звука с широкими частотными и динамическими диапазонами является сложно устроенным органом равновесия, воспринимающим положения тела (головы) при его перемещении в пространстве, и органом слуха. Оно состоит из трёх частей: a – наружного, b –

среднего, *в* – внутреннего уха; наружное ухо расположено снаружи черепа, в то время как среднее и внутреннее ухо находятся в височной части черепа (рис. 1).

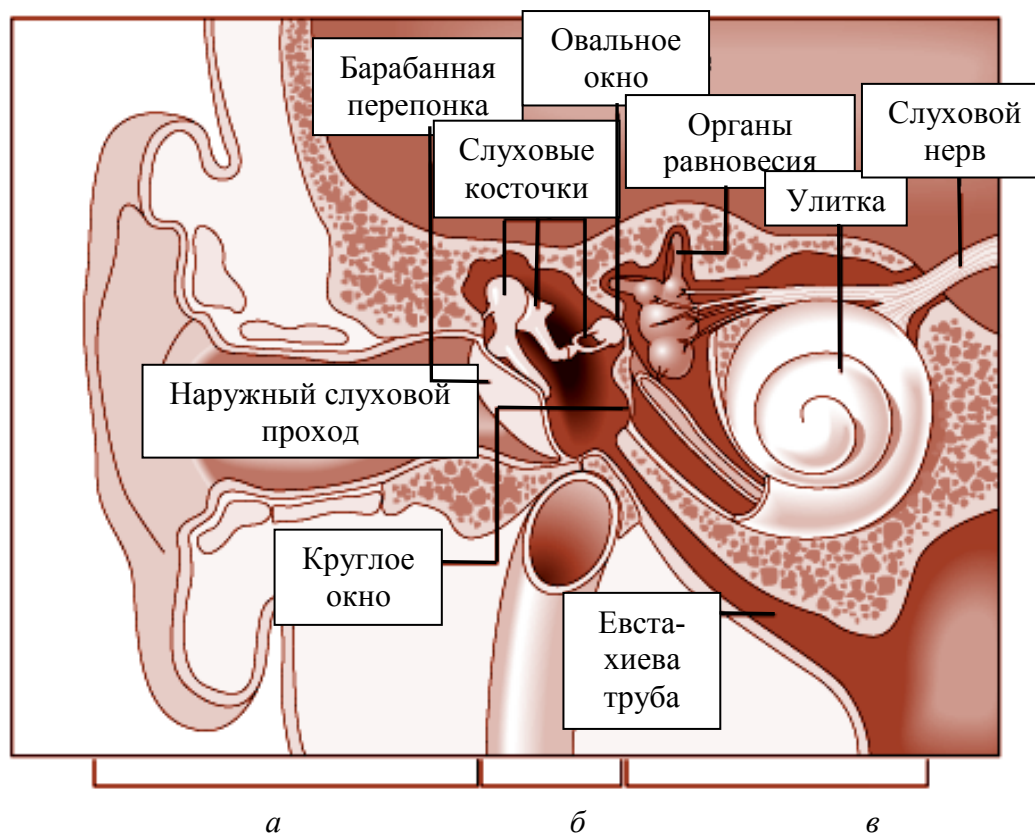


Рис. 1. Схематическое изображение уха

Наружное ухо отделяется от среднего барабанной перепонкой, которая представляет собой тонкую, прозрачную пластинку, покрытую снаружи эпидермисом (кожным слоем), а изнутри – слизистой оболочкой. Среднее ухо включает выстланную слизистой оболочкой и заполненную воздухом барабанную полость и слуховую (евстахиеву) трубу, которые поддерживают равновесное давление по обеим сторонам барабанной перепонки. Это объясняет, например, каким образом глотание способствует выравниванию давления и восстановлению потери остроты слуха, вызванной резким изменением барометрического давления (например, в самолетах, заходящих на посадку, либо в кабине быстро движущегося лифта). В барабанной полости располагаются три слуховые косточки – молоточек, наковальня и стремя. Регулируют движения косточек две мышцы, прикрепляющиеся к слуховым косточкам: мышца, напрягающая барабанную перепонку, и стременная мышца, а также миниатюрные суставы. Косточки, соединяясь между собой, образуют цепочку от барабанной перепонки до преддверия, открывающегося во внутреннее

ухо. Посредством этой подвижной цепочки колебания барабанной перепонки, возникшие от воздействия звуковой волны, передаются в окно преддверия. Внутреннее ухо содержит сенсорный аппарат. Оно состоит из костного лабиринта и вставленного в него перепончатого лабиринта, представляющего собой ряд полостей (мешочков), соединённых друг с другом при помощи тонких протоков, формирующих замкнутую систему, заполненную эндолимфой (обогащённой калием жидкостью). Перепончатый лабиринт отделён от костного перилимфатическим пространством, наполненным перилимфой (жидкостью, обогащённой натрием).

Костный лабиринт состоит из двух частей, разделённых преддверием. Спереди от преддверия находится часть, известная под названием “улитка”, которая фактически является органом слуха (рис. 2). Она имеет спиралевидную форму, напоминающую раковину улитки и расположенную острым концом вперёд. Внутри перепончатого лабиринта улитки (улиткового протока), на спиральной мембране, располагается слуховой спиральный орган – кортиев орган, ответственный за преобразование акустических сигналов.

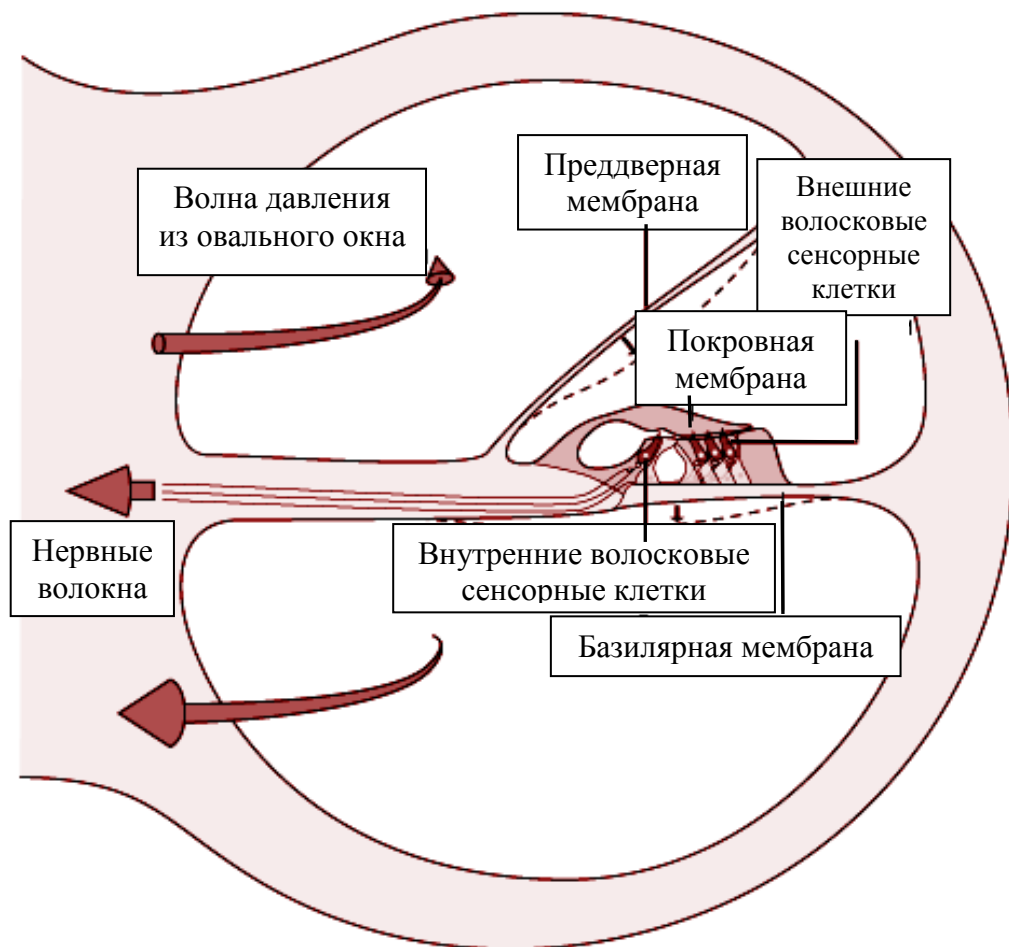


Рис. 2. Поперечный срез петли улитки ($d \approx 1.5$ мм)

В основе кортиева органа лежит базилярная пластинка, которая содержит тонкие коллагеновые волокна, выполняющие роль струн-резонаторов. На базилярной пластинке расположены поддерживающие (опорные) и рецепторные волосковые (сенсорные) клетки, воспринимающие механические колебания перилимфы, находящейся в лестнице преддверия и в барабанной лестнице. Вся слуховая информация преобразуется при помощи 15 000 рецепторных волосковых (сенсорных) клеток кортиева органа, которые включают так называемые внутренние волосковые сенсорные клетки количеством 3 500 единиц, являющиеся наиболее важными, так как они формируют синапсы с 90 % из 30 000 основных слуховых нейронов.

Внутренние и внешние волосковые сенсорные клетки отделены друг от друга обильным слоем поддерживающих клеток. Пересекая необычно тонкую оболочку, реснички волосковых клеток внедряются в покровную перепонку, свободный конец которой расположен над клетками. Верхняя поверхность улиткового протока сформирована оболочкой Реисснера.

Корковый центр слуха находится в коре верхней височной извилины. Здесь производится высший анализ нервных импульсов, поступающих из звуковоспринимающего аппарата.

Ухо состоит из проводника звука (наружное и среднее ухо) и звукового рецептора (внутреннее ухо). Колебания барабанной перепонки, возникшие в результате воздействия на неё звуковой волны, при помощи подвижной в суставах цепочки из трёх слуховых косточек – молоточка, наковальни и стремени передаются в окно преддверия, в котором основание стремени подвижно закреплено. Поверхностная часть барабанной перепонки почти в 16 раз больше поверхностной части основания стремени, и это в комбинации с рычажным механизмом косточек вызывает 22-кратное усиление звукового давления. В среднем ухе показатель скорости передачи звуковой волны располагается оптимально в пределах от 1000 до 2000 Гц. Движения основания стремени в окне преддверия вызывают колебания перилимфы и передаются базилярной пластинке, распространяясь от лестницы преддверия в сторону купола улитки, а затем через отверстие улитки – на перилимфу в барабанной лестнице, закрытой в основании улитки вторичной барабанной перепонкой, которая достаточно эластична. Так как перилимфа практически несжимаема, каждое движение основания стремени внутрь вызывает эквивалентное перемещение этой перепонки наружу, в направлении среднего уха.

При воздействии высоких уровней звука, стремени мышца сокращается, защищая, таким образом, внутреннее ухо (рефлекс затухания), и совместно с другими мышцами среднего уха также расширяет динамический диапазон уха, улучшая локализацию звука, снижая резонанс в среднем ухе, контролируя давление воздуха в среднем ухе и давление жидкости во внутреннем ухе.

Скорость, с которой звуковые волны проходят через ухо, зависит от упругости базилярной пластинки. При увеличении упругости, скорость распространения волны от основания улитки до её верхушки падает. Передача энергии вибрации на мембрану Рейсснера и базилярную пластинку зависит от частоты волны. На высоких частотах амплитуда волны наиболее высока у основания улитки, в то время как для более низких частот она имеет максимальное значение у верхушки. Таким образом, точка наибольшего механического возбуждения в улитке зависит от частоты волны. Этот феномен лежит в основе способности различения частот. Движение базилярной мембраны стимулирует усиление движения стереоресничек волосковых клеток и вызывает ряд механических, электрических и биохимических явлений, ответственных за процесс механически-сенсорного преобразования и начальную обработку акустического сигнала. Усиление движения стереоресничек открывает ионные каналы в клеточных мембранах, изменяя их проницаемость и позволяя ионам калия проникать в клетки. Этот приток ионов вызывает деполяризацию и генерирует биопотенциал. В результате деполяризации медиаторы, выделенные в синапсах внутренних волосковых клеток, вызывают нейронные импульсы, которые перемещаются по центростремительным волокнам улитковой части преддверно-улиткового нерва в направлении к высшим центрам. Интенсивность слухового возбуждения зависит от количества биопотенциалов в единицу времени и от количества стимулированных клеток, в то время как воспринимаемая частота звука зависит от специфических активированных популяций нервных волокон. Имеется определённое пространственное соответствие между частотой звукового стимула и стимулированной частью коры головного мозга.

Внутренние волосковые клетки являются механическими рецепторами, которые преобразуют сигналы, произведенные в ответ на акустическое воздействие, в электрические потенциалы, направляемые центральной нервной системе. Однако они не отвечают за пороговую чувствительность уха и его частотную избирательность. С другой стороны, внешние волосковые клетки не посылают в мозг никаких акустических сигналов. Их функция, скорее, состоит в том, чтобы выборочно усиливать механическую акустическую вибрацию на околопороговых уровнях на коэффициент, значением приблизительно в 100 (т. е. 40 дБ), и таким образом облегчать стимуляцию внутренних волосковых клеток. Считается, что это усиление осуществляется посредством микромеханического соединения с покровной мембраной. Внешние волосковые клетки способны производить больше энергии, чем та, что получена ими от внешних стимулов, и, активно сокращаясь при очень высоких частотах, могут функционировать в качестве улитковых усилителей.

Взаимное влияние внешних и внутренних волосковых клеток во внутреннем ухе создает контур обратной связи, который позволяет контролировать слуховую рецепцию, в особенности пороговую чувствительность и частотную избирательность. Центробежные волокна улитковой части пред-

дверно-улиткового нерва, таким образом, позволяют избежать повреждений улитки, вызываемых интенсивным акустическим воздействием. Внешние волосковые клетки могут сокращаться также при интенсивном воздействии. Рефлекс затухания в среднем ухе активируется, прежде всего, при низких частотах, а рефлекс сжатия во внутреннем ухе – при высоких частотах, и таким образом данные рефлексy дополняют друг друга.

Звуковые волны могут передаваться через черепную коробку. Здесь возможны два механизма передачи. В первом случае волны сжатия, воздействуя на кости черепа, заставляют практически несжимаемую перилимфу деформировать круглое или овальное окно. Поскольку эти окна различаются по упругости, смещение эндолимфы вызывает смещение базилярной мембраны. Второй механизм основан на том факте, что смещение костей стимулирует лишь смещение в лестнице преддверия. В этом механизме перемещение базилярной мембраны вызвано поступательным движением, производимым инерцией.

Костная проводимость обычно на 30...50 дБ ниже, чем проводимость воздуха, что можно легко заметить, когда оба уха закрыты. Однако это является верным лишь для воздействия непосредственно через воздух, прямое воздействие через кости ослабляется другим образом.

К сожалению, шум очень часто воспринимается как “неизбежное зло”, как неотъемлемая часть производственного процесса. Вредные шумы не являются причиной кровотечений, не ведут к переломам, не вызывают повреждения тканей, поэтому у рабочих, перетерпевших шумовое воздействие первые несколько дней или недель, очень часто возникает ощущение “привыкания” к шуму. В большинстве же случаев происходит следующее: у человека наблюдается временная потеря слуха, которая притупляет его способность слышать во время рабочего дня, но эта способность восстанавливается за ночь. Таким образом, развитие потери слуха таит в себе следующую опасность: человек теряет слух постепенно и, в большинстве своём, незаметно в течение месяцев и лет, пока ослабление слуха не достигает критической отметки.

Потеря слуха – самое частое, и, пожалуй, наиболее серьёзное последствие воздействия шума, но не единственное. Есть и другие – *звон в ушах, нарушение речи*, замедленность восприятия условных сигналов, снижение работоспособности, *раздражительность* и *слуховые галлюцинации*.

Снижение слуха может проходить поэтапно пока оно не достигнет критической точки, так что человек не замечает этого. Первым признаком снижения слуха является то, что становится сложнее воспринимать устную речь, кажется, что люди говорят невнятно. Человек с ухудшением слуха просит собеседников повторить сказанное, часто раздражается. В кругу семьи или друзей он часто повторяет: “Не кричите на меня, я прекрасно все слышу, но не понимаю, о чём вы”. Постоянным предметом споров становится громкий звук работающего на полную мощность телевизора.

Потеря слуха (Presbycusis), которая естественным образом сопутствует процессу старения человека, усугубляется травмами органов слуха, полученными в результате шумового воздействия. В конечном счёте, слух может ухудшиться настолько, что это приведёт к затруднениям в общении с родными и друзьями, повлечёт за собой частичную изоляцию. В некоторых случаях решить проблему помогает слуховой аппарат, но и он не в состоянии восстановить естественную остроту слуха в той же степени, как очки возвращают остроту зрения.

Вызванная шумовым воздействием потеря слуха обычно рассматривается как профессиональное заболевание, а не травма, поскольку развивается постепенно. В редких случаях работник может испытать внезапную и необратимую потерю слуха в ходе события, сопровождаемого чрезвычайно громким звуком типа взрыва, или в ходе процесса, связанного с чрезмерным шумом, типа работы кузнечного молота. Возникшая при таких обстоятельствах потеря слуха квалифицируется иногда как увечье, и для её обозначения используется термин “акустическая травма”. Более распространённым, однако, является постепенное ухудшение слуха, развивающееся на протяжении многих лет. Степень его зависит от уровня шумового воздействия, его продолжительности и восприимчивости к нему каждого конкретного работника. К сожалению, не существует средств лечения профессиональных травм слухового аппарата; возможно только их предотвращение.

Последствия шумового воздействия на слуховой аппарат человека подробно описаны в специальной литературе, и среди ученых практически не существует разногласий по вопросу о том, насколько значительным должно быть постоянное шумовое воздействие, чтобы оно могло привести к той или иной степени потери слуха (ISO 1990). Не подвергается сомнению и тот факт, что потеря слуха может быть вызвана непостоянным шумом. Но чередование периодов шума с периодами тишины даёт внутреннему уху возможность оправиться от временной потери слуха и поэтому является несколько менее опасным, чем постоянный шум. Импульсный шум, типа звуков оружейного огня или штамповки металла, также вреден для слухового аппарата. Имеются даже некоторые доказательства того, что импульсный шум создаёт бóльшую опасность для слухового аппарата, нежели другие типы шумов, однако это не всегда так. Степень повреждения слухового аппарата зависит главным образом от уровня и продолжительности звукового импульса и может возрасти при наличии постоянного фоновых шума. Имеются также подтверждения того, что высокочастотные источники импульсного шума являются более вредными, чем источники шума низкой частоты.

Вызванная шумовым воздействием потеря слуха поначалу часто бывает временной. В ходе шумного дня ухо устаёт, и работник испытывает ухудшение слуха, известное под названием “временный пороговый сдвиг”. Между окончанием одной и началом следующей рабочей смены ухо обычно в значительной степени компенсирует временный пороговый сдвиг, но, за-

частую, не полностью. В результате длящегося несколько дней, месяцев или лет шумового воздействия временный пороговый сдвиг может привести к необратимым последствиям, на которые начинают наслаиваться новые изменения.

Важно понять, что шум на рабочем месте – это не единственная причина потери слуха, и что потеря слуха может произойти по вине источников шума, находящихся вне рабочего места. Эти источники шума создают так называемый *социозвук*, и результаты их воздействия на слуховой аппарат невозможно отличить от профессиональной потери слуха. К социозвуковым источникам шума относятся деревообрабатывающие станки, циркулярные пилы, мотоциклы без глушителя, громкая музыка и огнестрельное оружие. Одним из примеров воздействия такого социозвука является резкое ухудшение слышимости некоторыми молодыми людьми, постоянно носящими магнитофон и слушающими музыку с помощью наушников.

Шум в ушах – явление, которое часто сопутствует как временной, так и постоянной потере слуха, вызванной шумовым воздействием, а также другим типам сенсорно-неврологической потери слуха. Иногда люди говорят, что их больше беспокоит шум в ушах, чем нарушение слуха. Шум в ушах – признак раздражения чувствительных клеток внутреннего уха. Зачастую он является предвестником потери слуха, вызванной шумовыми воздействиями, и должен рассматриваться как важный предупредительный сигнал.

Многие производственные операции могут осуществляться при минимальном общении между работниками. Однако существуют ситуации, например, в работе авиапилотов, машинистов поездов, командиров танковых экипажей, когда общение крайне необходимо. Некоторые из этих специалистов используют электронные системы, подавляющие шум и усиливающие уровень звучания речи. В настоящее время имеются сложные системы связи, некоторые из которых оснащены устройствами, подавляющими посторонние звуковые сигналы, с целью улучшения качества связи.

Во многих случаях рабочим приходится напрягать органы слуха, чтобы понять, несмотря на шумовой фон, смысл адресованного им сообщения, общаться с помощью условных знаков и переходить на крик, что иногда приводит к возникновению хрипоты, узелков на голосовых связках или других повреждений связок в результате их перенапряжения, для устранения которых потребуется медицинская помощь.

Из собственного опыта люди знают, что при уровне звука, превышающем 80 дБА, приходится говорить очень громко, а при уровне свыше 85 дБА – переходить на крик. При шуме, значительно превышающем 95 дБА, для общения необходимо приблизиться друг к другу почти вплотную.

Шум может способствовать снижению безопасности труда. Имеются многочисленные примеры того, как одежда или руки рабочих затягивались механизмами станков, что приводило к серьёзным увечьям, в то время как окружающие не слышали их криков о помощи.

Результаты исследований показали, что шум обычно практически не сказывается на выполнении однообразной, монотонной работы, а в некоторых случаях может даже приводить к увеличению её интенсивности, если шум характеризуется как низкий или умеренный. Высокий уровень звука может снижать интенсивность выполнения работ, особенно если речь идёт о выполнении сложной операции или нескольких операций одновременно. Непостоянный шум обычно представляет собой бóльшую помеху в работе, чем постоянный, особенно если он возникает неожиданно и не поддаётся контролю.

Неслуховые последствия шумового воздействия. Как биологический раздражитель, шум может влиять на всю физиологическую систему. Он воздействует на организм подобно другим раздражителям, вызывая реакцию, которая, в конечном счёте, может привести к нарушениям, известным как “нервные расстройства”. Наиболее веские доказательства имеются по фактам влияния шума на функционирование сердечно-сосудистой системы типа повышения кровяного давления или изменения химического состава крови.

На рабочих местах в промышленном производстве можно идентифицировать следующие четыре ограничения или неблагоприятные ситуации, требующие конкретных мероприятий:

- риск несчастного случая из-за невозможности услышать сигналы тревоги;
- усилия, стресс и тревога как результат проблем со слухом и общением;
- препятствия для социальной интеграции;
- препятствия для служебного роста.

На рабочих местах в промышленном производстве часто используются акустические системы тревоги. Тугоухость, возникшая в результате производственных факторов, может значительно снизить способность работника услышать, узнать или установить местонахождение такой тревоги, особенно на шумных участках с высоким уровнем отражения. На рабочих местах, где используются акустические системы тревоги, люди, у которых имеются проблемы со слухом, должны полагаться и на другие источники информации при выполнении своей работы. Сюда может входить интенсивное визуальное наблюдение и тактичная помощь со стороны коллег по работе. Общение будь то по телефону или на совещаниях или с руководителями в шумных мастерских требует огромных усилий со стороны соответствующих работников и также весьма проблематично для людей, страдающих нарушениями слуховой функции, в условиях промышленного производства.

Физиопатология. Движение ресничек, обусловленное интенсивным акустическим воздействием, может превысить их механическое сопротивление и привести к механическому разрушению волосковых клеток. Поскольку количество клеток ограничено и они не способны к регенерации, любая по-

теря клетки должна рассматриваться в качестве постоянной, и, в том случае если воздействие разрушительного звука продолжается, прогрессирующей. В целом, конечным эффектом повреждения ресничек является дефицит слуха. Допуская очень грубое приближение, можно говорить о том, что разрушение внешних волосковых клеток приводит к повышению слухового порога до 40 дБ.

Шумовое воздействие является наиболее широко распространённым из всех вредных профессиональных воздействий и вторым по мощности фактором (ведущим является старение), вызывающим потерю слуха. И, наконец, нельзя забывать о вкладе, который вносит непрофессиональное шумовое воздействие типа домашних мастерских, чрезмерно усиленных музыкальных звуков (особенно производимых наушниками), применения огнестрельного оружия и т. д.

Шумовое повреждение острого характера. Прямое звуковое воздействие высокой интенсивности (например, при взрыве) предполагает повышение слухового порога, разрыв барабанной перепонки и травматическое повреждение среднего и внутреннего уха (смещение косточек, травмирование улитки или образование свищей). На ранних стадиях увеличение слухового порога носит название *слухового утомления* или *временного смещения порога*, которое имеет полностью обратимый характер, однако продолжается в течение некоторого времени после прекращения воздействия.

Краткосрочное утомление снимается менее чем за две минуты и приводит к максимальному сдвигу слухового порога для частоты воздействия. Долгосрочное утомление характеризуется восстановлением, продолжительностью более двух, но менее 16 ч, условным пределом, полученным в процессе исследований промышленных шумовых воздействий. Слуховое утомление является функцией интенсивности, продолжительности, частоты и непрерывности воздействия. Таким образом, полученные посредством интеграции интенсивности и продолжительности, прерывистые модели воздействия являются для данной дозы шума менее вредными, нежели непрерывные.

Постоянное смещение слухового порога. Воздействие высокоинтенсивного звука в течение нескольких лет может привести к постоянной потере слуха. Это называется *постоянным смещением слухового порога*. С точки зрения анатомии, оно характеризуется дегенерацией волосковых клеток, которая начинается с небольших гистологических изменений, но постепенно переходит в полное разрушение клетки. Потеря слуха, скорее всего, должна затрагивать частоты, по отношению к которым ухо является наиболее чувствительным, поскольку именно при этих частотах передача акустической энергии из внешней среды во внутреннее ухо является оптимальной. Это объясняет, почему потеря слуха при 4 000 Гц является первым признаком шумовой болезни.

Шум, воздействующий на человека от различных природных или техногенных источников, отличается по звуковому давлению на 9 порядков. Ди-

намический диапазон слухового восприятия человека от порога слышимости до болевого порога показан на рис. 3. Каждая точка кривой границы порога слышимости указывает звуковое давление, при котором звук данного значения и частоты воспринимается как едва слышимый. Верхняя кривая является границей болевого порога; точки, расположенные над этой кривой, соответствуют звукам, вызывающим болевое ощущение.

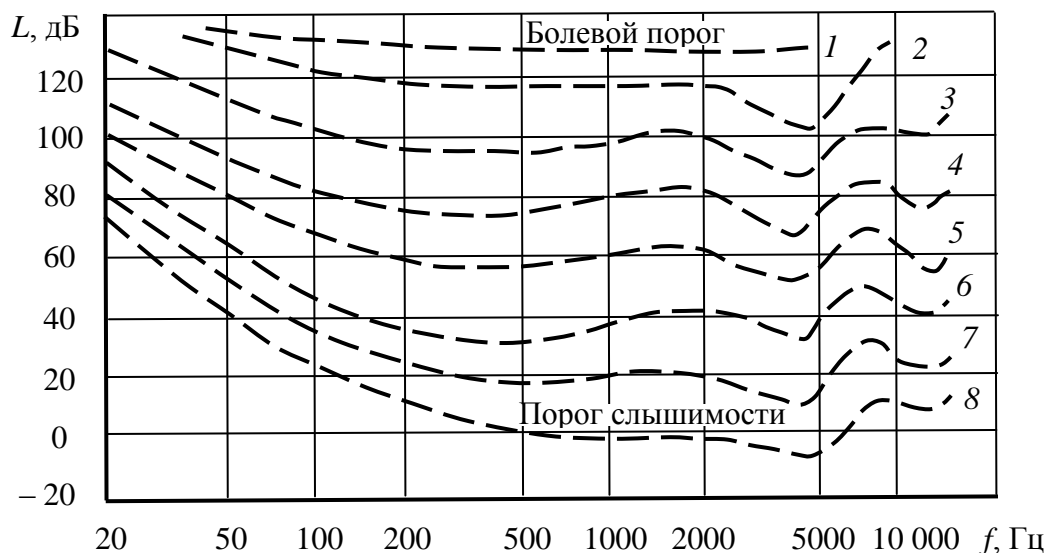


Рис. 3. Кривые равной громкости: 1 – болевого порога;
2–7 – уровней громкости, соответственно, 120, 100, 80, 60, 40 и 20 фон;
8 – слухового порога (порога слышимости)

На рис. 3 между границами болевого порога и порога слышимости построены кривые равной громкости, характеризующие неравномерность частотной характеристики чувствительности человеческого уха. Они построены следующим образом. Если к уху испытуемого с нормальным слухом подвести звук определённой частоты, например 1 000 Гц, и с определённым уровнем звукового давления, например 40 дБ, а к другому уху – звук другой частоты, например 100 Гц, но с регулируемым уровнем, то человек может подобрать такой уровень второго звука, чтобы оба казались на слух равногромкими.

Уровень давления звука частотой 100 Гц измеряется и наносится на график. Аналогично получают уровни звукового давления для других частот. Все полученные таким образом точки соединяются одной кривой и по числу децибел на частоте 1 000 Гц, например 40 дБ, кривая получает название кривой равной громкости в 40 фон. Таким образом, уровень громкости звука в фонах численно равен уровню звукового давления, выраженному в децибелах для чистого тона частотой 1 000 Гц, дающего то же субъективное ощущение громкости, что и данный звук.

Изменяя ступенями по 10 дБ уровень данного тона сравнения и определяя для каждого из них равногромкие звуки других частот, можно получить семейство кривых равной громкости.

Как следует из кривых равной громкости, восприятие звука зависит от его частоты, поэтому другим важным параметром шума является его *спектр*.

Спектром шума называется зависимость уровней звукового давления от частоты. Понятие спектрального состава шума источника, представление о разложении шума на спектральные составляющие широко используется в практике защиты от шума. Реальный спектр шума – сумма многих колебаний различных частот, каждая из составляющих которых имеет свою амплитуду. Это можно понять из рис. 4, где графически изображён пример сложного колебательного процесса.

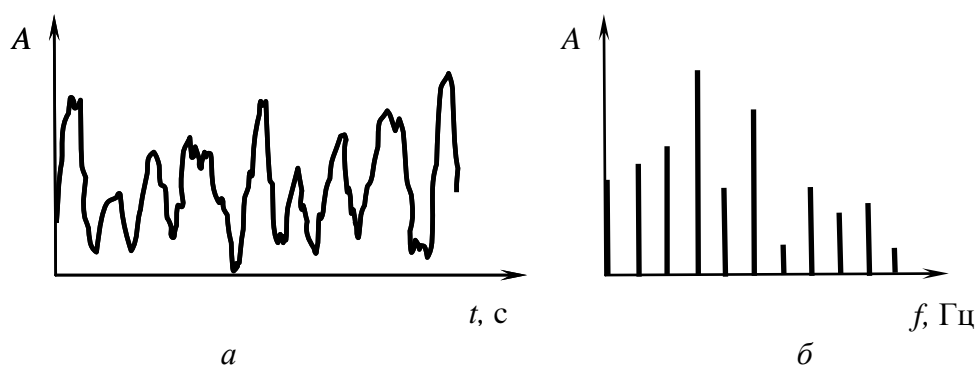


Рис. 4. Пример сложного колебательного процесса:
а – осциллограмма; б – спектрограмма

В практике шумоглушения применяют чаще всего спектральные характеристики в октавах и третьоктавах. *Октава* – это частотный интервал, в котором $f_B / f_H = 2$, где f_B и f_H – верхняя и нижняя граничная частоты соответственно. Определяющей для этих частотных интервалов является среднегеометрическая частота $f_{ср} = \sqrt{f_B \cdot f_H}$. Для базовой частоты 1000 Гц октава начинается с 707 Гц и заканчивается частотой 1414 Гц. Для третьоктавы справедливо соотношение $f_B / f_H = \sqrt[3]{2}$. Таким образом, на графиках-спектрограммах ордината среднегеометрической частоты относится ко всей октаве или третьоктавы.

По положению максимума в спектре шум условно делят на *низкочастотный*, где основные составляющие в спектре сосредоточены на частотах до 300 Гц, *среднечастотный* (300...800 Гц) и *высокочастотный* (выше 800 Гц).

По характеру спектра шум делится:

- на *широкополосный* с непрерывным спектром шириной более одной октавы;

- *тональный*, в спектре которого имеются выраженные дискретные тона (устанавливается при измерениях в третьоктавных полосах частот по превышению уровня звукового давления в одной полосе над соседними не менее чем на 10 дБ);

- *смешанный*, когда на сплошные участки накладываются отдельные дискретные составляющие.

По *временным характеристикам* шум подразделяется:

- на *постоянный* шум, уровень звука которого за выбранный отрезок времени (например, 8-часовой рабочий день) изменяется во времени не более чем на 5 дБА;

- *непостоянный* шум, уровень звука которого за выбранный отрезок времени изменяется более чем на 5 дБА.

Непостоянный шум, в свою очередь, подразделяется:

- на *колеблющийся* во времени, уровень звука которого непрерывно меняется во времени;

- *прерывистый*, уровень звука которого ступенчато изменяется (на 5 дБА и более, причём длительность интервалов, в течение которых уровень звука остается постоянным, составляет более 1 с);

- *импульсный*, состоящий из одного или нескольких звуковых сигналов, каждый из которых длительностью менее 1 с, при этом уровни звука, измеренные на импульсной характеристике шумомера, отличаются не менее чем на 7 дБА. Примером импульсного шума может служить процесс ударного забивания свай. Прерывистый шум возникает при некоторых процессах деревообработки (распиловке и др.).

Источники шума

По характеру источника или среды образования шум может быть механическим, аэродинамическим, гидродинамическим и электромагнитным.

Источником механического шума служат механические части и детали различных приспособлений и устройств, совершающие движение, трение, удары, вращение и т. д. При этом часть механической энергии превращается в тепловую энергию или другие её виды, в том числе и полезные, а частично в звуковую энергию, в данном случае не являющуюся полезной. Вибрирующие механические части заставляют колебаться частички воздуха, расположенного вблизи них, создавая давление и разрежение и тем самым звуковую волну в воздухе.

Аэродинамический шум создаётся ветряными потоками, потоками воздуха от вентиляторов, кондиционеров, выхлопных труб и других источников. Воздух своим напором может воздействовать на ухо непосредственно сам либо, попадая на различные твёрдые части или поверхности и отражаясь от

них, приходять в виде звуковой волны от вибрирующих частей этих поверхностей. Частота звука и звуковое давление сильно зависят от скорости ветра, вращения вентиляторов или давления выбрасываемых газов.

Источниками *гидродинамического шума* являются волны, дождь, движение воды по каналам, рекам (например, такие мощные водопады, как Ниагарский можно слышать за многие километры), фонтаны, перемещение жидкости по трубопроводам, перемешиваемый расплавленный металл в индукционных печах, раскалённая лава при извержении вулканов и т. д.

Электромагнитный шум возникает при взаимодействии тока, протекающего по проводникам электротехнических устройств, и магнитного поля, создаваемого током, либо за счёт магнитострикционных или других процессов в магнитопроводящих материалах. Вибрация проводников вызывает большой шум на промышленной (50 Гц) и средних частотах (от 500 до 8000 Гц), и эта проблема в настоящее время очень трудно решается для многих электротехнических и электротехнологических установок. Источником шума являются и высокочастотные ультразвуковые установки. Эти проблемы будут рассмотрены далее.

Различные устройства могут излучать комбинированный шум, например, электромеханический, магнитогидродинамический, электромагнитный и аэродинамический и т. д.

Критерии нормирования шума

В настоящее время шум рассматривается как один из видов загрязнения воздушной среды. При оценке шума существенное значение имеют такие понятия как его имиссия и эмиссия. *Имиссия* – это воздействие шума в зоне нахождения человека. Её оценка производится для сопоставления с допустимыми параметрами, определёнными санитарным нормированием. *Эмиссия* характеризует непосредственное излучение шума источником. Целью ограничения эмиссии служит техническое нормирование шума.

При нормировании шума рассматриваются критерии риска повреждения слуха. Термин *критерии риска повреждения* относится к риску ухудшения слуха от различных уровней звука. Ранее принятые решения допускали значительные объёмы потери слуха в качестве приемлемого риска. Наиболее распространённым определением являлся средний слуховой пороговый уровень (или “нижний барьер”), который составлял 25 дБ или более на аудиометрических частотах 500, 1000 и 2000 Гц. С тех пор определения “ухудшение слуха” или “потеря слуха” стали более жёсткими, при этом разные страны или консенсусные группы придерживаются различных определений. Если бы не существовало никакого риска потери слуха под воздействием шума даже у наиболее чувствительных представителей подверженного шумовому воздействию населения, допустимый уровень должен был бы опуститься до 75 дБ. И в самом деле, директивой ЕЭС устанавливает-

ся эквивалентный уровень (75 дБ), при котором риск является незначительным. В целом на этот счёт преобладает мнение, что приемлемой для рабочей силы, подверженной шумовому воздействию, является некоторая, но не слишком большая потеря слуха.

Определение критериев риска. Критерии потери слуха, вызванной шумом, могут быть представлены одним из двух способов: вызванный шумом необратимый пороговый сдвиг или процент риска. *Необратимый пороговый риск* – это степень необратимого порогового сдвига, характерная для населения, после вычитания значения порогового сдвига, который произошёл бы естественным путём по причинам, отличным от промышленного шума. Процент риска – это процент населения с ухудшением слуха, вызванного шумом, после вычитания подобного населения не подверженного воздействию шума на рабочем месте. Это понятие иногда называют *избыточным риском*.

Критерии оценки шумового воздействия. Выбор критериев оценки шумового воздействия зависит от цели, которую необходимо достичь, например, предотвратить потерю слуха или возникновение напряжения и усталости. Максимально допустимый средний ежедневный уровень шумового воздействия различается в разных странах и колеблется от 80 до 85...90 дБА.

Санитарное нормирование шума

Целью санитарного нормирования является установление таких предельно допустимых параметров шума на рабочих местах, при которых систематическое и длительное его воздействие не вызывает существенных заболеваний работающих.

Первые в мире нормы по шуму были разработаны в Ленинградском институте охраны труда в 1956 году. В начале 1960-х годов Международная организация по стандартизации (ISO) предложила подход к нормированию шума, исходя из критерия риска потери слуха. Эти рекомендации ISO стали базой для принятия норм по шуму во многих странах. ISO было предложено в качестве нормы использовать частотно-зависимые нормировочные кривые, которые отображают свойства слуха. Особенность слуха такова, что звук высокой частоты при одинаковом уровне воспринимается как более неприятный, чем низкочастотный. Таким образом, нормировочная кривая ограничивает в большей степени звук высоких частот, чем низких. Характер таких нормировочных кривых, называемых предельными спектрами (ПС), можно увидеть на рис. 5.

Предельные спектры представлены в октавных полосах частот и представляют собой эквидистантные кривые с шагом 5 дБ. Индекс ПС определяется предельно-допустимым уровнем звукового давления в октавной полосе со среднегеометрической частотой 1000 Гц. Норма шума устанавливается в зависимости от характера работы. Например, ПС–75 соответствует нулевому риску потери слуха по стандарту ISO–1999–75, а ПС–85 соответствует крите-

рию сохранения слуха в большинстве случаев. Разработчик норм выбирает ПС в зависимости от экономических соображений (чем более жёсткая норма, тем больше затрат на её соблюдение) и критерия риска повреждения слуха.

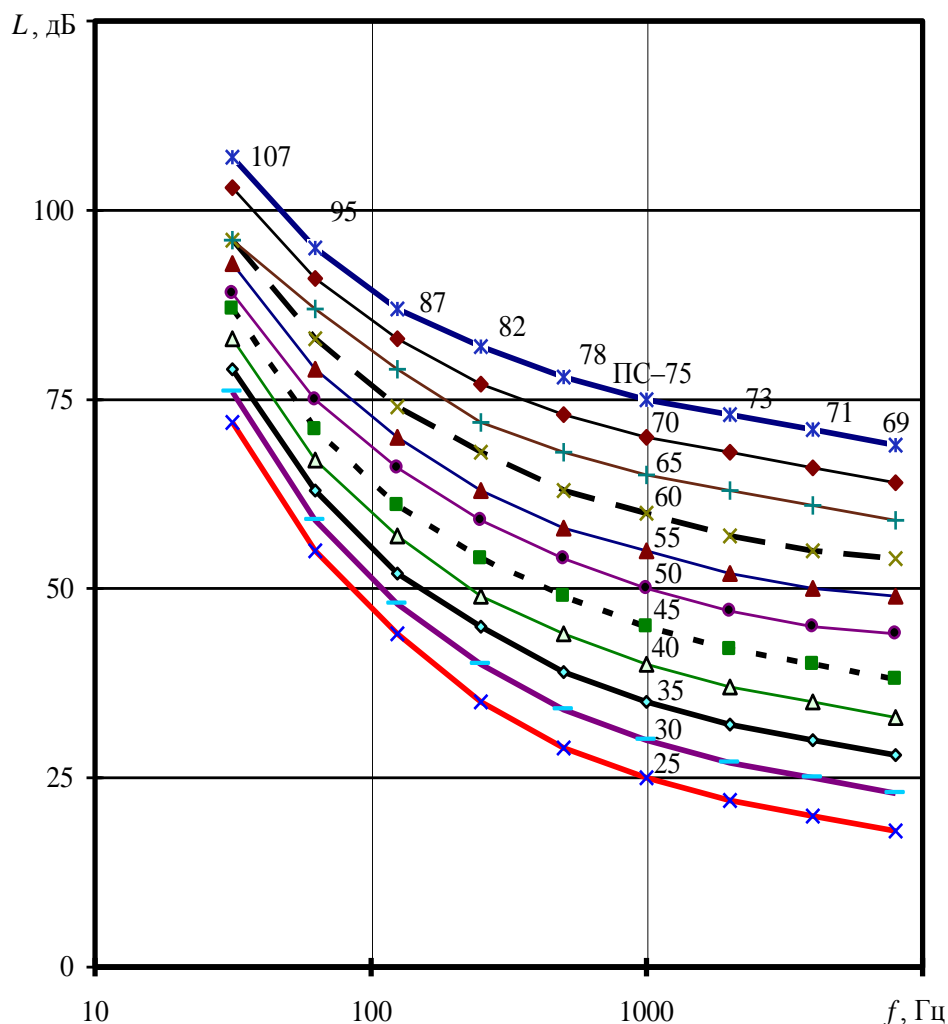


Рис. 5. Семейство нормировочных кривых шума (ПС),
рекомендованных ISO

Допускается в качестве характеристики постоянного широкополосного шума на рабочих местах принимать уровень звука, дБА, измеренный на временной характеристике “медленно” шумомера, определяемый по формуле

$$L_A = 20 \lg \frac{p_A}{p_0},$$

где p_A – среднеквадратичное значение звукового давления с учётом коррекции “А” шумомера, Па.

С помощью коррекции “А” осуществляется следующее ослабление звуковых сигналов, примерно соответствующее частотной характеристике чувствительности человеческого уха, приведённое в табл. 1.

Таблица 1

Среднегеометрические частоты октавных полос, Гц	31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Стандартная характеристика “А” шумомера, дБ	–40	–26	–16	–9	–3	0	+1	+1	–1

Исследования показали, что если широкополосный шум находится на верхнем пределе нормы, т. е. его огибающей является предельный спектр, то измерение его с помощью характеристики “А” даёт приблизительно уровень звука на 5 дБА больше, чем номер предельного спектра, и поэтому в нормах между ПС и интегральным показателем, дБА, существует простое соотношение

$$L_{A_{\text{нор}}} = \text{ПС} + 5,$$

где ПС – номер предельного спектра (например, ПС–75 соответствует интегральная норма $L_{A_{\text{нор}}} = 80$ дБА).

Использование при нормировании уровня звука позволяет значительно сократить объём измерений и упростить обработку результатов, так как отпадает необходимость в спектральном анализе шума. Существенным недостатком данного метода является то, что в случае превышения норм он не позволяет определить, в каких именно октавах шум превышает нормируемое значение и какова частотная характеристика требуемого шумоглушения.

Нормирование шума в России

Допустимые уровни звукового давления или уровня звука на рабочих местах определяются ГОСТ 12.1.003–83* “Шум. Общие требования безопасности” или санитарными нормами СН 2.2.4/2.1.8.562–96 “Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки”. В табл. 2 приводятся требования ГОСТ 12.1.003–83* по шуму в зависимости от выполняемой работы.

В нормативных документах можно встретить следующие термины.

Эквивалентный (по энергии) уровень звука, $L_{A_{\text{экв}}}$, дБА, непостоянного шума – уровень звука постоянного широкополосного шума, который в течение определённого интервала времени имеет такое же среднеквадратичное звуковое давление, что и данный непостоянный шум, определяемый по формуле

$$L_{A_{\text{эКВ}}} = 10 \lg \frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{p_A(t)}{p_0} \right)^2 dt,$$

где $p_A(t)$ – текущее значение среднего квадратического звукового давления с учётом коррекции “А” шумомера, Па.

Таблица 2

Вид трудовой деятельности, рабочие места	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со средне- геометрическими частотами, Гц									Уровни звука и эк- вивалентные уровни звуча, дБА
	31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Предприятия, учреждения и организации										
1. Творческая деятельность, руководящая ра- бота с повышенными требованиями, научная дея- тельность, конструирование и проектирование, программирование, преподавание и обучение, врачебная деятельность: рабочие места в поме- щениях дирекции, проектно-конструкторских бюро; расчётчиков, программистов вычислитель- ных машин, в лабораториях для теоретических работ и обработки данных, приёма больных в здравпунктах.	86	71	61	54	49	45	42	40	38	50
2. Высококвалифицированная работа, тре- бующая сосредоточенности, административно- управленческая деятельность, измерительные и аналитические работы в лаборатории: рабочие места в помещениях цехового управленческого аппарата, в рабочих комнатах конторских поме- щений, лабораториях.	93	79	70	63	58	55	52	50	49	60
3. Работа, выполняемая с часто получаемыми указаниями и акустическими сигналами, работа, требующая постоянного слухового контроля, операторская работа по точному графику с инст- рукцией, диспетчерская работа: рабочие места в помещениях диспетчерской службы, кабинетов и помещениях наблюдения и дистанционного управления с речевой связью по телефону, маши- нописных бюро, на участках точной сборки, на телефонных и телеграфных станциях, в помеще- ниях мастеров, в залах обработки информации на вычислительных машинах.	96	83	74	68	63	60	57	55	54	65
4. Работа, требующая сосредоточенности, ра- бота с повышенными требованиями к процессам наблюдения и дистанционного управления про- изводственными циклами: рабочие места за пуль- тами в кабинах наблюдения и дистанционного управления без речевой связи по телефону; в по- мещениях лабораторий с шумным оборудовани- ем, в помещениях для размещения шумных агре- гатов вычислительных машин.	103	91	83	77	73	70	68	66	64	75
5. Выполнение всех видов работ (за исключе- нием перечисленных в пп. 1—4 и аналогичных им) на постоянных рабочих местах в производствен- ных помещениях и на территории предприятий.	107	95	87	82	78	75	73	71	69	80

Вид трудовой деятельности, рабочие места	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со средне- геометрическими частотами, Гц									Уровни звука и эквивалентные уровни звука, дБА
	31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Подвижной состав железнодорожного транспорта										
6. Рабочие места в кабинах машинистов тепло- возов, электровозов, поездов метрополитена, ди- зель-поездов и автомотрис.	99	95	87	82	78	75	73	71	69	85
7. Рабочие места в кабинах машинистов скоро- стных и пригородных электропоездов	99	91	83	77	73	70	68	66	64	75
8. Помещения для персонала вагонов поездов дальнего следования, служебных отделений реф- рижераторных секций, вагонов электростанций, помещений для отдыха в багажных и почтовых отделениях.	93	79	70	63	58	55	52	50	49	60
9. Служебные помещения багажных и почто- вых вагонов, вагонов-ресторанов.	96	87	79	72	68	65	63	61	59	70
Морские, речные, рыбопромысловые и другие суда										
10. Рабочая зона в помещениях энергетическо- го отделения морских судов с постоянной вахтой (помещения, в которых установлена главная энергетическая установка, котлы, двигатели и механизмы, вырабатывающие энергию и обеспе- чивающие работу различных систем и устройств).	107	95	87	82	78	75	73	71	69	80
11. Рабочие зоны в центральных постах управ- ления (ЦПУ) морских судов (звукоизолирован- ные), помещениях, выделенных из энергети- ческого отделения, в которых установлены кон- трольные приборы, средства индикации, органы управления главной энергетической установкой и вспомогательными механизмами.	96	83	74	68	63	60	57	55	54	65
12. Рабочие зоны в служебных помещениях морских судов (рулевые, штурманские, багермей- стерские рубки, радиорубки и др.).	89	75	66	59	54	50	47	45	44	55
13. Производственно-технологические поме- щения на судах рыбной промышленности (поме- щения для переработки объектов промысла рыбы, морепродуктов и пр.).	107	95	87	82	78	75	73	71	69	80
Тракторы, самоходные шасси, самоходные, прицепные и навесные сельскохозяйственные машины, строи- тельно-дорожные, землеройно-транспортные, мелиоративные и другие аналогичные виды машин										
14. Рабочие места водителей и обслуживающе- го персонала автомобилей.	100	87	79	72	68	65	63	61	59	70
15. Рабочие места водителей и обслуживающе- го персонала (пассажиров) легковых автомоби- лей.	93	79	70	63	58	55	52	50	49	60
16. Рабочие места водителей и обслуживающе- го персонала тракторов самоходных шасси, при- цепных и навесных сельскохозяйственных ма- шин, строительно-дорожных и других аналогич- ных машин.	107	95	87	82	78	75	73	71	69	80
17. Рабочие места в кабинах и салонах самолё- тов и вертолётв.	107	95	87	82	78	75	73	71	69	80

Максимальный уровень звука $L_{A_{\max}}$, дБА – уровень звука, соответствующий максимальному показателю измерительного, прямопоказывающего прибора (шумомера) при визуальном отсчёте, или значение уровня звука, превышаемое в течение 1 % времени измерения при регистрации автоматическим устройством.

Допустимые уровни звукового давления в октавных полосах частот, уровни звука и эквивалентные уровни звука на рабочих местах следует принимать:

- для широкополосного постоянного и непостоянного (кроме импульсного) шума – по табл. 2;
- для тонального и импульсного шума – на 5 дБ меньше значений, указанных в табл. 2.

Запрещается даже кратковременное пребывание в зонах с октавным уровнем звукового давления свыше 135 дБ в любой октавной полосе.

Методика определения эквивалентного уровня звука $L_{A_{\text{экв}}}$ будет приведена далее в разд. “Обработка результатов”.

В СН 2.2.4/2.1.8.562–96 “Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территориях жилой застройки” помимо допустимых параметров шума, имеющих в ГОСТ 12.1.003–83*, содержатся также требования по шуму в помещениях жилых и общественных зданий и на территориях жилой застройки (табл. 3).

Как следует из допустимых параметров шума, приведённых в табл. 2 и 3, требования по шуму не могут быть заданы по общему уровню без указания частотного диапазона. Эти требования следует записывать либо с указанием рабочего места, например, шум должен соответствовать требованию при выполнении всех работ п. 5, при этом могут быть перечислены допустимые уровни во всех нормируемых октавных полосах частот и уровень звука в децибелах по шкале А. Например, шум должен соответствовать выполнению всех видов работ п. 5, т. е. не должен превышать ПС–75 или 80 дБА.

Таблица 3

Вид трудовой деятельности, рабочие места	Время суток, ч	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц									Уровни звука и эквивалентные уровни звука, дБА	Максимальные уровни звука, $L_{A_{\max}}$, дБА
		31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
Палаты больниц и санаториев, операционные больницы.	С 7 до 23	76	59	48	40	34	30	27	25	23	35	50
	С 23 до 7	69	51	39	31	24	20	17	14	13	25	40
Кабинеты врачей поликлиник, амбулаторий, диспансеров, больниц, санаториев.	–	76	59	48	40	34	30	27	25	23	35	50

Вид трудовой деятельности, рабочие места	Время суток, ч	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц									Уровни звука и эквива- лентные уровни звука, дБА	Макси- мальные уровни звука, $L_{A_{max}}$, дБА
		31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
Классные помещения, учебные кабинеты, учительские комнаты, аудитории школ и других учебных заведений, конференц-залы, читальные залы библиотек.	–	79	63	52	45	39	35	32	30	28	40	55
Жилые комнаты квартир, жилые помещения домов отдыха, пансионатов, домов-интернатов для престарелых и инвалидов, спальные помещения в детских дошкольных учреждениях и школах-интернатах.	с 7 до 23	79	63	52	45	39	35	32	30	28	40	55
	с 23 до 7	72	55	44	35	29	25	22	20	18	30	45
Номера гостиниц и жилые комнаты общежитий.	с 7 до 23	83	67	57	49	44	40	37	35	33	45	60
	с 23 до 7	76	59	48	40	34	30	27	25	23	35	50
Залы кафе, ресторанов, столовых.		90	75	66	59	54	50	47	45	44	55	70
Торговые залы магазинов, пассажирские залы аэропортов и вокзалов, приемные пункты предприятий бытового обслуживания.	–	93	79	70	63	59	55	53	51	49	60	75
Территории, непосредственно прилегающие к зданиям больниц и санаториев.	с 7 до 23	83	67	57	49	44	40	37	35	33	45	60
	с 23 до 7	76	59	48	40	34	30	27	25	23	35	50
Территории, непосредственно прилегающие к жилым домам, зданиям поликлиник, зданиям амбулаторий, диспансеров, домов отдыха, пансионатов, домов-интернатов для престарелых и инвалидов, детских дошкольных учреждений, школ и других учебных заведений, библиотек.	с 7 до 23	90	75	66	59	54	50	47	45	44	55	70
	с 23 до 7	83	67	57	49	44	40	37	35	33	45	60
Территории, непосредственно прилегающие к зданиям гостиниц и общежитий.	с 7 до 23	93	79	70	63	59	55	53	51	49	60	75
	с 23 до 7	86	71	61	54	49	45	42	40	39	50	65
Площадки отдыха на территории больниц и санаториев		76	59	48	40	34	30	27	25	23	35	50
Площадки отдыха на территории микрорайонов и групп жилых домов, домов отдыха, пансионатов, домов-интернатов для престарелых и инвалидов, площадки детских дошкольных учреждений, школ и др. учебных заведений.	–	83	67	57	49	44	40	37	35	33	45	60

Существует также ограничение по максимально допустимому уровню звука непостоянного шума, который не должен превышать значений 110 дБА для непрерывного шума при измерениях на временной характеристике “медленно” и 125 дБА – для импульсного шума при измерениях на временной характеристике “импульс”.

Если при инструментальной оценке шум на рабочем месте превышает нормативные значения в каких-либо частотных диапазонах, требуются мероприятия по его снижению. На рис. 6 приведены результаты исследования уровня звукового давления на рабочих местах персонала, выполняющего работу с некоторыми распространёнными устройствами, создающими относительно сильный шум, например, индукционные нагреватели или ПЭВМ с матричным принтером.

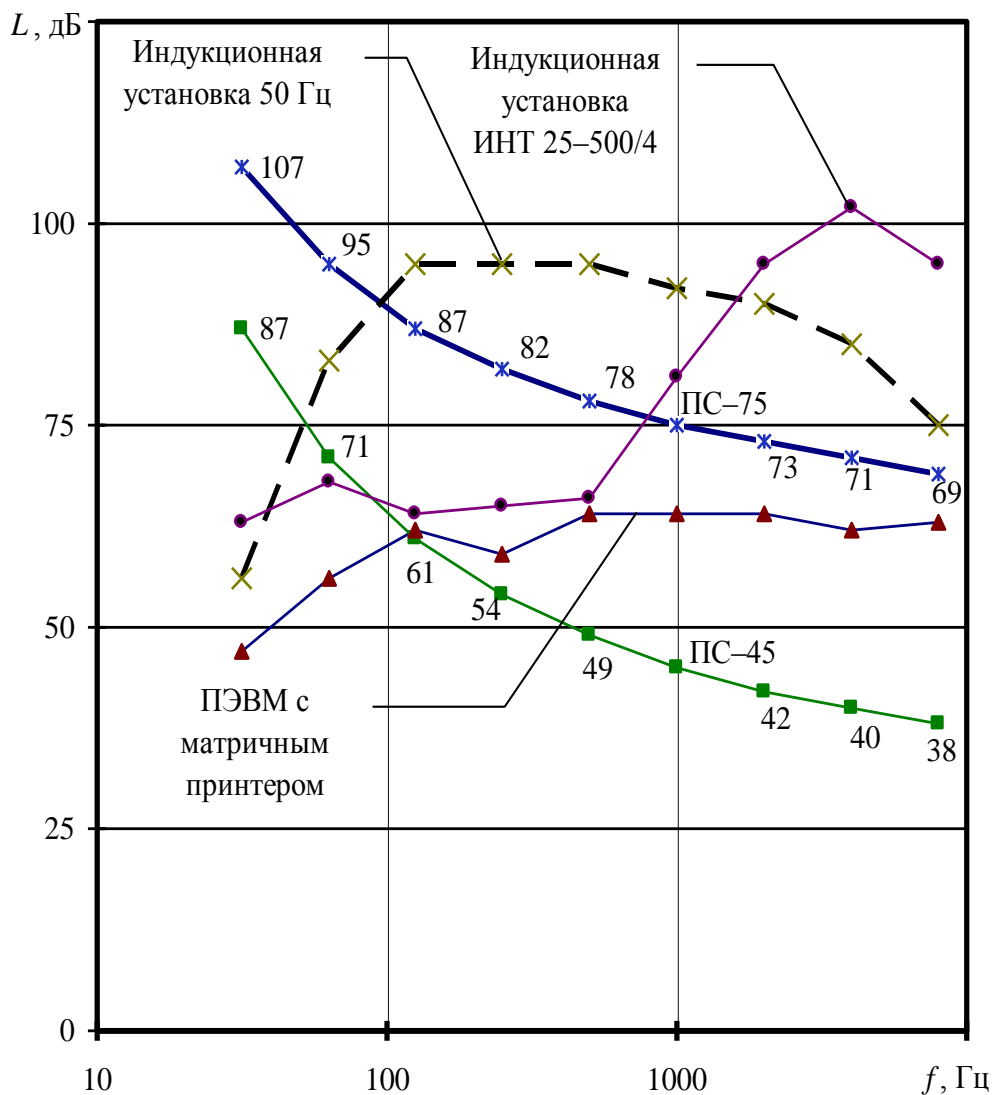


Рис. 6. Кривые уровня звукового давления на некоторых рабочих местах и предельные спектры для этих работ ПС-75 и ПС-45

Шум в индукционных установках создаётся вибрацией витков индуктора или нагреваемого изделия, снизить которую очень сложно. По сравнению с предельным спектром ПС–75 обе установки (ИНТ 25–500/4 для нагрева на частоте 4 кГц концов штанг глубинных насосов в овальном индукторе 380×380×80 мм и установка поперечного магнитного потока для нагрева алюминиевой полосы шириной 1200 мм частотой 50 Гц) имеют превышения, соответствующие частотам основной и удвоенной частоты источника питания. Уровни звукового давления ПЭВМ с матричным принтером превышают ПС–45 также в высокочастотной области звуковых частот, причём это превышение может достигать 20...30 дБ. Наиболее же острые проблемы в производственных условиях имеются на рабочих местах прессовых линий и обрезных автоматов, уровень звукового давления которых достигает 130...135 дБ в диапазоне частот 125...2000 Гц.

ИЗМЕРЕНИЕ ШУМА И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

В соответствии с требованиями международных стандартов выбор того или иного метода измерения уровня шума зависит от следующих целей измерения:

- определение вероятности повреждения органов слуха;
- определение потребности в использовании технических средств борьбы с шумом и подбор нужного их типа;
- определение “шумовой нагрузки” совместимой с характером выполняемых работ;
- определение фонового уровня, необходимого для обеспечения общения и техники безопасности.

Существуют два основных подхода к измерению параметров шума на рабочем месте:

1) измерение *шумового воздействия* на каждого работника или категорию работников. В этом случае предпочтительнее использование шумового дозиметра;

2) измерение шума на различных участках для создания шумовой карты и определения областей риска. В этом случае необходимо измерить шум в узлах сетки координат шумовой карты при помощи измерителя уровня звука.

Измерение шума на соответствие требованиям по предельным параметрам производится в соответствии с ГОСТ 12.1.050–86 “Методы измерения шума на рабочих местах”.

Измерительный тракт, как правило, состоит из шумомера и набора октавных фильтров, часто оба прибора совмещены в одном блоке. Структурная схема шумомера представлена на рис. 7. Шумомер включает микрофон 1, преобразующий звуковые колебания в электрические, которые усиливаются усилителем 2. Прибор должен работать в широком динамическом диапазоне.

Чтобы обеспечить достаточное усиление самых слабых сигналов и избежать перегрузки при прохождении наиболее интенсивных, шумомер снабжен аттенуатором 4.

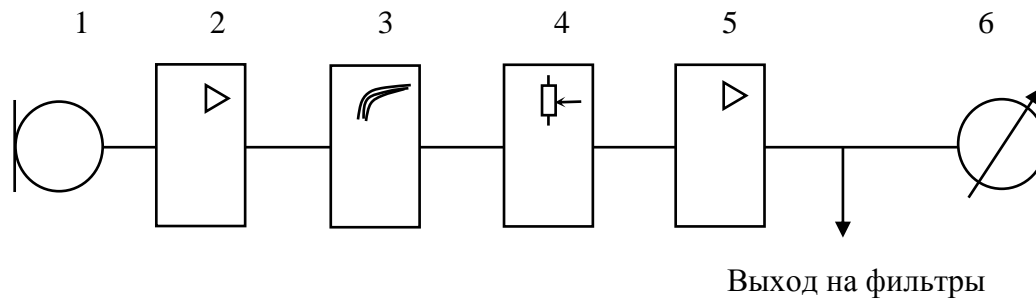


Рис. 7. Структурная схема шумомера:

1 – микрофон; 2 – предварительный усилитель; 3 – корректирующие цепи;
4 – аттенуатор; 5 – усилитель; 6 – показывающий прибор

Шумомер имеет четыре частотных характеристики – А, В, С и линейную, которые создаются корректирующими цепями 3 (рис. 7) частотных характеристик шумомера. Линейная характеристика используется при подключении к шумомеру набора фильтров для определения распределения уровней звуковых давлений по частотам. Характеристика А шумомера предназначена для измерений уровней звука по шкале “А” (дБА).

Достоинство измерения и нормирования шума в децибелах по шкале “А” – возможность сразу ответить на вопрос – “имеется или нет превышение в измеряемом шуме допустимых норм”, но не даёт возможности определить, в какой октаве имеет место превышение. Измерение и нормирование шума по предельному спектру обеспечивает такую возможность, однако требует больше времени для проведения измерений. Современная аппаратура, построенная на микропроцессорах, лишена этого недостатка.

Измерения шума должны производиться для контроля соответствия фактических уровней звука на рабочих местах допустимым уровням по действующим нормам.

Устанавливаются следующие измеряемые и рассчитываемые величины в зависимости от временных характеристик шума:

- уровень звука, дБА, и октавные уровни звукового давления, дБ, – для постоянного шума;
- эквивалентный уровень звука и максимальный уровень звука, дБА, – для колеблющегося во времени шума;
- эквивалентный уровень звука, дБА, и максимальный уровень звука, дБА_I, – для импульсного шума;
- эквивалентный и максимальный уровни, дБА, – для прерывистого шума.

Поскольку результаты должны характеризовать шумовое воздействие за время рабочего дня, устанавливается определённая продолжительность измерения непостоянного шума.

При проведении измерений микрофон следует располагать на высоте 1.5 м над уровнем пола или рабочей площадки (если работа выполняется стоя) или на высоте уха человека, подвергающегося воздействию шума (если работа выполняется сидя). Микрофон должен быть ориентирован в направлении максимального уровня шума и удалён не менее чем на 0.5 м от оператора, проводящего измерения.

Для оценки шума на постоянных рабочих местах измерения следует проводить в точках, соответствующих установленным постоянным местам. Для оценки шума на непостоянных рабочих местах измерения следует проводить в рабочей зоне в точке наиболее частого пребывания работающего.

Обработка результатов измерений

Шумоизмерительная аппаратура имеет шкалы, проградуированные в единицах уровней – децибелах. В процессе обработки результатов измерений, полученных с помощью этих приборов, возникает необходимость определения суммарного шума нескольких одновременно работающих источников по измеренным уровням каждого из них. На практике часто встречается необходимость определения среднего уровня звукового давления по результатам измерения в нескольких точках, к примеру, когда известен уровень звукового давления суммы двух источников и уровень одного из них, а требуется определить уровень неизвестного сигнала. С логарифмическими величинами нельзя производить обычные арифметические действия, например, непосредственно складывать. Сложение логарифмов чисел соответствует логарифму произведения, а не сумме этих чисел. Перемножение уровней вообще лишено физического смысла.

Существуют различные способы обработки результатов измерений, выраженных в децибелах. Далее приводятся два способа: классический и номографический (табличный).

Классический способ основан на использовании формулы, связывающей звуковое давление p , Н/м², с его уровнем L , дБ

$$p = 2 \cdot 10^{0.5 \cdot L - 5}.$$

Сложение источников с одинаковыми уровнями звука (или уровнями звукового давления) выполняется по формуле

$$L_{\Sigma} = L_1 + 10 \lg n,$$

где $L_1 = L_2 = \dots = L_n$ – уровень звука (или уровень звукового давления) одного из источников, дБА (дБ); n – число источников.

Из формулы видно, что если складываются два источника с одинаковыми уровнями звука, то суммарный шум на 3 дБ выше любого из них, если 10 источников – на 10 дБ выше, а если 100 – на 20 дБ выше и т. д.

Пример. Студент, разговаривая с соседом, создаёт уровень звука 60 дБА. Каков суммарный уровень звука 100 студентов, находящихся в аудитории. *Ответ:* 80 дБА (при условии, что все студенты находятся в одной точке).

Если источники имеют различные уровни звука (или уровни звукового давления), то сложение их осуществляется по формуле

$$L_{\Sigma} = 10 \lg \left(\sum_{i=1}^n 10^{0.1L_i} \right),$$

где L_i – уровни звука (или уровни звукового давления) i -го источника шума, дБА (дБ).

Для удобства расчётов можно использовать данные для сложения уровней звука (или уровней звукового давления) источников шума, представленные в табл. 4.

Таблица 4

Разность двух складываемых уровней звука (или уровней звукового давления)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Добавка (А) к большему из уровней звука (или уровней звукового давления)	3	2.5	2.1	1.8	1.5	1.2	1.0	0.8	0.6	0.5	0.4

Если разница уровней звука (или уровней звукового давления) складываемых источников превышает 10 дБА (дБ), то меньший из них можно не учитывать.

Пример. В цехе работают три станка с разными уровнями звука: $L_1 = 100$ дБА, $L_2 = 94$ дБА, $L_3 = 80$ дБА. Определить суммарный уровень звука. $L_1 - L_2 = 100 - 94 = 6$ дБА. Из табл. 4 добавка (А) равна 1 дБА. Тогда суммарный уровень звука составит: $100 + 1 = 101$ дБА.

Операция сложения выполняется последовательно: сначала складываются два наименьших источника; их энергетическая сумма является новым условным источником, который складывается со следующим и т. д. Для закрепления знаний об операциях сложения, а также для практического использования выполним перевод измеренного спектра в соответствующий ему уровень звука. Заметим, что обратная операция невозможна.

Перевод уровней звукового давления в уровень звука

Пример. Выполнены измерения уровней звукового давления в октавах бытового прибора, для которого в паспорте указана нормативная характеристика уровня звука, например, 50 дБА. Для сопоставления с ней требуется перевести уровни звукового давления в октавах в уровень звука.

В табл. 5 приведены измеренная характеристика, а также стандартная характеристика фильтра “А” шумомера.

Таблица 5

Стандартные или вычисленные характеристики	Уровни звукового давления, дБ, и поправки в октавных полосах частот, Гц								
	31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Измеренная характеристика бытового прибора	74	63	50	48	45	40	35	30	22
Стандартная частотная характеристика “А” шумомера	−40	−26	−16	−9	−3	0	+1	+1	−1
Спектр прибора с поправкой на фильтр “А”, дБА	34	37	34	39	42	40	36	31	21
Результаты энергетического сложения, дБА	39		40		44		37		Не учитывают
	43				45				
	47								

Из показаний прибора арифметически вычитаются значение фильтра “А”, а полученные значения новых уровней звукового давления последовательно складываются энергетически. В табл. 5 показаны последовательность перечисленных операций и окончательный результат. Уровень звука, создаваемого данным бытовым прибором в 47 дБА, соответствует норме – 50 дБА.

Вычитание уровней звукового давления и уровней звука

Задача вычитания уровней звукового давления и уровней звука также имеет большое практическое значение, особенно при разработке мероприятий по шумоглушению. Например, если звуковое поле складывается из нескольких источников, каким будет уровень звука (уровень звукового давления) при отключении одного из них. Такую операцию нетрудно выполнить, воспользовавшись данными, приведёнными в табл. 6.

Таблица 6

Разность двух вычитаемых источников, дБ (дБА)	10	6 – 9	5 – 4	3	2	1
Поправка к более высокому уровню (−Δ), дБ (дБА)	0	1	2	3	5	7

Пример. Требуется определить уровень звука станка, находящегося в шумном цехе. Суммарный уровень звука станка и шумовой помехи равен 92 дБА. Помеха в этой точке при выключенном станке имеет уровень 85 дБА. Каков уровень звука станка? Разность суммарного уровня звука и уровня помех составляет 7 дБА. По табл. 6 определяем поправку, равную 1 дБА. Вычтя из суммарного уровня эту поправку, находим искомый уровень звука станка. Он равен 91 дБА.

Расчёт эквивалентного уровня звука

Практические расчёты эквивалентных уровней звука для работающих источников с непостоянным шумом выполняются в соответствии с ГОСТ 12.1.050–86.

Последовательность расчёта следующая:

- 1) определяются (расчётами или измерениями) значения уровня звука, которые обозначаются $L_{Ai} \dots (L_i)$;
- 2) по технологии работы источника определяется продолжительность работы на каждой ступени измерения шума, мин;
- 3) определяются поправки ΔL_{Ai} к значениям измеренных L_{Ai} в зависимости от продолжительности ступеней шума по табл. 7;

Таблица 7

Продолжительность ступени прерывистого шума, мин	480	420	360	300	240	180	120	60	30	15	66
Поправка ΔL_{Ai} , дБА (или ΔL_i , дБ)	0.0	0.6	1.2	2.0	3.0	4.2	6.0	10	12	15	19

- 4) вычисляется разность $L_{Ai} - \Delta L_{Ai}$ для каждой степени шума;
- 5) полученная разность энергетически суммируется, а сумма и будет эквивалентным уровнем звука (дБА), определяемым по формуле

$$L_{A \text{ экв}} = 10 \lg \sum_{i=1}^n 10^{0.1(L_{Ai} - \Delta L_{Ai})},$$

где n – число ступеней прерывистого шума.

Определение дозы шума

При оценке шума допускается использовать дозу шума, так как установлена линейная зависимость – эффект по временному смещению порога слуха, что свидетельствует об адекватности оценки шума по энергии. Дозный подход позволяет оценивать кумуляцию (накопление) шумового воздействия за рабочую смену.

Доза шума D , $\text{Па}^2 \cdot \text{ч}$, – интегральная величина, учитывающая акустическую энергию, воздействующую на человека, за определённый период T

$$D = \int_0^T p_A^2(t) dt,$$

где $p_A(t)$ – текущее значение среднеквадратического звукового давления с учётом коррекции А шумомера; T – продолжительность воздействия шума.

Относительная доза шума, %: $D_{отн} = (D/D_{доп}) \cdot 100$, где $D_{доп}$ – допустимая доза шума. Для $L_A = 80$ дБА и $T = 8$ ч: $D_{доп} = 0.356^2 \cdot 8 = 1 \text{ Па}^2 \cdot \text{ч}$. Для допустимого уровня звука 80 дБА при $T = 8$ ч: $D_{отн} = 100$ %, при $T = 4$ ч: $D_{отн} = 50$ %.

Методы и средства защиты от шума

Вредные уровни звука легко выявить. В подавляющем большинстве случаев избыточный шум можно уменьшить, применяя уже существующие технологии, переконструируя оборудование, усовершенствуя производственный процесс или модифицируя шумные механизмы. Но очень часто не делается вообще ничего. Тому есть несколько причин. Во-первых, хотя некоторые решения по снижению уровня шума очень недороги, другие стоят недешево, особенно, когда целью является снижение вредного уровня шума до 80 дБА. Затраты на снижение шума в устройствах могут оцениваться от 2 % от стоимости самого устройства в первом случае до 10 % – в худшем случае. Во-вторых, иногда снизить шум от мощного оборудования можно только путём новых решений, которые не сразу могут изобрести конструкторы и проектировщики. Легче предложить использовать средства снижения шума на пути его распространения, проблемами которых занимаются в основном эксплуатационные службы, а не разработчики.

Все имеющиеся в распоряжении человечества методы и средства защиты от шума и вибраций можно классифицировать следующим образом.

По отношению к защищаемому объекту средства подразделяются на средства индивидуальной и коллективной защиты.

Средства индивидуальной защиты (СИЗ) от шума (средства защиты в самом приёмнике) используются персонально, их назначение – перекрыть основной канал проникновения звука в ухо человека и тем самым предупредить ухудшение или расстройство не только органов слуха, но также нервной и других подвергающихся вредному воздействию шума систем человека.

Средства коллективной защиты от шума предназначены и используются для его снижения на рабочих местах, в окружающей среде и в других местах пребывания человека.

По отношению к источнику шума все средства коллективной защиты можно подразделить на снижающие шум в источнике образования и снижающие шум по пути от источника шума к точке наблюдения или расчётной точке.

Для снижения шума в источнике образования необходимо проанализировать источники шумообразования. Начинать снижение шума следует от более интенсивных к менее интенсивным источникам. Уменьшить шум можно различными путями в зависимости от конструкции, режимов работы и т. д., например, за счёт снижения силового воздействия или уменьшения звукоизлучающей способности элементов источника.

Снижение силового воздействия достигается, к примеру, снижением скорости движения (вращения), уравниванием вращающихся частей, увеличением времени соударения деталей, уменьшением зазоров в сочленениях и соединениях, увеличением числа Рейнольдса и снижением скорости движущихся гидравлических потоков, снижением турбулентности и скорости движущихся струй и пр.

Уменьшение звукоизлучающей способности достигается нарушением синфазности колебаний излучающей поверхности, снижением площади излучения, уменьшением сопротивления излучающей поверхности, её вибродемпфированием, увеличением коэффициента потерь материала излучающей поверхности и пр.

Условно средства снижения шума на пути от источника до приёмника (точки наблюдения) можно разделить на несколько видов (рис. 8):

- средства ближней (по отношению к источнику) защиты (глушители шума, виброизоляторы);
- средства, устанавливаемые на пути распространения между источником шума и приёмником (акустические экраны, звукоизолирующие капоты, перегородки, звукоизолирующие укрытия);
- средства, снижающие шум в точке наблюдения (ТН) (звукоизолирующие кабины, звукоизолированные дома и т. д.).

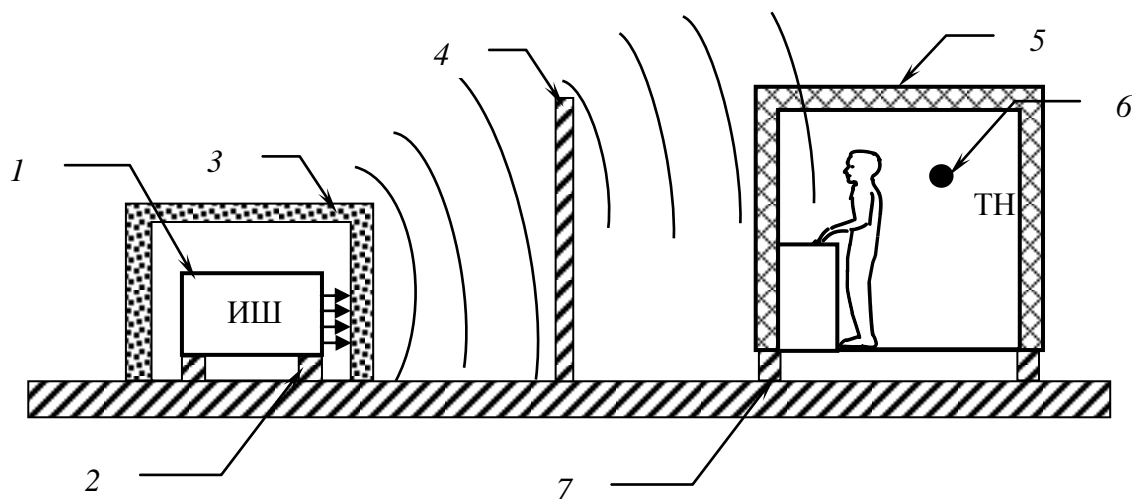


Рис. 8. Схема установки коллективных средств защиты от шума и вибрации на пути их распространения: 1 – источник шума; 2 – виброизоляторы источника (средство ближней защиты от звуковой вибрации); 3 – звукоизолирующий кожух, 4 – акустический экран; 5, 7 – звукоизолирующая кабина и её виброизоляторы соответственно (средства, снижающие шум в точке наблюдения); 6 – точка наблюдения

В зависимости от среды, в которой распространяется звук, средства делятся на снижающие передачу воздушного шума и структурного шума (звуковой вибрации).

Всё многообразие рассмотренных средств защиты от шума (кроме применяемых для снижения шума в источнике образования) основано на очень простых принципах: поглощении звука (звуковой вибрации), отражении или комбинации этих двух принципов.

В зависимости от принципа действия методы защиты от шума и звуковой вибрации делятся на следующие: звукоизоляция; звукопоглощение; виброизоляция; вибропоглощение; глушители шума.

Заметим, что данная классификация в определённой степени условна, так как, например, глушители являются средствами защиты от шума (например, реактивных струй и т. д.).

Звукоизоляция – метод защиты от воздушного шума, основанный на отражении звука от бесконечно плотной звукоизолирующей преграды (рис. 9, а).

Звукопоглощение – метод защиты от воздушного шума, основанный на поглощении звука при переходе звуковой энергии в тепловую в мягкой звукопоглощающей (волокнуистой или пористой) конструкции (рис. 9, б).

Глушители шума – устройства, применяемые для снижения аэродинамического или гидродинамического шума за счёт отражения (реактивные) (рис. 9, в) или поглощения (абсорбционные) (рис. 9, г) звуковой энергии.

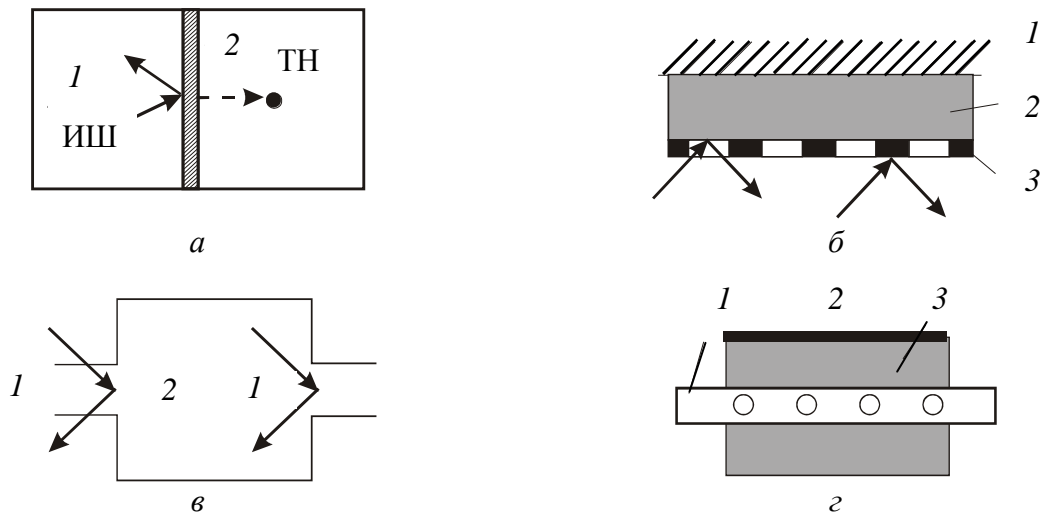


Рис. 9. Схемы: а – звукоизоляции (1 – источник шума; 2 – бесконечная плотная звукоизолирующая преграда); б – звукопоглощения (1 – твёрдая отражающая поверхность, 2 – звукопоглощающий материал; 3 – перфорированное покрытие); в – реактивного глушителя; г – абсорбционного глушителя (1 – патрубок, 2 – камера, звукопоглощение)

В зависимости от использования дополнительного источника энергии все средства защиты от шума делятся:

- на пассивные, в которых дополнительный источник энергии не используется;
- активные, в которых дополнительный источник энергии используется.

На рабочих местах, где не удастся добиться снижения шума до допустимых уровней техническими средствами или где это нецелесообразно по технико-экономическим соображениям, следует применять средства индивидуальной защиты от шума.

Основное назначение СИЗ – ослабить звуки, воздействующие на слуховую мембрану наружного уха, а следовательно, и колебания чувствительных элементов внутреннего уха. Никто не знает, когда люди впервые обнаружили, что, закрывая ладонями или пальцами уши или отверстие слухового канала, можно эффективно уменьшить уровень нежелательного звука – шума, но этот известный на протяжении веков метод оказался единственным способом защиты от громкого звука. Наиболее эффективным решением проблемы защиты слуха в настоящее время является контроль уровня шума в слуховом канале. Применение СИЗ позволяет предупредить расстройство не только органов слуха, но и всей нервной системы от действия чрезмерного раздражителя. Их эффективность (звуковое заглушение), как правило, максимальна в области высоких частот, наиболее вредных и неприятных для человека.

Необходимо отметить, что звуковые колебания воспринимаются человеком не только непосредственно через орган слуха, но и через череп путём костной проводимости. Поэтому средства защиты только органа слуха не позволяют полностью устранить передачу звуковой энергии.

Эффект применения СИЗ особенно заметен у рабочих с малым стажем работы в шумных условиях, когда потеря слуха невелика. Однако и для лиц с нарушенным слухом применение СИЗ не только предотвращает дальнейшее ухудшение слуха, но может привести и к некоторому его улучшению. СИЗ способствует профилактике заболеваний, прямо или косвенно связанных с воздействием интенсивного шума (тугоухость, шумовая болезнь нарушения со стороны нервной, сердечно-сосудистой систем и др.), а также улучшению работоспособности человека.

Некоторые виды СИЗ приведены на рис. 10.

Вкладыши являются простейшим типом СИЗ. Они изготавливаются нескольких типоразмеров из винила, силикона, составов на основе эластомеров, волокнистых материалов, воска, штапельного стекловолокна, упругих пеноматериалов с замкнутыми порами и других мягких эластичных материалов (резины). Существуют вкладыши из достаточно мягкого материала, форму которых можно изменять в зависимости от индивидуальных особенностей слухового канала. В отечественной практике наибольшее распространение

получили вкладыши “Беруши”, изготавливаемые из волокнистого материала. Противошумные вкладыши вставляют в наружный слуховой канал. Выпускают разнообразные модели вкладышей различной формы и размера, приемлемые для большинства людей.



Рис. 10. Характерные типы средств индивидуальной защиты от шума

Полувкладыши, также называемые колпачками, носят на наружном отверстии слухового канала. Использование полувкладышей аналогично пальцам, которые закрывают наружное отверстие слухового канала. Полувкладыши изготавливают одного размера, который рассчитан на использование большинством людей. Это средство защиты удерживается на ухе с помощью легковесной дужки.

Эффективность вкладышей в низкочастотной области ограничена костной проводимостью. На более высоких частотах их эффективность можно повысить увеличением массы, что не всегда выполнимо. Вкладыши вызывают определённую степень неудобства при их использовании.

Заглушающие наушники являются аналогами кожуха и имеют более высокую (в среднем на 10 дБ) эффективность по сравнению с вкладышами, однако менее удобны в эксплуатации. Основное назначение наушников заключается в том, чтобы закрывать околоушную область чашками для экранирования и снижения уровня шума. Наушник состоит из двух корпусов и оголовья. Корпус изготавливают из пластмассы, внутри которой или размещают слой звукопоглощающего материала, или заполняют его жидкостью (например, глицерином), который эффективно поглощает звук, в результате чего достигается более эффективное ослабление шума на частотах выше 2000 Гц. Большинство наушников позволяют ослаблять шум, проникающий в слуховой канал за счёт костной проводимости, приблизительно до 40 дБ в диапазоне частот свыше 2000 Гц. Чашки полностью закрывают ушные раковины, причём специальная подушка обеспечивает герметизацию заушной области. Для более плотного прилегания на внутренней поверхности, обращённой к голове, устанавливают мягкие протекторы. Устанавливается также определённая масса наушников и сила их прижатия к голове. При увеличении силы прижатия их эффективность возрастает, масса таких устройств не должна превышать 350 г. В других случаях наушники могут крепиться к “жесткой каске”. По сравнению с простыми наушниками указанная “жесткая” конструкция не позволяет обеспечить плотный контакт с любым типом головы, и поэтому эффективность защиты от шума снижается.

Активное уменьшение шума – известное направление техники, которое получило развитие в последних моделях средств защиты функции слуха. В некоторых устройствах происходит опрокидывание фаз звукового сигнала в чашках наушников, и этот преобразованный сигнал используется для гашения входящего звукового сигнала. Работа других устройств основана на улавливании звукового сигнала снаружи чашек наушника. При этом осуществляется разделение сигналов, т. е. преобразование спектральной характеристики звукового сигнала с целью ослабления интенсивности его воздействия и использование шумовой составляющей звукового сигнала с опрокинутой фазой. С помощью электронной схемы синхронизации на чашки наушника одновременно поступает звуковой сигнал с опрокинутой фазой и шумовой фон окружающей среды. Активное уменьшение шума ограничивается низкочастотными шумами с частотой ниже 1 000 Гц, причём максимальное ослабление на 20...25 дБ осуществляется на частоте 300 Гц или ниже.

Шлемы обеспечивают самую большую защиту от шума, их эффективность на высоких частотах на 8 дБ выше, чем у наушников. Шлем закрывает большую часть черепа, что предотвращает проникновение звука через кости черепа (костная проводимость). Его чаще всего применяют для защиты работающих в условиях интенсивного высокочастотного шума.

Активная защита от шума

В *активных средствах* защиты от шума (вибрации) используется принцип интерференции звука (вибрации). *Интерференция* – наложение в пространстве (на поверхности) двух или нескольких звуковых (вибрационных) волн, при котором в разных точках пространства (поверхности) получается ослабление результирующей волны. Если в пространстве (на поверхности) распространяются две волны, то в каждой точке результирующее колебание представляет собой геометрическую сумму колебаний, соответствующих каждой из складывающихся волн (принцип суперпозиции).

Простейший случай интерференции – сложение двух волн одинаковой частоты. Если колебание происходит по синусоидальному закону, то амплитуда результирующей волны в какой-либо точке пространства определяется как:

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 - 2A_1A_2 \cos \varphi},$$

где A_1 , A_2 – амплитуды складывающихся волн соответственно; φ – разность фаз между волнами.

При направлении звуковых волн в противофазе ($\varphi = 180^\circ$) и равенстве амплитуд $A_1 = A_2$ суммарная амплитуда $A = 0$.

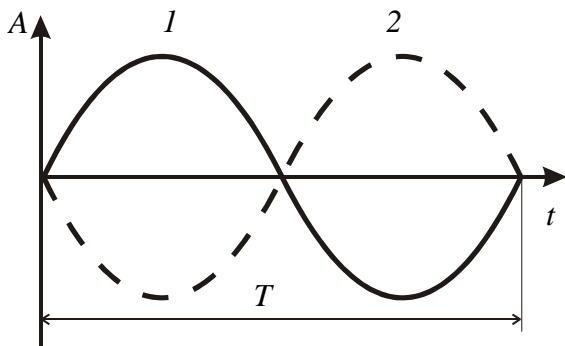


Рис. 11. Схематическая иллюстрация интерференции:

1 – тональный звук; 2 – звук в противофазе

Суть данного метода нетрудно понять из схемы, приведённой на рис. 11. При наложении друг на друга тональных составляющих (одна из которых условно показана на рисунке в виде синусоиды) в противофазе происходит процесс взаимного уничтожения звуковых колебаний.

Принципиальная схема устройства активной защиты от шума показана на рис. 12. Из него видно, что звук от источников шума (первичный звук), воспринимается микрофоном и передаётся на систему,

где происходят анализ спектра, поворот фазы и усиление сигнала. В этом же блоке присутствует и управляющее устройство. Вторичный звук блоком динамиков излучается в противофазе к первичному звуку. При наложении звуковых волн в пространстве наблюдается зона тишины.

В последние годы различные устройства для активного гашения звука (вибрации) начали выпускаться серийно и нашли широкое применение для снижения шума (вибрации) транспортных средств, различных агрегатов и систем. Известен положительный пример активного подавления шума в

салоне автомобилей “Опель”. Значительные затраты средств фирмы на создание специальной акустической лаборатории (34 млн марок) и привлечение специалистов по акустике, позволившие создать систему активного управления шумом за счёт создания “противозвуков”, окупилась и позволили получить не только социальный, но и экономический эффект.

В связи с жёсткими нормами на шум при выполнении творческих видов работ и программирования большое внимание уделяется борьбе с акустическим шумом электронного офисного оборудования и ПЭВМ, которые постоянно находятся на рабочем месте пользователя или в рабочем помещении. Известны примеры активного подавления шума матричных принтеров, в результате чего шум от них значительно уменьшился.

Немалую лепту в общий акустический климат наряду с матричными принтерами вносят и системы воздушного охлаждения ПЭВМ. Шум вентиляторов складывается из аэродинамической и механической составляющих. Аэродинамический шум вызывается потоком воздуха в поточной части вентилятора и в примыкающих воздуховодах. Пульсации давления вызывают как воздушный шум, распространяющийся по каналам охлаждения и выходящий наружу через воздухораспределительные устройства и стенки воздуховодов, так и структурный шум, который, распространяясь по конструктивным элементам, практически не поддаётся активному гашению.

Звукоизоляция и звукопоглощение

Понятия “звукоизоляция” и “звукопоглощение” на практике иногда отождествляются, однако это принципиально разные способы защиты от шума. На рис. 13 показана схема распространения звука от источника к человеку и прохождения звука через преграду.

Согласно представленной схеме уравнение баланса звуковой энергии выглядит так: $I_{\text{пад}} = I_{\text{погл}} + I_{\text{отр}} + I_{\text{пр}}$, т. е. интенсивность падающего звука $I_{\text{пад}}$ равна сумме интенсивности поглощённого $I_{\text{погл}}$, отражённого $I_{\text{отр}}$ и прошедшего $I_{\text{пр}}$ звука.

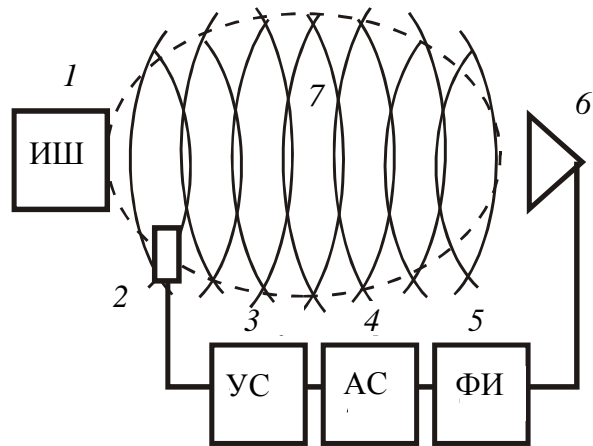


Рис. 12. Схема устройства активной шумозащиты: 1 – источник шума; 2 – микрофон; 3 – усилитель; 4 – анализатор спектра; 5 – фазоинвертор; 6 – блок динамиков; 7 – зона защиты

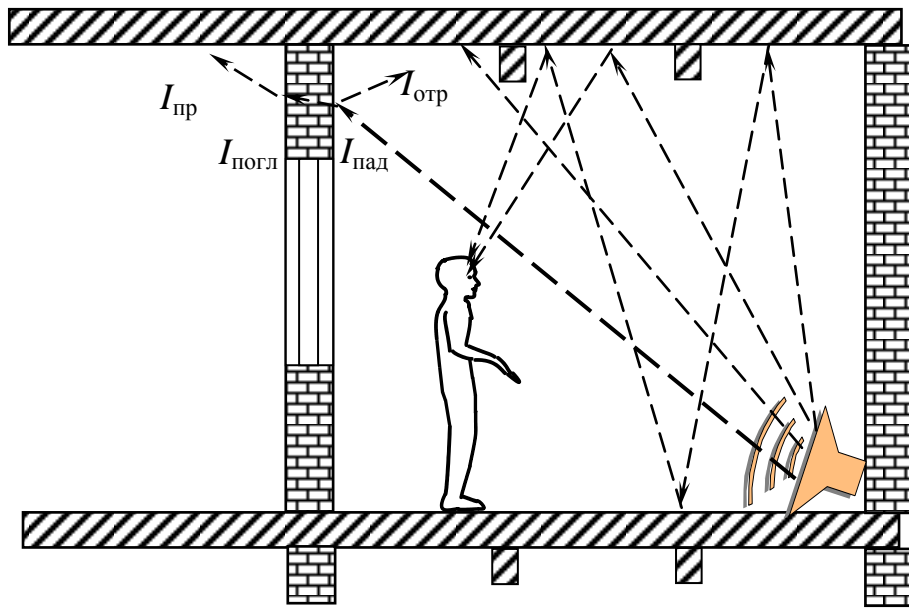


Рис. 13. Схема падения звука и его прохождения через преграду

Отношение интенсивности прошедшего звука к интенсивности падающего называется *коэффициентом звукопроводности*:

$$\tau = I_{\text{пр}}/I_{\text{пад}}.$$

Звукоизоляцией называется величина, обратная звукопроводности. Звукоизоляция обозначает процесс отражения звука и служит для того, чтобы не пропускать звук через преграду. Значение звукоизоляции ЗИ, дБ, определяется следующим образом:

$$\text{ЗИ} = 10 \lg \frac{1}{\tau}.$$

Коэффициент звукопоглощения определяется отношением интенсивности поглощаемого в конструкции звука к интенсивности падающего:

$$\alpha = I_{\text{погл}} / I_{\text{пад}}.$$

Как правило, для целей звукоизоляции служат твёрдые материалы, не пропускающие звук из одного объёма в другой. Поглощение звука в изолирующей конструкции может быть небольшим, её основной эффект основан на отражении звука от конструкции.

Звукопоглощающие материалы и конструкции служат для поглощения звука как в объёме, где расположен источник звука, так и в соседних объёмах. Для них, как правило, используются материалы, в которых происходит процесс перехода звуковой энергии в тепловую. Чаще всего это пористые и рыхлые волокнистые материалы, например, маты из ваты из супертонкого

стекловолокна, базальтового волокна и т. д. Падающие звуковые волны вызывают колебание воздуха в порах материала. Вследствие вязкости воздуха колебание его в таких порах сопровождается трением, и кинетическая энергия колеблющегося воздуха переходит в тепловую. Энергия, переносимая звуковыми волнами при уровнях, с которыми приходится иметь дело даже в очень шумных производствах, настолько мала, что увеличение температуры любого материала, полностью поглощающего звук, происходит на тысячные доли градуса.

Звукопоглощающие материалы принято характеризовать коэффициентом звукопоглощения α . Коэффициент звукопоглощения конструкции зависит от частоты падающих волн и от угла их падения. При использовании звукопоглощающих облицовок важен так называемый диффузный коэффициент звукопоглощения, усреднённый по разнообразным углам падения звуковых волн. Обычно указывается диффузный коэффициент звукопоглощения для частот 60, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 и 8000 Гц, иногда строят частотные зависимости коэффициента звукопоглощения.

Увеличение толщины материала l приводит к увеличению коэффициента звукопоглощения на более низких частотах. Объясняется это тем, что для звукопоглощения важна не абсолютная длина пути звука в материале, а длина пути по отношению к длине звуковой волны λ . При увеличении толщины в звукопоглотителе понижается частота, на которой сохраняется то же отношение l/λ . Для каждого материала существует некая предельная толщина $l_{пр}$, превышение которой нецелесообразно, так как не приводит к заметному увеличению поглощения. Эти предельная толщина зависит от сопротивления материалов продуванию:

$$r = \frac{\Delta p}{v h},$$

где Δp – разность воздушных давлений по обе стороны слоя пористого материала, продуваемого потоком воздуха, v – скорость воздушного потока вне материала, h – толщина слоя пористого материала.

В литературе приводятся частотные характеристики звукопоглощения, относящиеся как к случаю, когда поглощающий материал плотно прилегает к поверхности твердой стенки, так и для случая, когда звукопоглотитель установлен с воздушным зазором относительно стенки или, как говорят, на “отnose”. В результате, при правильном подборе параметров пористого слоя получается примерно такая же частотная характеристика звукопоглощения, как у сплошного пористого слоя, имеющего толщину, равную толщине пористого слоя плюс воздушный промежуток.

Звуковые волны при падении на жёсткую отражающую поверхность совместно с отражёнными образуют систему стоячих волн, ближайшая пучность скорости которых находится на расстоянии $\lambda/4$ волны от отражающей

поверхности. Наибольшее поглощение получается, когда середина пористого слоя находится в этой пучности, т. е. при частоте

$$f = c/(4l),$$

где c – скорость звука в воздухе; l – расстояние от середины пористого слоя до отражающей поверхности.

Выше указанной частоты диффузный коэффициент звукопоглощения остаётся примерно постоянным.

Облицовка части внутренних поверхностей помещения звукопоглощающим материалом или конструкцией, а также размещение в помещении *штучных* (объёмных) *звукопоглотителей*, представляющих собой свободно подвешиваемые объёмные звукопоглощающие тела различной формы, называется *акустической обработкой*.

Эффективности звукопоглощающей обработки рассчитывается по формуле

$$\Delta L = 10 \lg \frac{B_1}{B},$$

где B и B_1 – постоянные помещения до и после его акустической обработки, м²:

$$B_1 = \frac{A + \Delta A}{1 - \alpha_1}.$$

Здесь α_1 – средний коэффициент звукопоглощения акустически обработанного помещения, определяемый соотношением

$$\alpha_1 = \frac{A + \Delta A}{S},$$

где S – общая суммарная площадь поверхностей помещения, ΔA – величина суммарного добавочного поглощения, вносимого конструкцией звукопоглощающей облицовки или штучными поглотителями

$$\Delta A = \alpha_{\text{обл}} S_{\text{обл}} + A_{\text{шт}} n.$$

Здесь $\alpha_{\text{обл}}$ – реверберационный коэффициент звукопоглощения конструкции облицовки; $S_{\text{обл}}$ – площадь этой конструкции; $A_{\text{шт}}$ – эквивалентная площадь звукопоглощения одного штучного звукопоглотителя; n – количество штучных поглотителей в помещении.

Эквивалентная площадь звукопоглощения A , не занятая звукопоглощающей облицовкой, определяется выражением

$$A = \alpha(S - S_{\text{общ}}),$$

где α – средний коэффициент звукопоглощения в помещении до его акустической обработки.

Величина снижения шума в зоне прямого звука рассматривается по более сложным зависимостям в области средних частот. Её значение не превышает 4...5 дБ. В зоне отражённого звука эти значения не превосходят 10...12 дБ. При необходимости снижения шума на большее значение звукопоглощающие облицовки следует применять совместно с другими мероприятиями по шумоглушению.

Применение акустической обработки помещений приводит к значительному улучшению самочувствия работающих, так как субъективно человек значительно лучше переносит шум в том случае, если легко определить направление, по которому приходит звук от источника.

Акустически обработанные поверхности помещения и штучные поглотители понижают интенсивность отражённых звуковых волн. Штучные звукопоглотители, если они расположены близко к источнику шума, частично уменьшают также и интенсивность прямого звука.

Целесообразность применения звуковых облицовок в помещении для снижения шума определяют из следующих соображений. Принято считать целесообразной акустическую обработку помещений в тех случаях, когда до её применения средний коэффициент звукопоглощения $\bar{\alpha}$ в активной полосе со среднегеометрической частотой 1000 Гц не превышает 0.25:

$$\bar{\alpha} = \frac{B}{B + S}; \quad \bar{\alpha} = \frac{A}{S_{\text{общ}}} \leq 0.25,$$

где $B = A/(1 - \alpha_{\text{ср}})$ – постоянная помещения; A – эквивалентная площадь звукопоглощения, т. е. площадь поверхности с коэффициентом звукопоглощения, равным 1, при равномерном распределении звука могли бы поглотить такое же количество энергии, как вся поверхность помещения и находящиеся в ней предметы.

Принято определять все характеристики, полагая постоянную помещения первичной величиной, полученной экспериментально на основании обобщения результатов измерений во многих помещениях, используя номограмму зависимости B от объёма помещений для различных их видов.

Для помещений с однотипным оборудованием, когда известен усреднённый спектр звукового давления, а также для помещений без собственных источников шума конструкции звукопоглощающих облицовок допускается выбирать без предварительного расчёта. Конструкцию звукопоглощающих облицовок подбирают по таблице акустических характеристик, у которых частотные характеристики реверберационного коэффициента звукопоглощения по возможности идентичны спектру звукового давления в рассматриваемом помещении и не имеют завала в области высоких частот.

Величины снижения уровней звукового давления могут быть определены только в зоне отражённого поля, когда $r_{\text{min}} > r_{\text{пр}}$, где $r_{\text{пр}}$ – предельный радиус – расстояние от источника шума, на котором уровень звукового давления отражённого звука равен уровню звукового давления прямого звука:

$$r_{\text{пр}} = 0.2\sqrt{B_{8000}}.$$

Здесь B_{8000} – постоянная помещения на частоте 8000 Гц.

Эффективность звукопоглощения в помещении тем больше, чем больше площадь акустической облицовки и чем ближе значение коэффициента звукопоглощения к 1.

Для удобства выполнения расчётов в табл. 8 приведены акустические характеристики некоторых материалов (значения коэффициентов звукопоглощения α).

Таблица 8

Звукопоглощающий материал или поверхность	Толщина, мм	Значение α в октавных полосах частот							
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Плиты ПАО минераловатные, акустические	20	0.02	0.03	0.17	0.68	0.98	0.86	0.45	0.20
Сталь	—	0.01							
Маты из супертонкого базальтового волокна	50	0.1	0.25	0.7	0.98	1.0	1.0	1.0	0.95
Маты из отходов капронового волокна	50	0.02	0.15	0.46	0.82	0.92	0.93	0.93	0.93
Войлок строительный	25	0.05	0.15	0.22	0.54	0.63	0.57	0.52	0.45
Стеклопластик	—	0.01	0.01	0.12	0.014	0.015	0.016	0.017	0.016

Звукопоглощение находит применение не только для снижения отражённого звука в помещениях, но является обязательным элементом таких конструкций защиты от шума, как звукоизолирующие кожухи. Звукопоглощение обозначает физический процесс перехода звуковой энергии в тепловую, а коэффициент поглощения α служит мерой звукопоглощения.

Очень важно, что в конструкциях звукоизоляции и звукопоглощение тесно связаны между собой в реальных процессах прохождения звука через звукоизолирующую преграду. Рассмотрим для примера прохождение звука из помещения с источником звука в соседнее (изолированное) (рис. 14).

При непрерывно работающем источнике звука и отсутствии поглощения звуковая энергия стремится к бесконечности, а звукоизоляция преграды – к нулю. Только наличие звукопоглощения в помещениях позволяет реализовать возможность звукоизоляции между ними. Звукопоглощение в реальных условиях может обеспечиваться не только специальными звукопоглощающими покрытиями, но и открытыми проёмами, а также прочими покрытиями, которые не воспринимаются звукопоглощающими (штукатуркой, обоями, деревянными панелями и пр.).

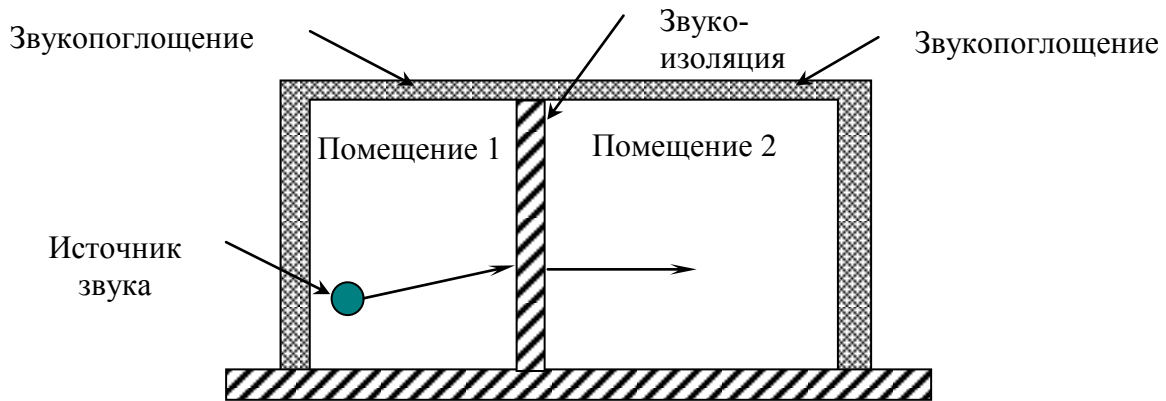


Рис. 14. Схема прохождения звука из одного помещения

Рассмотрим механизм прохождения звука через ограждение. Этот механизм заключается в том, что под воздействием падающих звуковых волн ограждение приводится в колебательное движение и само излучает звук.

Звукоизоляция следует так называемому закону масс, показывающему, что она возрастает с увеличением поверхностной массы преграды. Возрастание составляет 6 дБ на каждое удвоение массы. Эта же закономерность возрастания звукоизоляции проявляется при двукратном увеличении частоты. Поверхностная масса m — очень важная характеристика звукоизоляции $m = \rho_{\text{пр}} h_{\text{пр}}$, где $\rho_{\text{пр}}$ — удельная масса преграды, кг/м³; $h_{\text{пр}}$ — её толщина, м.

Зависимость звукоизоляции от массы и частоты можно представить в следующем виде

$$\text{ЗИ} = 20 \lg(mf) - 60. \quad (1)$$

На определённых частотах закон массы нарушается вследствие так называемого пространственного резонанса, связанного с усиленным звукоизлучением ограждения и с влиянием помещения, в котором расположена звукоизолирующая преграда. Наибольший провал звукоизоляции наблюдается на резонансной (или граничной) частоте ($f_{\text{гр}}$), что видно на рис. 15. Определим значение резонансной частоты (частоты совпадения), когда длина звуковой волны в воздухе равна длине изгибной волны в преграде (Гц):

$$f_{\text{гр}} = \frac{c^2}{1.8 c_{\text{п}} h_{\text{пр}}},$$

где $c_{\text{п}}$ — скорость продольной волны в преграде, м/с.

Когда звукоизоляция ухудшается, значение $f_{гр}$ возрастает с уменьшением толщины преграды, а также с увеличением её изгибной жёсткости. Например, для стали $f_{гр} = 12\,000/h_{п}$.

Увеличения звукоизоляции в области $f_{гр}$ можно добиться внесением потерь в изолирующую пластину (ограждение) за счёт изменения жёсткости

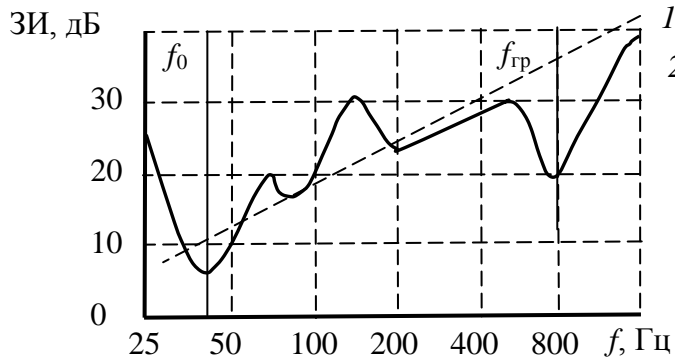


Рис. 15. Зависимость звукоизоляции от частоты звука

материала или покрытия пластины вибродемпфирующими материалами. Итак, обобщая вышеизложенное, можно сказать, что звукоизоляция возрастает при увеличении толщины, поверхностной массы, коэффициента потерь ограждения и уменьшении его изгибной жёсткости.

На звукоизоляцию (в области частот $f_{гр}$) помимо указанных факторов влияет

также характер заземления и размеры ограждения. Звукоизоляция возрастает с увеличением размеров. Дополнительная звукоизоляция достигается при замене одностенных ограждений двустенными (равной поверхности массы) за счёт появления дополнительной звукоизоляции воздушного промежутка. Звукоизоляция ухудшается при наличии в ограждении рёбер жёсткости (кроме области инфразвуковых частот), а особенно при наличии щелей, отверстий и проёмов.

Расчёт звукоизоляции

Формула (1) позволяет выполнить приблизительный расчёт звукоизоляции, так как она рассматривает весьма идеализированную картину однослойного ограждения (без учёта снижения звукоизоляции на критической частоте, а также снижения за счёт проёмов щелей и отверстий). В настоящее время существует большое разнообразие формул и методов расчёта, позволяющих получить эффективность звукоизоляции с большей или меньшей степенью достоверности. Среди всего многообразия подходов к расчёту однослойной звукоизоляции можно выделить аналитические и графоаналитические методы расчёта. При этом разные расчётные модели получены для тонких (легких) ограждений (пластин), где звук распространяется преимущественно в виде изгибных волн, т. е. пластин со сравнительно небольшой поверхностной массой и тяжёлых ограждающих конструкций (более 100 кг/м^2), например, из кирпича, бетона и т. д.

Для тонкостенных конструкций примем, что формула (1) справедлива до $f < 0.5f_{\text{гр}}$. Для значений $f > 0.5f_{\text{гр}}$ звукоизоляция определяется выражением

$$\text{ЗИ} = 20 \lg\left(\frac{\pi f m}{\rho c}\right) + 5 \lg \frac{f}{f_{\text{гр}}} + \lg \eta + 3,$$

где η – коэффициент потерь, характеризующий внутренние потери в ограждении (данные о коэффициентах потерь можно найти далее).

Для расчёта тяжёлых ограждений предпочтительно применять графо-аналитический метод. Этот метод основан на кусочно-линейном представлении хода кривой звукоизоляции.

Звукоизоляция ограждений из кирпича, бетона, железобетона и других строительных материалов ($100 < m < 1000 \text{ кг/м}^2$) рассчитывается в следующем порядке.

1. По горизонтальной оси через равные отрезки откладываются среднегеометрические значения октавных полос, Гц, по вертикальной – значения звукоизоляции ЗИ, дБ.

2. Далее строится частотная характеристика звукоизоляции ограждения, состоящая из двух участков АВ и ВС (рис. 16).

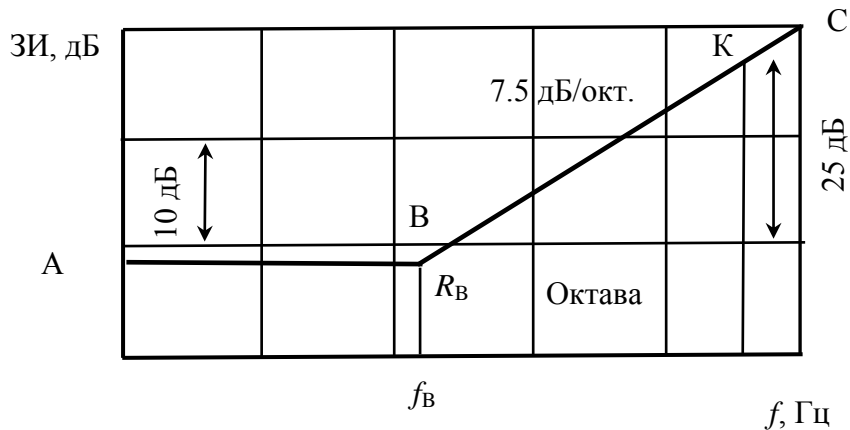


Рис. 16. Построение частотной характеристики звукоизоляции плоского однослойного ограждения ($m > 100 \text{ кг/м}^2$)

Для этого из рис. 17 по поверхностной массе ограждения m и его толщине h , см определяются координаты точки В: $\text{ЗИ}_В$ и $f_В$. Из точки В влево проводится горизонтальная прямая ВА до пересечения с осью координат, а вправо проводится прямая с наклоном 7.5 дБ/окт.

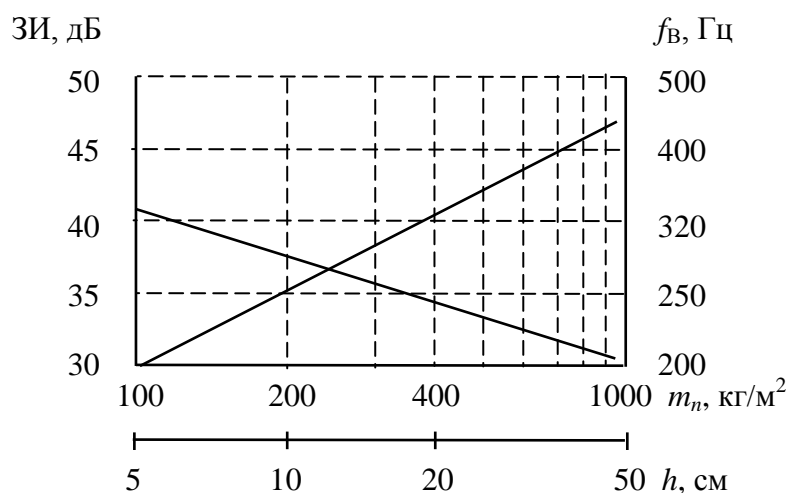


Рис. 17. Графики для нахождения координаты точки В частотной характеристики звукоизоляции ограждения

Пример. Построить частотную характеристику звукоизоляции кирпичной стены толщиной 0.12 м. Значения объёмной массы кирпича (из табл. 9) $\rho = 1700 \text{ кг/м}^3$.

Таблица 9

Материал	Плотность, кг/м^3
Бетон, железобетон	2600
Кирпич	1700
Шлакобетон	2000
Сталь	7800
Стекло	2400
Стекло органическое	1200
Асбоцемент	2300
Сухая штукатурка	2400

1. Определим поверхностную массу $m = \rho h = 1700 \cdot 0.12 = 204 \text{ кг/м}^2$.
2. По данным рис. 17 находим координаты точки В: $f_B = 290 \text{ Гц}$, $ЗИ_B = 36 \text{ дБ}$.
3. Точку В наносим на график (рис. 18).

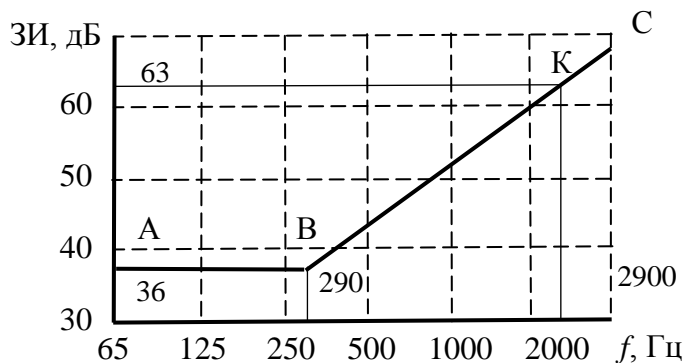


Рис. 18. Пример решения задачи

4. Из точки В влево проводим горизонтальную прямую, а вправо вверх — прямую с наклоном 7.5 дБ/окт. Для этого на графике отмечаем точку К с координатами: $f_K = 10f_c = 2900 \text{ Гц}$, $ЗИ_K = ЗИ_B + 25 = 36 + 25 = 61 \text{ дБ}$. Прямая ВК имеет наклон 7.5 дБ/окт.

Существуют методы построения частотных характеристик звукоизоляции плоского тонкого (лёгкого) ограждения (например, из стали, стекла). Такая характеристика имеет три характерные частотные области (рис. 19): область, близкая к закону масс (AB), область в области резонанса совпадения (BC) и область в области выше резонанса совпадения (CD).

Частотная характеристика звукоизоляции лёгкого ограждения строится следующим образом. По данным табл. 10 находят координаты точек В и С. Точки наносят на график и соединяют прямыми линиями. Далее из точки В проводят вниз влево прямую ВА с наклоном 4 дБ/окт до пересечения с осью ординат, а из точки С проводят прямую вправо вверх с наклоном 8 дБ/окт.

Таблица 10

Материал	f_B	ЗИ _В	ЗИ _С
Сталь	6000 /h	39	31
Силикатное стекло	8000 /h	35	29
Органическое стекло	17 000 /h	37	30

Примечание. Абсцисса точки С – $f_C = 2f_B$; h – толщина ограждения, мм

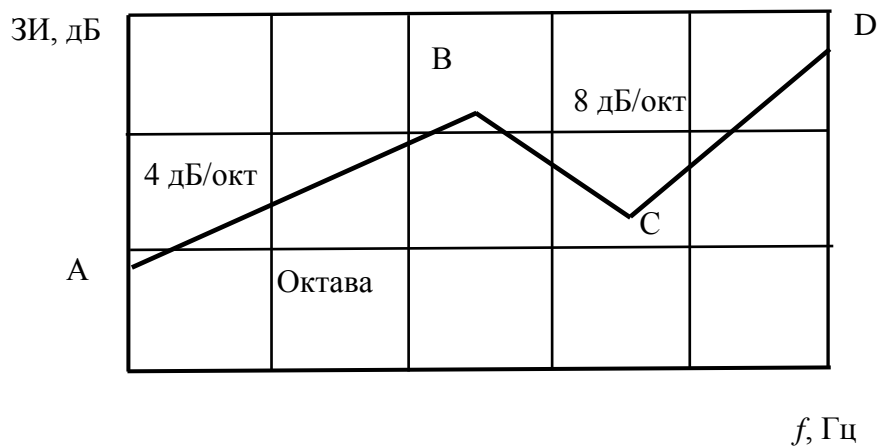


Рис. 19. Построение частотной характеристики звукоизоляции тонкого (лёгкого) ограждения

Значения звукоизоляции некоторых материалов, полученные экспериментально, приведены в табл. 11.

Следует различать собственную изоляцию материала и фактическую изоляцию кожуха ЗИ_{фак}. Фактическая изоляция кожуха определяется как разность уровней звуковых давлений, измеренных в одной и той же точке рабочей зоны до и после заключения источника шума в кожух. Если кожух изготовлен из одного материала $ЗИ_{фак} = ЗИ_{соб} + 10 \lg \alpha$, где α – коэффициент звукопоглощения внутренних поверхностей кожуха.

Тип ограждения	Материал	Толщина, мм	ЗИ, дБ, в третьоктавных полосах частот со среднегеометрическими значениями, Гц															
			100	125	160	200	250	320	400	500	640	800	1000	1250	1600	2000	2500	3200
Одинарные	Сталь	1.0	15	15	18	17	18	17	23	25	26	29	31	34	34	37	38	40
		3.0	20	23	29	27	27	27	29	32	34	37	38	40	41	42	42	41
	Алюминий	3.0	11	10	18	17	20	21	23	23	25	26	28	29	30	31	31	31
	Оргстекло	5.0	15	15	18	16	17	18	20	21	23	24	26	28	30	32	34	35
	Фанера	10.0	20	16	17	15	18	21	21	23	24	26	27	28	29	26	26	25
Слоистые и двойные	Алюминий с в/д слоем	2.0 + 2.0	15	15	20	18	20	22	23	25	21	23	24	30	32	34	36	37
	Стекло	$h = 5, d = 20$	18	16	16	22	24	26	24	28	33	35	38	39	40	37	30	35
	Алюминий	$d = 100, h = 2$	11	10	16	17	23	21	25	30	34	36	40	41	45	47	50	53

Примечание: в/д – вибродемпфирование; h – толщина слоя; d – толщина воздушного промежутка.

Если $\alpha < 1$, то $ЗИ_{\text{фак}} < ЗИ_{\text{соб}}$, так как при заключении источника шума внутри кожуха из-за многократных отражений от стен уровень звукового давления возрастает и $ЗИ_{\text{фак}} \cong ЗИ_{\text{соб}}$ только при $\alpha \cong 1$.

Влияние на звукоизоляцию отверстий и щелей

Наличие отверстий, щелей и проёмов существенно снижает эффективность звукоизоляции. При равной площади проём больше снижает звукоизолирующую способность звукоизолирующего ограждения чем щель, а щель –

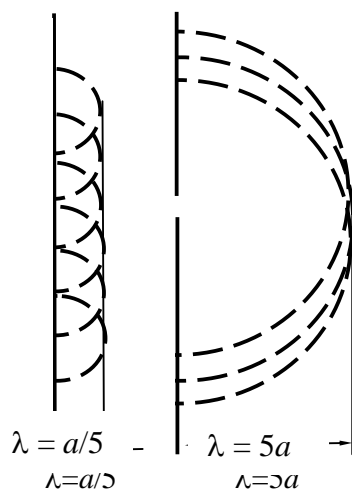


Рис. 20. К определению звукопроводности отверстий различного диаметра

больше чем отверстие (рис. 20). При сравнимом или большем поперечном размере проёма a по сравнению с длиной звуковой волны λ фронт проходящих через проём звуковых волн будет плоским, т. е. весь звук пройдёт через проём. Если имеет место большое соотношение λ/a (например, щель), то прошедшая волна будет цилиндрической или сферической, часть энергии отразится, не пройдя через щель.

Снижение звукоизоляции $\Delta ЗИ$ при наличии проёма, щели и отверстия зависит от их площади. При наличии проёма (размер a сравним с длиной звуковой волны) оно определяется как

$$\Delta \text{ЗИ}_{\text{пр}} = 10 \lg \frac{1 + 10^{0.1 \text{ЗИ}_{\text{огр}} S_{\text{пр}} / S_{\text{огр}}}}{1 + S_{\text{пр}} / S_{\text{огр}}},$$

где $S_{\text{пр}}$ – площадь проёма, м^2 ; $S_{\text{огр}}$ – площадь ограждения, м^2 ; $\text{ЗИ}_{\text{огр}}$ – звукоизоляция ограждения, дБ.

В практике бывают случаи, когда проём закрыт конструкцией, звукоизоляция которой меньше чем звукоизоляция ограждения (это характерно для незвукоизолированных окон и дверей). Снижение звукоизоляции ограждения определяется как

$$\Delta \text{ЗИ}_{\text{огр}} = 10 \lg \left[1 + \frac{S_{\text{o}}}{S_{\text{огр}}} (10^{0.1 (\text{ЗИ}_{\text{огр}} - \text{ЗИ}_{\text{o}})}) - 1 \right],$$

где S_{o} – площадь окна или двери, м^2 ; ЗИ_{o} – звукоизоляция окна или двери.

Пример. Пусть 0.1 часть ограждения обладает звукоизоляцией на 10 дБ меньшей чем основная. Определить ухудшение звукоизоляции.

$$\Delta \text{ЗИ}_{\text{огр}} = 10 \lg [1 + 0.1 (10^{0.1 (10)}) - 1] = 2.8 \text{ дБ}.$$

Ответ: ухудшение звукоизоляции ограждения составит почти 3 дБ.

Заметим, если разница звукоизоляции будет составлять 20 дБ, то снижение звукоизоляции составит 10 дБ.

Акустические экраны

Акустические экраны применяются для снижения шума агрегатов, к которым по условиям эксплуатации необходим постоянный доступ обслуживающего персонала. Самое широкое распространение акустические экраны получили для защиты жилой застройки от шума автомобильного и железнодорожного транспорта. Акустический эффект данного экрана определяется созданием зоны акустической тени за счёт отражения звука от его поверхности, обращённой к источнику шума. При этом наблюдается частичное огибание звуковой волной экрана за счёт дифракции (рис. 21). Эффективность экрана возрастает при увеличении угла дифракции и уменьшении длины звуковой волны. Угол дифракции является универсальной характеристикой экрана, связывающей его размеры и расположение в пространстве. При увеличении угла дифракции на каждые 10° эффективность возрастает приблизительно на 1 дБА (рис. 22).

Расчёт эффективности экранов имеет свои особенности. С небольшими (до 60°) углами дифракции её можно ориентировочно определить по формуле, предложенной Д. Маскавой:

$$\Delta L_{\text{экp}} = 10 \lg 40N - 10 \lg n,$$

где N – число Френеля $N = (A + B - d)/\lambda$ (стороны треугольника A , B , d показаны на рис. 21); n – число рёбер акустического экрана, через которые проходит звук в расчётную точку; λ – длина звуковой волны, м.

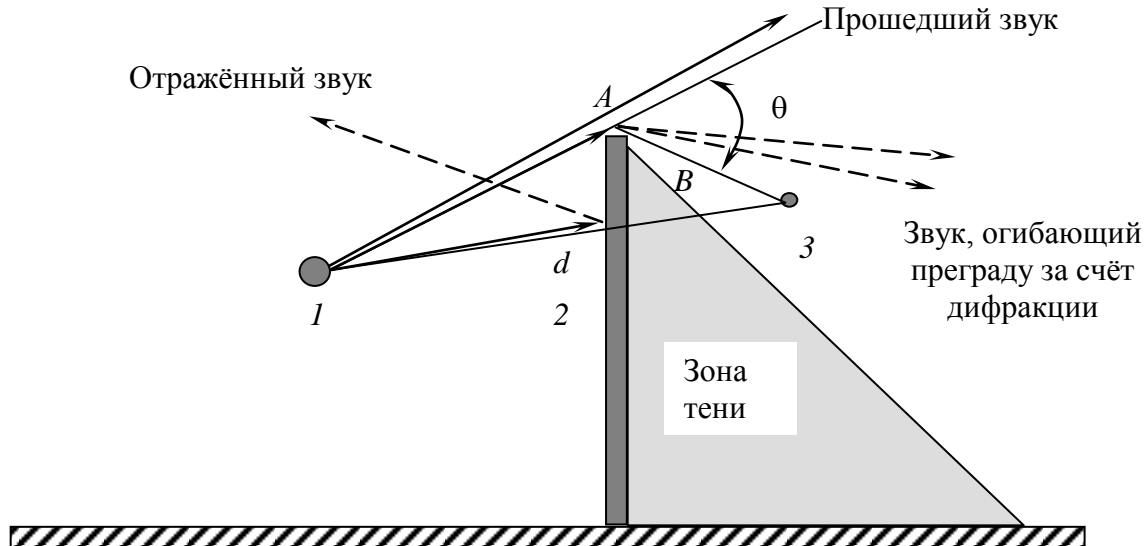


Рис. 21. Дифракция звуковых волн около экрана ограниченного размера: 1 – источник шума; 2 – акустический экран (θ – угол дифракции экрана); 3 – расчётная точка; d – расстояние между источником шума и расчётной точкой

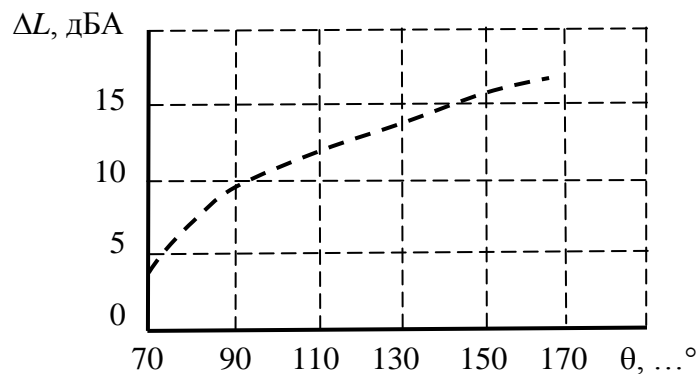


Рис. 22. Зависимость эффективности экрана от угла дифракции

На эффективность экрана оказывают влияние его размеры, материал, из которого он изготавливается, наличие и расположение звукопоглощающей облицовки; наличие отражающих поверхностей вблизи экрана и пр.

В большинстве случаев экраны и кожухи являются эффективным средством снижения шума на высоких частотах. Снизить шум на низких частотах значительно сложнее. Практика показывает, что наиболее эффективными в этом случае могут быть комбинированные средства защиты, например, применение двойного кожуха, установка двойного кожуха на виброизолирующие прокладки, армирование вибрирующих частей эпоксидным компаундом или бетоном, фиксирование кожухов на фундаментные болты и др.

Техническое нормирование шума

Для решения вопросов защиты от шума в большинстве случаев недостаточно знать имиссию, поскольку защитные меры должны быть направлены на ограничение эмиссии. Этой цели отвечает техническое нормирование шума. В отличие от санитарных норм, регламентирующих допустимый шум на рабочих местах, зависящий от вида труда, а не от типа источника его образования, единые технические нормы шума для всех видов машин ввести нельзя, так как они должны устанавливаться с учётом назначения машины и её конкретных технических параметров.

Разработка и введение технических норм шума являются первым этапом создания малошумных машин и возможны только на основе единой методики измерений их шумовых характеристик. Основной шумовой характеристикой машины является уровень её звуковой мощности в октавных полосах со среднегеометрическими частотами 31,5; 63; 125; 250; 500; 1000; 2000; 4000 и 8000 Гц, а вспомогательной – уровень скорректированной мощности, т. е. уровень мощности, определённой по результатам измерений уровней звука по шкале “А” шумомера.

Эмиссия характеризует непосредственно источник шума. Существующие стандарты требуют внесения излучаемой акустической мощности P в паспорт оборудования. Этот параметр является существенным при проведении сертификации оборудования. Уровень звуковой мощности L_P , дБ, можно выразить в виде

$$L_P = 10 \lg S + L_p, \quad (2)$$

где S – площадь всей поверхности, окружающей машину, м^2 ; L_p – средний уровень звукового давления или уровень среднеквадратичного значения звукового давления, который определяется по формуле

$$L_p = 10 \lg \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{0.1 L_i} \right), \quad (3)$$

где n – число измерений.

Уравнением (3) даётся простое приближённое соотношение между уровнем звуковой мощности L_P и средним уровнем звукового давления L_p , что позволяет нам определить уровень звуковой мощности, измеряя уровень звукового давления на воображаемой поверхности, окружающей машину. Строго говоря, уравнение (2) справедливо, когда измерения проводятся в свободном звуковом поле, однако для большого числа практических случаев его можно использовать для измерений в обычных лабораториях, если сделать соответствующие поправки на вклад отражённых звуков, создаваемых ограждениями помещения.

Средний уровень звукового давления в полосах частот $L_{\text{ср}}$, дБ, или средний уровень звука $L_{\text{Аср}}$, дБА, на измерительной поверхности в обычном лабораторном помещении вычисляют по формуле

$$L_{\text{ср}} = 10 \lg \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{0.1 L_i} \right) - k,$$

где L_i – уровень звукового давления в полосе частот, дБ, или уровень звука, дБА, в i -й точке измерения; n – количество точек измерения на измерительной поверхности; k – постоянная, учитывающая влияние отражённого звука от ограждений помещения в полосе частот, дБ, или в уровнях звука, дБА.

Если значения L_i , полученные в n точках измерений, отличаются друг от друга не более чем на 5 дБ (дБА), то величину $L_{\text{ср}}$ вычисляют по формуле

$$L_{\text{ср}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L_i - k.$$

Уровень звуковой мощности в полосах частот L_P , дБ, или скорректированный уровень звуковой мощности L_{PA} , дБА, вычисляют по формуле

$$L_P = L_{\text{ср}} + 10 \lg \frac{S}{S_0},$$

где $L_{\text{ср}}$ – средний уровень звукового давления в полосе частот или средний уровень звука на измерительной поверхности; S – площадь измерительной поверхности, м^2 ; $S_0 = 1 \text{ м}^2$.

Постоянную k можно рассчитать по формуле

$$k = 10 \lg \left[1 + 4SA_{\alpha} \left(1 - \frac{A_{\alpha}}{S_v} \right) \right].$$

Эквивалентную площадь звукопоглощения A_{α} приближённо вычисляют по формуле

$$A_{\alpha} = \alpha_s S_v,$$

где S_v – площадь ограждающих поверхностей в помещении, м^2 ; α_s – средний коэффициент звукопоглощения.

Площадь измерительной полусферы $S = 2 \pi R^2$.

Поскольку допустимая эмиссия связана с допустимой имиссией определёнными соотношениями, технические нормы требуют установления предельных значений шумовых характеристик машин.

Значения *предельно допустимых шумовых характеристик* (ПДШХ) машин устанавливаются исходя из требований обеспечения на рабочих местах шума, допустимого санитарным нормированием. В случае если значения шумовых характеристик машин, соответствующих лучшим достижениям аналогичной техники, превышает значения ПДШХ, допускается устанавли-

вать *технически достижимые значения шумовых характеристик* (ТДШХ) этих машин. Введение ТДШХ позволяет выпускать машины, которые не превышают определённой излучаемой мощности, отбраковывая превышающие последнюю. В этом случае разработчик обязан в документации на машину указать рекомендуемые мероприятия по снижению шума, которые следует провести при эксплуатации данной машины.

Значения ПДШХ, устанавливаемые в уровнях звукового давления для октавных полос частот, определяют для каждой октавной полосы по формуле

$$L_{\text{ПДШХ}} = L_{\text{доп}} + 10 \lg \frac{S}{S_0} - \Delta L,$$

где $L_{\text{доп}}$ – предельно допустимый уровень звукового давления или предельно допустимый уровень звука на рабочих местах по ГОСТ 12.1.003–83* или на местах нахождения людей по соответствующим нормативам, дБ (дБА); S – площадь измерительной поверхности, м²; $S_0 = 1 \text{ м}^2$; ΔL – поправка на групповую установку машин в типовых условиях эксплуатации, дБ.

Если фактические значения октавных уровней звука или эквивалентных уровней звука на рабочих местах при типовых условиях эксплуатации машины меньше установленных в ГОСТ 12.1.003–83*, то в формулу в качестве L_i должны быть подставлены эти фактические значения.

Поправка ΔL принимается равной 10, 6 и 3 дБ для машин с габаритными размерами, соответственно, до 1.5, 3.5 и 5 м и 0 дБ для машин, устанавливаемых в типовых условиях эксплуатации одиночно, и для машин с габаритными размерами свыше 5 м.

В случае если значения шумовых характеристик машины превышают значения ПДШХ, то допускается устанавливать согласованные в установленном порядке ТДШХ. Значение ТДШХ устанавливается по формуле

$$L_{\text{ТДШХ}} = L_{\text{фак}} + 10 \lg \frac{S}{S_0} - \Delta L,$$

где $L_{\text{фак}}$ – фактические значения октавных уровней звукового давления, дБ; S – площадь измерительной поверхности, м²; $S_0 = 1 \text{ м}^2$; ΔL – поправка на групповую установку, дБ.

ИНФРАЗВУК

Классификация инфразвука и воздействие его на человека

Источниками инфразвука являются медленно работающие машины, дизели, вентиляторы и другие устройства. Естественные генераторы инфразвука – буря и ветер. Было обнаружено, что интенсивный инфразвук с частотой 0.6 Гц создаётся мистралем. В условиях производства инфразвук, как правило, сочетается с низкочастотным шумом, в ряде случаев – и с низкочастотной вибрацией.

Выявить инфразвук на производстве можно по следующим признакам:

- *техническим* – высокая единичная мощность машины при сравнительно низком числе оборотов, ходов или ударов, флуктуация мощных потоков газов или жидкостей, передвижение машин по местности или дорогам и т. д.;
- *конструктивным* – большие габаритные размеры двигателей или рабочих органов, наличие замкнутых объёмов, возбуждаемых динамически и т. д.;
- *строительным* – большие площади перекрытий или ограждений источников шума, наличие замкнутых, звукоизолированных кабин и т. д.

По характеру спектра инфразвук подразделяется:

- на широкополосный инфразвук, с непрерывным спектром шириной более одной октавы;
- тональный инфразвук, в спектре которого имеются слышимые дискретные составляющие. Гармонический характер инфразвука устанавливают в октавных полосах частот по превышению уровня в одной полосе над соседними не менее чем на 10 дБ.

По временным характеристикам инфразвук подразделяется:

- на постоянный инфразвук, уровень звукового давления которого изменяется за время наблюдения не более чем в 2 раза (на 6 дБ) при измерениях по шкале шумомера “линейная” на временной характеристике “медленно”;
- непостоянный инфразвук, уровень звукового давления которого изменяется за время наблюдения не менее чем в 2 раза (на 6 дБ) при измерениях по шкале шумомера “линейная” на временной характеристике “медленно”.

Для человека инфразвук имеет самые различные последствия, выражающиеся в некоторых случаях в общей слабости, обмороках, параличе и др. Сильный инфразвук, вызывая вибрацию внутренних органов, особенно на резонансных частотах, может привести к остановке сердца, разрыву артерий, селезёнки и т. д.

Нормирование инфразвука

Нормирование инфразвука осуществляется в соответствии с санитарными нормами СН 2.2.4/2.1.8.583–96 “Инфразвук на рабочих местах, в жилых и общественных помещениях и на территории жилой застройки”.

Нормируемыми характеристиками постоянного инфразвука являются:

- уровни звукового давления L_p , дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами 2, 4, 8 и 16 Гц;
- уровни звукового давления, измеренные по шкале шумомера “линейная”, дБ_{Лин}, если разность между уровнями, измеренными по шкалам “линейная” и “А” на характеристике шумомера “медленно”, составляет не

менее 10 дБ. Общий (линейный) уровень звукового давления – величина, измеряемая по шкале шумомера “линейная” или рассчитанная путём энергетического суммирования уровней звукового давления в октавных полосах частот без корректирующих октавных поправок.

В качестве дополнительной характеристики для оценки инфразвука (например, в случае тонального инфразвука) могут быть использованы уровни звукового давления третьоктавных полос со среднегеометрическими частотами 1,6; 2; 2,5; 3,15; 4; 5; 6,3; 8; 10; 12,5; 16 и 20 Гц; их следует пересчитывать в уровни в октавных полосах частот.

Предельно допустимые уровни инфразвука на рабочих местах, допустимые уровни инфразвука в жилых и общественных помещениях и на территории жилой застройки приведены в табл. 12.

Таблица 12

Назначение помещений	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц				Общий уровень звукового давления, дБЛин
	2	4	8	16	
Работы с различной степенью тяжести и напряжённости трудового процесса в производственных помещениях и на территории предприятий:					
- работы различной степени тяжести;	100	95	90	85	100
- работы различной степени интеллектуально-эмоциональной напряжённости	95	90	85	80	95
Территория жилой застройки	90	85	80	75	90
Помещения жилых и общественных зданий	75	70	65	60	75

Для гигиенической оценки воздействия непостоянного инфразвука на человека введён эквивалентный уровень звукового давления. Нормируемыми характеристиками непостоянного инфразвука являются эквивалентные по энергии уровни звукового давления $L_{\text{ЭКВ}}$, дБ, в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами 2, 4, 8 и 16 Гц и эквивалентный общий уровень звукового давления, дБЛин, определяемые по формуле

$$L_{\text{ЭКВ}} = 10 \lg \left(\frac{1}{T} \sum_{i=1}^n t_i \cdot 10^{0.1 L_i} \right),$$

где T – период наблюдения, ч.; t_i – продолжительность действия шума с уровнем L_i , ч; n – общее число промежутков действия инфразвука; L_i – логарифмический уровень инфразвука в i -й промежуток времени, дБ.

Эквивалентный (по энергии) общий (линейный) уровень звукового давления $L_{\text{ЭКВ}}$, дБЛин, данного непостоянного инфразвука – уровень постоянного широкополосного инфразвука, который имеет такое же среднеквадрати-

ческое звуковое давление, что и данный непостоянный инфразвук в течение определённого интервала времени.

Для колеблющегося во времени и прерывистого инфразвука уровни звукового давления, измеренные по шкале шумомера “Лин”, не должны превышать 120 дБ.

При воздействии инфразвука на человека в течение суток – в рабочее и нерабочее время – суммарную оценку воздействия следует проводить в соответствии с “Методическими указаниями по гигиенической оценке производственной и непроизводственной шумовой нагрузки”.

Измерение и гигиеническая оценка инфразвука, а также профилактические мероприятия должны проводиться в соответствии с руководством 2.2.4/2.1.8–95 “Гигиеническая оценка физических факторов производственной и окружающей среды”.

В случае непостоянного инфразвукового воздействия рассчитывают эквивалентный уровень (линейный или скорректированный) давления инфразвука с учётом поправок (по табл. 13) на время действия, вычитаемых из значения измеренного уровня.

Таблица 13

Время воздействия, ч	8	7	6	5	4	3	2	1	0.5
Поправка, дБ	0	0.6	1.2	2.0	3.0	4.2	6.0	9.0	12.0

При превышении уровней звукового давления над нормативными следует проводить мероприятия по снижению инфразвука. Основным путём снижения следует считать снижение излучения инфразвука в источнике его образования. К сожалению, эффективность снижения распространяющегося инфразвука с помощью звукоизоляции, звукопоглощения и акустического экранирования чрезвычайно мала, что подтверждают ранее приведённые данные по шуму низких частот.

Эффективность снижения инфразвука может быть обеспечена с помощью активных средств подавления звука, например, противофазно направленного инфразвука тех же частот, что и основной инфразвук. Так, в лабораториях, где проводились опыты по исследованию инфразвука, источник последнего снабжался несколькими трубками (звуководами). Длина звуководов, направленных в зону облучения, была таковой, чтобы оба проводимых звука в точке облучения были в фазе, а звуководы, направленные в зону нахождения исследователя, различались на длину, равную половине длине инфразвуковой волны $\lambda/2$. Несмотря на положительные результаты экспериментальных исследований, реализация метода активного подавления инфразвука затруднительна и требует больших затрат.

ВИБРАЦИЯ

Классификация вибрации и воздействие её на человека

Проблемам защиты от вибрации уделяется большое внимание в связи с тем, что этот вредный производственный фактор

- причиной одной из самых тяжёлых профессиональных болезней – *вибрационной болезни*;
- причиной патологических изменений в тканях и органах или *вибротравмы*;
- источником шума;
- возможной причиной разрушения конструкций и деталей.

Широко известный исторический факт разрушения в результате вибрации Египетского моста в Санкт-Петербурге, после чего все воинские подразделения переходят мост по команде “не в ногу”. Существуют и другие примеры разрушений ответственных конструкций, результаты ослабления контактных соединений электротехнических изделий и т. д., которые явились причиной несчастных случаев и чрезвычайных ситуаций.

По способу передачи человеку различают *общую* и *локальную вибрацию*. Общая вибрация передаётся через опорные поверхности на теле человека, а локальная вибрация – в основном через руки. К локальной вибрации может относиться также вибрация, воздействующая на ноги сидящего человека и на предплечья при контакте с вибрирующими поверхностями рабочих столов. За рубежом имеется понятие вибрации, проходящей через всё тело, и вибрации, передающейся через руки.

Вибрация, проходящая через все тело, наблюдается при опоре тела на вибрирующую поверхность (например, при сидении на вибрирующем стуле, стоянии на вибрирующем полу или лежании на вибрирующей поверхности), при всех видах транспортировки и при работе в непосредственной близости от некоторых промышленных механизмов. Влияние вибрации, проходящей через все тело, обычно наиболее заметно в нижнем диапазоне, от 0.5 до 100 Гц. *Вибрация, передающаяся через руки*, оказывает вредное воздействие на более высоких частотах – 1 000 Гц и более. Частоты ниже 0.5 Гц могут стать причиной болезни движения или “морской болезни”. *Укачивание* может быть вызвано низкочастотным колебанием тела и некоторыми типами вращения тела.

Производственные воздействия вибрации, проходящей через все тело, наблюдаются на транспорте, а также при некоторых производственных процессах. Наземный, морской и воздушный транспорт может вызывать вибрацию, ведущую к недомоганию и влияющую на вид выполняемой работы или приводящую к травме. Наиболее сильную вибрацию и сотрясения могут вызывать наземный транспорт, включая наземные движущиеся механизмы, промышленные грузовые автомобили и сельскохозяйственные тракторы.

Биодинамика. Как и механические конструкции, человеческое тело резонирует частоты с максимальной механической отдачей. Человеческую реакцию на вибрацию нельзя объяснить только с точки зрения одиночной резонансной частоты. В организме создается множество резонансов, а резонансные частоты зависят от конкретных людей и положения их тел. Для описания способа, которым вибрация вызывает движение тела, часто используются две механические реакции: излучательная способность и сопротивление.

Излучательная способность показывает долю вибрации, передающейся от сиденья к голове. Излучательная способность тела в большой степени зависит от частоты вибрации, оси вибрации и положения тела. Вертикальная вибрация сиденья вызывает вибрацию по нескольким осям относительно головы, при вертикальных движениях головы наивысшая излучательная способность проявляется в диапазоне от 3 до 10 Гц.

Механическое сопротивление тела указывает силу, необходимую для движения тела при каждой частоте. Хотя сопротивление зависит от массы тела, вертикальное сопротивление человеческого тела обычно создает резонанс, соответствующий приблизительно 5 Гц. Механическое сопротивление тела, включая данный резонанс, оказывает большое влияние на способ передачи вибрации через опорную поверхность.

У человека выявлены резонансные частоты, например:

- 1.5...2 и 20...30 Гц – для головы в положении сидя при горизонтальных и вертикальных вибрациях соответственно;
- 6...9 Гц – для внутренних органов;
- 4...6 Гц – для всего тела;
- 60...90 Гц – для глазных яблок.

Вибрация, проходящая через всё тело, может явиться причиной:

– *дискомфорта* при выполнении работы;

– *помех в работе*. Вибрация может ослаблять восприятие информации (например, зрительное), передачу информации (например, посредством движений рук или ног) или комплексные центральные процессы, связывающие восприятие и передачу (обучение, память, принятие решений). Наибольшее воздействие вибрации, проходящей через все тело, сказывается на процессах получения входящей информации (в основном зрительной) и процессах передачи информации (непрерывный контроль деятельности рук). Вибрация может также вызывать усталость;

– *нервно-мышечных изменений*. Во время обычного активного движения двигательные механизмы управления действуют как упреждающий контроль, что постоянно регулируется дополнительной обратной связью от чувствительных элементов мышц, сухожилий и суставов. Вибрация вызывает пассивную реакцию человеческого тела, условие, которое в полной мере отличается от самоиндуктивной вибрации, вызываемой передвижением. Не-

контролируемое движение вперёд при вибрации является наиболее определённым изменением нормальной физиологической функции нервно-мышечной системы. Во время вибрации, проходящей через все тело, наблюдается бóльшая усталость спинных мышц, чем при нормальных позах сидения в отсутствие вибрации. Рефлексы сухожилий могут уменьшаться или вообще исчезать при синусоидальной вибрации, проходящей через все тело при частотах, приблизительно равных 10 Гц;

– *сердечно-сосудистых и респираторных изменений*. Изменения, наблюдаемые при вибрации, сравнимы с теми, которые происходят при умеренной физической работе (например, увеличение частоты сердечных сокращений, кровяного давления, расхода кислорода), даже при амплитуде вибрации, близкой к предельно допустимому значению. Были выявлены четыре основные группы сердечно-сосудистых расстройств у рабочих, подвергающихся вибрации, проходящей через все тело: периферийные расстройства, такие как синдром Рейнауда, развивающийся при воздействии вибрации, проходящей через все тело (т. е. ноги стоящих рабочих или руки водителей, находящиеся во время движения бóльшее время внизу); варикозное расширение вен на ногах, геморрой и варикоцеле; ишемическая болезнь сердца и гипертония; нейроваскулярные изменения;

– *сенсорных изменений и изменений в центральной нервной системе*. Изменение вестибулярной функции происходит при очень низких частотах или при резонансе всего тела. Сенсорное несоответствие между вестибулярной, визуальной и проприоцепторной (раздражение, получаемое через ткань) информацией, считается важным механизмом, лежащим в основе физиологических реакций организма на некоторые искусственно выполняемые движения. Импульсные вертикальные и горизонтальные вибрации пробуждают биопотенциалы головного мозга. Интенсивная вибрация, проходящая через все тело при частотах выше 40 Гц, может вызвать повреждения и расстройства центральной нервной системы;

– *увеличение риска возникновения заболеваний позвоночника*. Эпидемиологические исследования часто указывали на рост заболеваний позвоночника при длительной работе, связанной с интенсивной вибрацией (например, работа на тракторах или дорожных машинах). Интенсивная долговременная вибрация может нежелательным образом воздействовать на позвоночник и увеличивать опасность возникновения боли в области нижней части спины. Рост нетрудоспособности по достижении пенсионного возраста и длительное отсутствие на работе вследствие смещения межпозвоночных дисков наблюдались среди операторов кранов и трактористов. Вибрация при частоте от 40 до 50 Гц, воздействующая на работников, находящихся в стоячем положении, через ноги вызывала дегенеративное изменение костей ног;

– *возникновение проблем, связанных с женскими репродуктивными органами, беременностью и мужской мочеполовой системой*. Выявлен повышенный риск абортов, менструальных расстройств и аномалий

месторасположения внутренних органов (например, опущение матки), связанных с долговременным воздействием вибрации. Неизвестная пороговая величина вредных воздействий при беременности предполагает ограничение воздействий на производстве до минимально разумной степени. Опубликованы расходящиеся результаты по происхождению заболеваний мужской мочеполовой системы. В исследованиях, приведённых в публикациях, отмечается учащение заболевания простатитом.

Механическая вибрация, возникающая из силовых процессов или инструментов и поступающая в тело человека через пальцы или ладони рук, называется *вибрацией, передающейся через руки* (часто используются синонимы: вибрация, передаваемая через кисти рук и предплечья, и местная или сегментальная вибрация). Данная вибрация проходит сквозь тело от рук. Это явление связано с различными рабочими процессами в промышленности, сельском хозяйстве, горнодобывающей промышленности и строительстве, где вибрационные инструменты или обрабатываемые детали сжимаются и подаются к инструментам руками или пальцами. Силовые процессы и инструменты, которые подвергают руки операторов вибрации, широко распространены в нескольких промышленных областях. Воздействие вибрации, передаваемой через руки, возникает при использовании ручных силовых инструментов, применяемых на производстве (например, ударные инструменты для обработки металла, шлифовальные станки и другие вращающиеся инструменты, пневматические гаечные ключи ударного действия), в подземной добыче, горной промышленности и строительстве (например, бурильные молотки, отбойные молотки, пробоотборные молотки, виброуплотнители), сельском хозяйстве и лесной промышленности (например, цепные пилы, пилы для порубочных остатков, корообдирки) и в коммунальном хозяйстве (например, дорожные дробилки и бетоноломы, отбойные молотки, ручные шлифовальные станки). Вибрация, передаваемая через руки, может также исходить от вибрирующих рабочих мест, которые удерживаются руками оператора (например, станина шлифовального станка), а также от ручных вибрирующих регуляторов, как при работе с газонокосилкой или при управлении дорожными виброуплотнителями.

Термин *синдром вибрации, передаваемой через кисти рук и предплечья*, обычно используется для обозначения признаков и симптомов, связанных с вибрацией, передаваемой через руки, включая:

- сосудистые расстройства;
- периферийные неврологические расстройства;
- повреждения костей и суставов;
- прочие расстройства (всего тела, центральной нервной системы).

Биодинамика. На основании измерений излучательной способности было сделано заключение о том, что в высокочастотном диапазоне вибрация может явиться причиной повреждений мягких структур пальцев и ладоней, в

то время как низкочастотная вибрация с высокой амплитудой (например, от ударных инструментов) может быть связана с травмами запястья, локтя и плеча.

Вибрация, проходящая через руки, может явиться причиной:

– *субъективного дискомфорта*. Вибрация воспринимается различными механорецепторами кожи, которые располагаются в эпидермальных и подкожных тканях ровной и обнажённой (гладкой) кожи. Они классифицируются на две категории – медленно и быстро адаптирующиеся в зависимости от адаптационных свойств и рецептивного поля. Способность человека чувствовать вибрацию понижается с увеличением частоты как для комфортных, так и для раздражительных уровней вибрации. Считается, что вертикальная вибрация вызывает бóльший дискомфорт, чем вибрация в других направлениях;

– *помех в работе*. У работников, подвергающихся воздействию вибрации, находящихся в холодной окружающей среде, повторяющиеся эпизоды острого ухудшения осязательной чувствительности могут привести к постоянному сокращению сенсорного восприятия и потере манипуляционной способности, что, в свою очередь, может повлиять на рабочую деятельность, увеличивая риск травм вследствие несчастных случаев;

– *неврологических проблем*. Рабочие, управляющие вибрирующими инструментами, могут испытывать покалывание и онемение пальцев рук. Если воздействие вибрации продолжается, эти симптомы имеют тенденцию к ухудшению и могут повлиять на производительность труда и жизненную активность. У рабочих, подвергшихся действию вибрации, могут проявляться вибрационные, термические и осязательные пороги при клинических обследованиях. Продолжительное воздействие вибрации может не только снижать возбудимость кожных рецепторов, но также вызывать патологические изменения в нервах пальцев, такие как периневральные отеки, вызываемые фиброзом и потерей нервных волокон. *Синдром канала запястья* (СКЗ) – заболевание, возникающее вследствие компрессии центрального нерва, проходящего через анатомический канал запястья. СКЗ считается общим заболеванием для некоторых профессиональных групп, использующих вибрационные инструменты (буровые рабочие, лудильщики и рабочие лесной промышленности). Считается, что эргономические стресс-факторы, воздействующие на кисть руки и запястье (повторяющиеся движения, силовое сжатие, неудобное положение), кроме вибрации, могут вызывать синдром канала запястья у рабочих, использующих вибрационные инструменты;

– *сосудистых заболеваний*. Джованни Лориго, итальянский физик, первым отметил в 1911 г., что забойщики, использующие пневматические молотки для мрамора и брусчатки на площадях Рима, страдали от периодического побеления пальцев, схожего с сужением кровеносных сосудов пальцев в результате реакции на холод или эмоциональный стресс. Для описания сосудистых заболеваний, вызываемых вибрацией в литературе ис-

пользовались различные синонимы: омертвевший или побелевший палец, симптом Рейнауда профессионального происхождения, травматическое вазоспастическое заболевание. Недавно появился новый термин – симптом побеления пальца, вызываемый вибрацией (СППВ). С клинической точки зрения СППВ характеризуется эпизодическим побелением или побледнением пальцев из-за спастического закрытия пальцевых артерий. Приступы обычно вызываются холодом и длятся от 5 до 30...40 мин. Во время приступа может ощущаться полная потеря чувствительности. Обычно в фазе восстановления от согревания и местного массажа может появляться покраснение на поражённых пальцах, как результат реактивного возрастания потока крови в кожных сосудах. В исключительно редких случаях многократные и тяжёлые вазоспастические приступы в пальцах могут приводить к трофическим изменениям (образование язвы или гангрены) на коже кончиков пальцев;

– *прочих заболеваний. Вибрационное расстройство* включает признаки и симптомы дисфункции автономных центров мозга (например, постоянная усталость, головная боль, возбудимость, расстройство сна, импотенция, электроэнцефалографические аномалии и т. д.).

Таким образом, обладая большой биологической активностью, вибрация может вызывать как травмы, так и болезни (вибрационную и шумовую). Здоровья восстанавливается во время лечения болезни очень медленно, а эффективное лечение возможно только на ранних стадиях развития заболеваний.

По *источнику возникновения* вибраций различают:

– локальную вибрацию, передающуюся человеку от ручного механизированного инструмента (с двигателями), органов ручного управления машинами и оборудованием;

– локальную вибрацию, передающуюся человеку от ручного немеханизированного инструмента (без двигателей), например, рихтовочных молотков разных моделей и обрабатываемых деталей;

– общую вибрацию 1-й категории – транспортную вибрацию, воздействующую на человека на рабочих местах самоходных и прицепных машин, транспортных средств при движении по местности, агрофонам и дорогам (в том числе при их строительстве). К источникам транспортной вибрации относят: сельскохозяйственные и промышленные тракторы, самоходные сельскохозяйственные машины (в том числе комбайны); автомобили грузовые (в том числе тягачи, скреперы, грейдеры, катки и т. д.); снегоочистители, самоходный горно-шахтный рельсовый транспорт;

– общую вибрацию 2-й категории – транспортно-технологическую вибрацию, воздействующую на человека на рабочих местах машин, перемещающихся по специально подготовленным поверхностям производственных помещений, промышленных площадок, горных выработок. К источникам транспортно-технологической вибрации относят: экскаваторы (в том числе роторные), краны промышленные и строительные, машины для загрузки (за-

валочные) мартеновских печей в металлургическом производстве; горные комбайны, шахтные погрузочные машины, самоходные бурильные каретки; путевые машины, бетоноукладчики, напольный производственный транспорт;

– общую вибрацию 3-й категории – технологическую вибрацию, воздействующую на человека на рабочих местах стационарных машин или передающуюся на рабочие места, не имеющие источников вибрации. К источникам технологической вибрации относят: станки металло- и деревообрабатывающие, кузнечно-прессовое оборудование, литейные машины, электрические машины, стационарные электрические установки, насосные агрегаты и вентиляторы, оборудование для бурения скважин, буровые станки, машины для животноводства, очистки и сортировки зерна (в том числе сушилки), оборудование промышленности стройматериалов (кроме бетоноукладчиков), установки химической и нефтехимической промышленности и др.

Общую вибрацию категории 3 по месту действия подразделяют на следующие типы:

а) на постоянных рабочих местах производственных помещений предприятий;

б) на рабочих местах на складах, в столовых, бытовых, дежурных и других производственных помещений, где нет машин, генерирующих вибрацию;

в) на рабочих местах в помещениях заводоуправления, конструкторских бюро, лабораторий, учебных пунктов, вычислительных центров, здравпунктов, конторских помещениях, рабочих комнатах и других помещениях для работников умственного труда;

– общую вибрацию в жилых помещениях и общественных зданиях от внешних источников: городского рельсового транспорта (мелкого залегания и открытые линии метрополитена, трамвай, железнодорожный транспорт) и автотранспорта; промышленных предприятий и передвижных промышленных установок (при эксплуатации гидравлических и механических прессов, строгальных, вырубных и других металлообрабатывающих механизмов, поршневых компрессоров, бетономешалок, дробилок, строительных машин и др.);

– общую вибрацию в жилых помещениях и общественных зданиях от внутренних источников: инженерно-технического оборудования зданий и бытовых приборов (лифты, вентиляционные системы, насосные, пылесосы, холодильники, стиральные машины и т. п.), а также встроенных предприятий торговли (холодильное оборудование), предприятий коммунально-бытового обслуживания, котельных и т. д.

По *направлению действия* вибрацию подразделяют в соответствии с направлением осей ортогональной системы координат:

– на *локальную вибрацию*, действующую вдоль осей ортогональной системы координат $X_{\text{л}}$, $Y_{\text{л}}$, $Z_{\text{л}}$, где ось $X_{\text{л}}$ параллельна оси места охвата источника вибрации (рукоятки, ложемент, рулевого колеса, рычага управления, удерживаемого в руках обрабатываемого изделия, и т. п.), ось $Y_{\text{л}}$ перпендикулярна ладони, а ось $Z_{\text{л}}$ лежит в плоскости, образованной осью $X_{\text{л}}$ и направлением подачи или приложения силы (или осью предплечья, когда сила не прикладывается);

– *общую вибрацию*, действующую вдоль осей ортогональной системы координат X_0 , Y_0 , Z_0 , где X_0 (от спины к груди) и Y_0 (от правого плеча к левому) – горизонтальные оси, направленные параллельно опорным поверхностям; Z_0 – вертикальная ось, перпендикулярная опорным поверхностям тела в местах его контакта с сиденьем, полом и т. п.

По *характеру спектра* выделяют:

– *узкополосные вибрации*, у которых контролируемые параметры в одной третьоктавной полосе частот более чем на 15 дБ превышают значения в соседних третьоктавных полосах;

– *широкополосные вибрации* – с непрерывным спектром шириной более одной октавы.

По *частотному составу* выделяют:

– *низкочастотные* вибрации (с преобладанием максимальных уровней в октавных полосах частот 1...4 Гц для общих вибраций, 8...16 Гц – для локальных вибраций);

– *среднечастотные* вибрации (8...16 Гц – для общих вибраций, 31.5...63 Гц – для локальных вибраций);

– *высокочастотные* вибрации (31.5...63 Гц – для общих вибраций, 125...1000 Гц – для локальных вибраций).

По *временным характеристикам* выделяют:

– *постоянные вибрации*, для которых значение нормируемых параметров изменяется не более чем в 2 раза (на 6 дБ) за время наблюдения;

– *непостоянные вибрации*, для которых значение нормируемых параметров изменяется не менее чем в 2 раза (на 6 дБ) за время наблюдения не менее 10 мин при измерении с постоянной времени 1 с, в том числе:

а) *колеблющиеся во времени* вибрации, для которых значение нормируемых параметров непрерывно изменяется во времени;

б) *прерывистые* вибрации, когда контакт человека с вибрацией прерывается, причем длительность интервалов, в течение которых имеет место контакт, составляет более 1 с;

в) *импульсные* вибрации, состоящие из одного или нескольких вибрационных воздействий (например, ударов), каждый длительностью менее 1 с.

Нормирование вибраций

Принципы нормирования вибраций строятся на том, что вибрация в жилых и общественных зданиях не должна вызывать у человека значительного беспокойства и существенных изменений показателей функционального состояния систем и анализаторов, чувствительных к вибрационному воздействию, а при выполнении работ на рабочем месте – не должна явиться причиной заболеваний или отклонений в состоянии здоровья в течение всего рабочего стажа, а также в отдаленные сроки жизни настоящего и последующих поколений.

В качестве факторов, влияющих на степень и характер неблагоприятного воздействия вибрации, должны учитываться:

- риски (вероятности) проявления различной патологий вплоть до профессиональной вибрационной болезни;
- показатели физической нагрузки и нервно-эмоционального напряжения;
- влияние сопутствующих факторов, усугубляющих воздействие вибрации (охлаждение, влажность, шум, химические вещества и т. п.);
- длительность и прерывистость воздействия вибрации;
- длительность рабочей смены.

Нормирование вибрации ведётся в соответствии с санитарными нормами СН 2.2.4/2.1.8.566–96 “Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий” и ГОСТ 12.1.012–90 “Вибрационная безопасность. Общие требования”.

Гигиеническая оценка постоянной и непостоянной вибрации, воздействующей на человека, должна производиться следующими методами:

- частотным (спектральным) анализом нормируемого параметра;
- интегральной оценкой по частоте нормируемого параметра;
- интегральной оценкой с учётом времени вибрационного воздействия по эквивалентному (по энергии) уровню нормируемого параметра.

Нормируемый диапазон частот устанавливается:

- для локальной вибрации в виде октавных полос со среднегеометрическими частотами: 8; 16; 31.5; 63; 125; 250; 500; 1000 Гц;
- для общей вибрации в виде октавных или третьоктавных полос со среднегеометрическими частотами: 0.8; 1; 1.25; 1.6; 2.0; 2.5; 3.15; 4.0; 5.0; 6.3; 8.0; 10.0; 12.5; 16.0; 20.0; 25.0; 31.5; 40.0; 50.0; 63.0; 80.0 Гц.

При частотном (спектральном) анализе нормируемыми параметрами являются средние квадратические значения виброскорости v и виброускорения a или их логарифмические уровни L_v , L_a , измеряемые в одно- и третьоктавных полосах частот.

При интегральной оценке по частоте нормируемым параметром является скорректированное значение виброскорости и виброускорения (U) или их

логарифмические уровни (L_U) измеряемые с помощью корректирующих фильтров или вычисляемые по формулам

$$U = \sqrt{\sum_{i=1}^n (U_i k_i)^2} \text{ или } L_U = 10 \lg \sum_{i=1}^n 10^{0.1(L_{U_i} + L_{k_i})},$$

где U_i – среднее квадратическое значение виброскорости или виброускорения, L_{U_i} – их логарифмические уровни в i -й частотной полосе; n – число частотных полос (1/3 или 1/1 окт) в нормируемом частотном диапазоне; k_i , L_{k_i} – весовые коэффициенты для i -й частотной полосы, соответственно, для абсолютных значений или их логарифмических уровней, определяемые по специальным таблицам, приведённым в СН 2.2.4/2.1.8.566–96.

Предельно допустимые значения нормируемых параметров производственной локальной вибрации при длительности вибрационного воздействия 480 мин (8 ч) приведены в табл. 14.

Таблица 14

Среднегеометрические частоты октавных полос, Гц	Предельно допустимые значения по осям X_L , Y_L , Z_L *			
	виброускорения		виброскорости	
	м/с ²	дБ	м/с · 10 ⁻²	дБ
8	1.4	123	2.8	115
16	1.4	123	1.4	109
31.5	2.8	129	1.4	109
63	5.6	135	1.4	109
125	11.0	141	1.4	109
250	22.0	147	1.4	109
500	45.0	153	1.4	109
1000	89.0	159	1.4	109
Корректированные и эквивалентные корректированные значения и их уровни	2.0	126	2.0	112

* Работа в условиях воздействия вибрации с уровнями, превышающими настоящие санитарные нормы более чем на 12 дБ (в 4 раза) по интегральной оценке или в какой-либо октавной полосе, не допускается.

Предельно допустимые значения нормируемых параметров вибрации рабочих мест при длительности вибрационного воздействия 480 мин (8 ч) для различных категорий вибраций (транспортной, транспортно-технологической и трёх типов технологической вибрации “а”, “б” и “в”) приведены в таблицах СН 2.2.4/2.1.8.566–96.

Допустимые значения нормируемых параметров вибрации в жилых помещениях, палатах больниц и санаториев приведены в табл. 15.

Таблица 15

Среднегеометрические частоты полос, Гц	Допустимые значения по осям X_0, Y_0, Z_0			
	виброускорения		виброскорости	
	м/с ² · 10 ⁻³	дБ	м/с · 10 ⁻⁴	дБ
2	4.0	72	3.2	76
4	4.5	73	1.8	71
8	5.6	75	1.1	67
16	11.0	81	1.1	67
31,5	22.0	87	1.1	67
63	45.0	93	1.1	67
Корректированные и эквивалентные корректированные значения и их уровни	4.0	72	1.1	67

Примечания: 1. В дневное время в помещениях допустимо превышение нормативных уровней на 5 дБ.

2. Для непостоянной вибрации к допустимым значениям уровней, приведенным в табл. 15, вводится поправка 10 дБ, а абсолютные значения умножаются на 0.32.

3. В палатах больниц и санаториев допустимые уровни вибраций нужно снижать на 3 дБ.

Допустимые значения нормируемых параметров вибрации в административно-управленческих помещениях и в помещениях общественных зданий приведены в табл. 16.

Таблица 16

Среднегеометрические частоты полос, Гц	Допустимые значения по осям X_0, Y_0, Z_0			
	виброускорения		Виброскорости	
	м/с ² · 10 ⁻³	дБ	м/с · 10 ⁻³	дБ
2	10.0	80	0.79	84
4	11.0	81	0.45	79
8	14.0	83	0.28	75
16	28.0	89	0.28	75
31,5	56.0	95	0.28	75
63	110.0	101	0.28	75
Корректированные и эквивалентные корректированные значения и их уровни	10	80	0.28	75

Примечания: 1. Для непостоянной вибрации к допустимым значениям уровней, приведенным в табл. 16, вводится поправка 10 дБ, а абсолютные значения умножаются на 0.32.

2. Для помещений школ, учебных заведений, читальных залов библиотек вводится поправка 3 дБ.

Доза вибрации определяется по формуле $D = \int_0^T U^m(t) dt$, где $U(t)$ – скорректированное по частоте значение контролируемого параметра в момент

времени t , $\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$ или $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$; T – время воздействия вибрации, с; m – показатель эквивалентности физиологического воздействия вибрации, устанавливаемый санитарными нормами.

При интегральной оценке вибрации с учётом времени её воздействия по эквивалентному (по энергии) уровню нормируемым параметром является эквивалентное скорректированное значение виброскорости или виброускорения ($U_{\text{ЭКВ}}$) или их логарифмический уровень ($L_{U_{\text{ЭКВ}}}$), измеренное или вычисленное по формуле

$$U_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n U_i^2 t_i \right) / T} \quad \text{или} \quad L_{U_{\text{ЭКВ}}} = 10 \lg \left(\sum_{i=1}^n 10^{0.1 L_i} \cdot t_i \right),$$

где U_i – скорректированное по частоте значение контролируемого параметра виброскорости, или виброускорения; t_i – время действия вибрации, ч;

$T = \sum_{i=1}^n t_i$, n – общее число интервалов действия вибрации.

Защита от вибраций

Снижение вибрации достигается теми же средствами, что и шума:

- снижением вибрации в источнике её образования (снижение возмущающих сил, уменьшение частоты вращения и т. д.);
- снижением вибрации на пути распространения от источника до рабочего места (виброизоляция, вибродемпфирование передающих поверхностей, использование гибких вставок, увеличение массы передающих конструкций и т. д.);
- снижением вибрации на рабочем месте (применение, например, виброзащитных сидений и настилов).

По возможности желательно уменьшить вибрацию в источнике. Это может повлечь сокращение волнообразных движений грунта или снижение скорости движения транспортных средств. Другие методы сокращения передачи вибрации операторам требуют понимания характеристик вибрации окружающей обстановки и путей передачи вибрации человеку. Например, амплитуда вибрации часто изменяется в зависимости от местоположения: в некоторых зонах будут испытываться пониженные амплитуды.

Методы снижения вибрации в приёмнике могут быть самыми разнообразными и применяться как при общей так и локальной вибрации. К примеру, чтобы снизить вибрацию, сиденья следует конструировать особым образом. Большинство из них оказывают резонанс при низких частотах, что приводит к повышенным амплитудам вертикальной вибрации на сиденье, а не на полу! Резонансные частоты обычных сидений соответствуют примерно 4 Гц. Усиление резонанса частично определяется амортизацией сиденья. Ис-

пользование подушек увеличивает амортизации, что ведёт к сокращению коэффициента усиления резонанса и к повышению излучательной способности при высоких частотах. Из-за разнообразных возможностей вибропередачи между сиденьями люди испытывают различные ощущения при вибрации. Так называемые антивибрационные перчатки могут обеспечить относительную изоляцию высокочастотных компонентов вибрации некоторых типов инструментов при воздействии локальной вибрации.

Вибропоглощение. Эффект любых вибропоглощающих покрытий наблюдается лишь на резонансных частотах. Вне резонанса эти эффекты практически отсутствуют. Рассмотрим вибропоглощение конструкций с коэффициентом внутренних потерь, который определяется как

$$\eta = \Delta f / f_0,$$

где Δf – полоса частот, равная половине ширины резонансной кривой в точках, в которых амплитуда колебаний системы уменьшается до 0.707 амплитуды при резонансе; f_0 – резонансная частота.

Уменьшение амплитуды колебаний металлических конструкций при облицовке вибропоглощающим покрытием ΔY , дБ, определяется выражением

$$\Delta Y = 20 \lg \left(\frac{\eta_1 + \eta_3}{\eta_1} \right),$$

где η_1 – коэффициент потерь металлической конструкции до покрытия; η_3 – коэффициент потерь в конструкции, облицованной покрытием.

Виброизоляция – метод снижения структурного звука, основанный на отражении вибрации в виброизоляторах. Эффект виброизоляции подобно звукоизоляции основан на отражении звука в виброизолирующей прокладке (рис. 23).

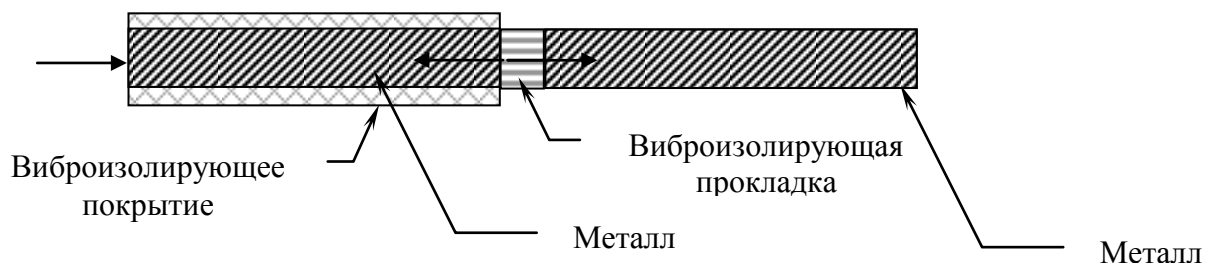


Рис. 23. Принцип действия виброизоляции

Поскольку эффект виброизоляции основан на отражении звуковой энергии и определяется при переходе из одной среды в другую произведением плотности среды на скорость распространения звука в этой среде ($\rho \cdot c$), то

в отличие от звукоизоляции виброизолирующая прокладка должна соответствовать условию, при котором произведение ($\rho \cdot c$) прокладки должно быть значительно меньше соответствующего соотношения без неё.

Для уменьшения плотности звуковой энергии в металле за счёт отражения энергии на границе “металл – виброизолирующая прокладка” металл следует оклеить виброизолирующим покрытием, т. е. применять виброизоляцию совместно с вибропоглощением.

Индивидуальные средства защиты от вибрации в основном предназначены для уменьшения воздействия локальной вибрации. К ним относятся виброзащитные рукавицы, представляющие устройство с мягкой поролоновой прокладкой. Также используется и виброзащитная обувь, предназначенная для снижения общей вибрации при работе человека на вибрирующей поверхности в стоячем положении.

Вибродемпфирование – способ защиты от звуковой вибрации путём перехода вибрационной энергии в тепловую в вибродемпфирующих покрытиях.

УЛЬТРАЗВУК

Классификация ультразвука и воздействие его на человека

Человека эволюционировал в среде ультразвука: колебания с частотой свыше 20 кГц невысокой интенсивности присутствуют в голосе человека, шуме ветра, скрипе деревьев и т. д. Однако факторы, в которых человек жил и развивался, не являются для него вредными. Проблема защиты от ультразвука возникла в середине прошлого века с внедрением мощного ультразвука для интенсификации многих промышленных процессов. В настоящее время ультразвук находит широкое применение в промышленности, медицине, быту и т. д. Он применяется в практике физических, физико-химических и биологических исследований, для дефектоскопии, навигации, подводной связи, ускорения химико-технологических процессов, получения эмульсий, сушки, очистки, сварки и других процессов, диагностики и лечения заболеваний.

Источником ультразвука является оборудование, в котором генерируются ультразвуковые колебания для выполнения технологических процессов, технического контроля и измерений, а также оборудование, при эксплуатации которого ультразвук возникает как сопутствующий фактор. Это все виды ультразвукового технологического оборудования, ультразвуковые приборы и аппаратура промышленного, медицинского, бытового назначения, генерирующие ультразвуковые колебания в диапазоне частот от 18 кГц до 100 МГц и выше, высокочастотные технологические установки для контактной или индукционной сварки труб или индукционного нагрева заготовок и т. д.

Существенным недостатком ультразвуковых установок является интенсивный шум, сопровождающий их работу. Исследование шумовых харак-

теристик большого числа различных установок показало, что спектры их шума содержат как непрерывные, так и дискретные составляющие, на 10...15 дБ превышающие уровень непрерывных составляющих. Поэтому с некоторым допущением шум ультразвуковых установок можно считать дискретным. Максимальная составляющая имеет частоту, равную рабочей частоте установки (1-я гармоника), уровни следующих гармоник убывают с увеличением их номера. Отмечается высокий уровень на частоте, равной половине рабочей (так называемая 1-я субгармоника), значительно реже на частоте, равной 1/4 рабочей (2-я субгармоника). Таким образом, характерной особенностью шума современного ультразвукового оборудования, использующего рабочие частоты, лежащие на границе звукового и ультразвукового диапазонов, является наличие в спектре как звуковых, так и ультразвуковых составляющих. Вопрос об их относительной опасности для человека широко дискутировался в литературе. В нашей стране работы ряда авторов убедительно доказали значительно более высокую вредность звуковых составляющих по сравнению с ультразвуковыми.

Ультразвук может действовать как через воздушную, так и через жидкую или твердую среду (контактное воздействие). Высокочастотный ультразвук через воздух, как правило, не передается. *Контактная среда* – среда (твердая, жидкая, газообразная), в которой распространяются ультразвуковые колебания при контактном способе передачи. Ультразвук обладает главным образом локальным действием на организм, поскольку передается при непосредственном контакте с ультразвуковым инструментом, обрабатываемыми деталями или средами, где возбуждаются ультразвуковые колебания.

Ультразвуковые колебания *могут распространяться*:

- *контактным способом* – ультразвук распространяется при соприкосновении рук или других частей тела человека с источником ультразвука, обрабатываемыми деталями, приспособлениями для их удержания, озвученными жидкостями, сканерами медицинских диагностических приборов, физиотерапевтической и хирургической ультразвуковой аппаратурой и т. д.;

- *воздушным способом* – ультразвук распространяется по воздуху.

Типы источников ультразвуковых колебаний:

- ручные;
- стационарные.

По спектральным характеристикам ультразвуковых колебаний выделяют:

- *низкочастотный ультразвук* – 16...63 кГц (указаны среднегеометрические частоты октавных полос);
- *среднечастотный ультразвук* – 125...250 кГц;
- *высокочастотный ультразвук* – 1.0...31.5 МГц.

По режиму генерирования ультразвуковых колебаний выделяют:

- постоянный ультразвук;
- импульсный ультразвук.

По способу излучения ультразвуковых колебаний выделяют:

- источники ультразвука с магнитострикционным генератором,
- источники ультразвука с пьезоэлектрическим генератором.

Несмотря на то, что человек не слышит ультразвука, последний воздействует на него, вызывая ряд проблем и заболеваний. Мощный воздушный ультразвук воздействует на нервные клетки головного и спинного мозга, вызывая ощущение тошноты и жжения в слуховом аппарате. Длительное систематическое воздействие ультразвука, распространяющегося воздушным путём, вызывает изменения нервной, сердечно-сосудистой и эндокринной систем, слухового и вестибулярного анализаторов. Наиболее характерным является наличие вегетососудистой дистонии и астенического синдрома.

Нормирование ультразвука

В соответствии с ГОСТ 12.1.001–89 “Ультразвук. Общие требования безопасности” и СанПиН 2.2.4./2.1.8.582–96 “Гигиенические требования при работах с источниками воздушного и контактного ультразвука промышленного, медицинского и бытового назначения” нормируемыми параметрами воздушного ультразвука являются уровни звукового давления в децибелах в третьоктавных полосах со среднегеометрическими частотами 12.5; 16; 20; 25; 31.5; 40; 50; 63; 80; 100 кГц.

Предельно допустимые уровни звукового давления на рабочих местах не должны превышать значений, указанных в табл. 17.

Таблица 17

Среднегеометрические частоты третьоктавных полос, кГц	Уровни звукового давления, дБ
12.5	80
16.0	90
20.0	100
25.0	105
31.5...100.0	110

Включение в нормативные документы на ультразвук частотного диапазона ниже 20 кГц обусловлено необходимостью “стыковки” с документами, ограничивающими вредное действие шума. Третьоктавный анализ введён в связи с тем, что в этом диапазоне резко снижается чувствительность уха (см. рис. 3).

Нормируемыми параметрами контактного ультразвука являются пиковые значения виброскорости v или её логарифмические уровни L_v , выражаемые в децибелах в октавных полосах со среднегеометрическими частотами 16; 31.5; 63; 125; 250; 500; 1000; 2000; 4000; 8000; 16 000; 31 500 кГц.

Предельно допустимые значения нормируемых параметров контактного ультразвука для работающих приведены в табл. 18.

Среднегеометрические частоты октавных полос, кГц	Пиковые значения виброскорости, м/с	Уровни виброскорости, дБ
16.0...63.0	$5 \cdot 10^{-3}$	100
125.0...500.0	$8.9 \cdot 10^{-3}$	105
$1 \cdot 10^3 \dots 31.5 \cdot 10^3$	$1.6 \cdot 10^{-2}$	110

Предельно допустимые уровни контактного ультразвука следует принимать на 5 дБ ниже значений, указанных в табл. 18, в тех случаях, когда работающие подвергаются совместному воздействию воздушного и контактного ультразвука.

При использовании ультразвуковых источников бытового назначения, как правило, генерирующих колебания с частотами ниже 100 кГц, допустимые уровни воздушного и контактного ультразвука не должны превышать 75 дБ на рабочей частоте источника.

Уровни ультразвука на рабочих местах и в бытовых условиях измеряются в нормируемом частотном диапазоне с верхней граничной частотой не ниже рабочей частоты источника при типичных условиях эксплуатации его источников, характеризующихся наиболее высокой интенсивностью генерируемых ультразвуковых колебаний. Точки измерения воздушного ультразвука на рабочем месте или в бытовых условиях должны быть расположены на высоте 1.5 м от уровня основания (пола, площадки), на котором выполняются работы с ультразвуковым источником любого назначения в положении “стоя” или на уровне головы, если работа выполняется в сидячем положении, на расстоянии 5 см от уха и на расстоянии не менее 50 см от человека, проводящего измерения.

Аппаратура, применяемая для измерения уровня звукового давления, должна состоять из измерительного микрофона, электрической цепи с линейной характеристикой, третьоктавного фильтра и измерительного прибора. Аппаратура должна иметь характеристику “Лин” и временную характеристику “медленно”.

Измерение уровней контактного ультразвука в зоне контакта рук или других частей тела человека с источником ультразвуковых колебаний следует проводить с помощью измерительного тракта, который должен состоять:

- из датчика, чувствительность которого позволяет регистрировать ультразвуковые колебания с уровнем колебательной скорости на поверхности не ниже 80 дБ;
- лазерного интерферометра;
- усилителя;
- схемы обработки сигналов, включающей фильтры низкой и высокой частот.

Защита от ультразвука

Основные проблемы, средства и методы защиты от ультразвука рассмотрим на примере технологических процессов, связанных с очисткой деталей в ультразвуковых ваннах. Воздействие ультразвука высокой интенсивности на жидкость создаёт зоны повышенного и пониженного давления. При пониженном давлении в жидкости образуются практически содержащие вакуум микрополости, в которые испаряется окружающая жидкость, образуя пузыри пара. В результате последующего сжатия (повышенное давление) пузыри пара сжимаются и “схлопываются” с образованием микроудара кумулятивных струй. Если это происходит на границе раздела “жидкость – очищаемое изделие”, то поверхность подвергается сумме этих ударов, так называемая кавитация, которая обеспечивает очищающий эффект, сравнимый с воздействием бесчисленного множества щёточек. В настоящее время в качестве источника ультразвука используются изготовленные искусственным путём пьезокерамические источники колебаний из титаната бария BaTiO_3 .

Под воздействием ультразвуковых колебаний частички жидкости на чрезвычайно малом пути каждую секунду совершают возвратно-поступательное движение на частоте генератора, но из-за инерционности массы они не могут достаточно быстро следовать этому переменному движению (возвращающиеся обратно частички сталкиваются с частичками, движущимися вперёд) – происходит наложение одного движения на другое. На кратчайшем пути возникают очень большие ускорения с быстро меняющимися значениями давления и такими силами растяжения, что под воздействием кратковременной кавитации жидкость просто “разрывается”. С огромной силой она “разбивается” о поверхность очищаемого изделия и срывает с неё частички грязи, а затем настолько стремительно “оттягивается” с поверхности очищаемого изделия, что образуется минимальный вакуум, в который и всасываются частички грязи. Такое интенсивное движение раствора ванны усиливает распределение и размельчение частичек грязи и способствует эмульгированию частиц жира в растворителе. Наиболее примечательным при этом является то, что полная очистка от грязи достигается даже в самых узких углублениях и отверстиях очищаемого изделия.

Как правило, наибольшее превышение предельно допустимых уровней звука современных ультразвуковых установок отмечается на частоту 1-й субгармонической составляющей. Поэтому защита персонала от воздействия шума ультразвукового оборудования предполагает снижение в первую очередь именно этой составляющей. Для выяснения возможностей снижения субгармонической составляющей в источнике шумообразования рассмотрим эти источники.

Одной из основных причин, вызывающих образование субгармонической составляющей являются кавитационные процессы. Они наблюдаются как в рабочей жидкости ультразвуковых ванн, так и в жидкости для охлажде-

ния магнитострикционных преобразователей путём паразитного излучения звуковой энергии. К методам снижения шума в источнике образования относится также выбор оптимальных объёмов рабочей жидкости в ультразвуковых ваннах, а также исключение излучения звуковой энергии в самом преобразователе на частотах, отличных от рабочих.

Условно к методам уменьшения субгармонической составляющей в источнике шумообразования можно отнести выбор возможно более высоких частот установок. При этом субгармоническая составляющая переводится в диапазон частот с более высокими допустимыми уровнями. На рис. 24 приведены спектры шума двух ультразвуковых ванн одинаковой мощности, идентичных конструкций, но с разными рабочими частотами 18 и 44 кГц.

Использование рабочих частот свыше 44 кГц для маломощного оборудования полностью решает проблему шума ультразвуковых установок. К тому же для процессов, например, очистки мелких деталей использование таких частот не уменьшает интенсивности очистки, поскольку наряду со снижением интенсивности кавитации за счёт повышения частоты происходит увеличение гидродинамических потоков и более интенсивное перемешивание жидкости.

В настоящее время рекомендации о повышении рабочих частот получили широкое практическое применение, и ультразвуковые установки для очистки мелких деталей, сварки пластмасс и пайки имеют частоты 44 кГц. Если выбор рабочих частот выше 40 кГц невозможен по техническим соображениям, а также если речь идёт об уже существующем оборудовании, снижение шума ультразвуковых ванн или установок, содержащих ультразвуковые ванны, можно осуществить с помощью повышения звукоизоляции, экранирования и звукопоглощения.

Как правило, кожух, снижающий до предельно допустимых уровней субгармоническую составляющую, снижает составляющие на частотах 1-й, 2-й и других гармоник до уровня значительно меньших, чем допустимые. В силу этого в подавляющем большинстве случаев расчёт звукоизолирующих кожухов для снижения шума ультразвуковых установок следует вести в третьоктавной полосе, содержащей частоту субгармоники преобразователя данной установки. Тогда средняя фактическая звукоизоляция, которой должен обладать кожух, определяется из соотношения

$$ЗИ_{\text{фак. ср}} = L_1 - L_{\text{доп}},$$

где L_1 — измеренное или предполагаемое значение звукового давления в третьоктавной полосе, содержащей частоту субгармоники (при отсутствии точных данных может быть принято равной 105...110 дБ), $L_{\text{доп}}$ — предельно допустимый уровень звукового давления для той же полосы частот.

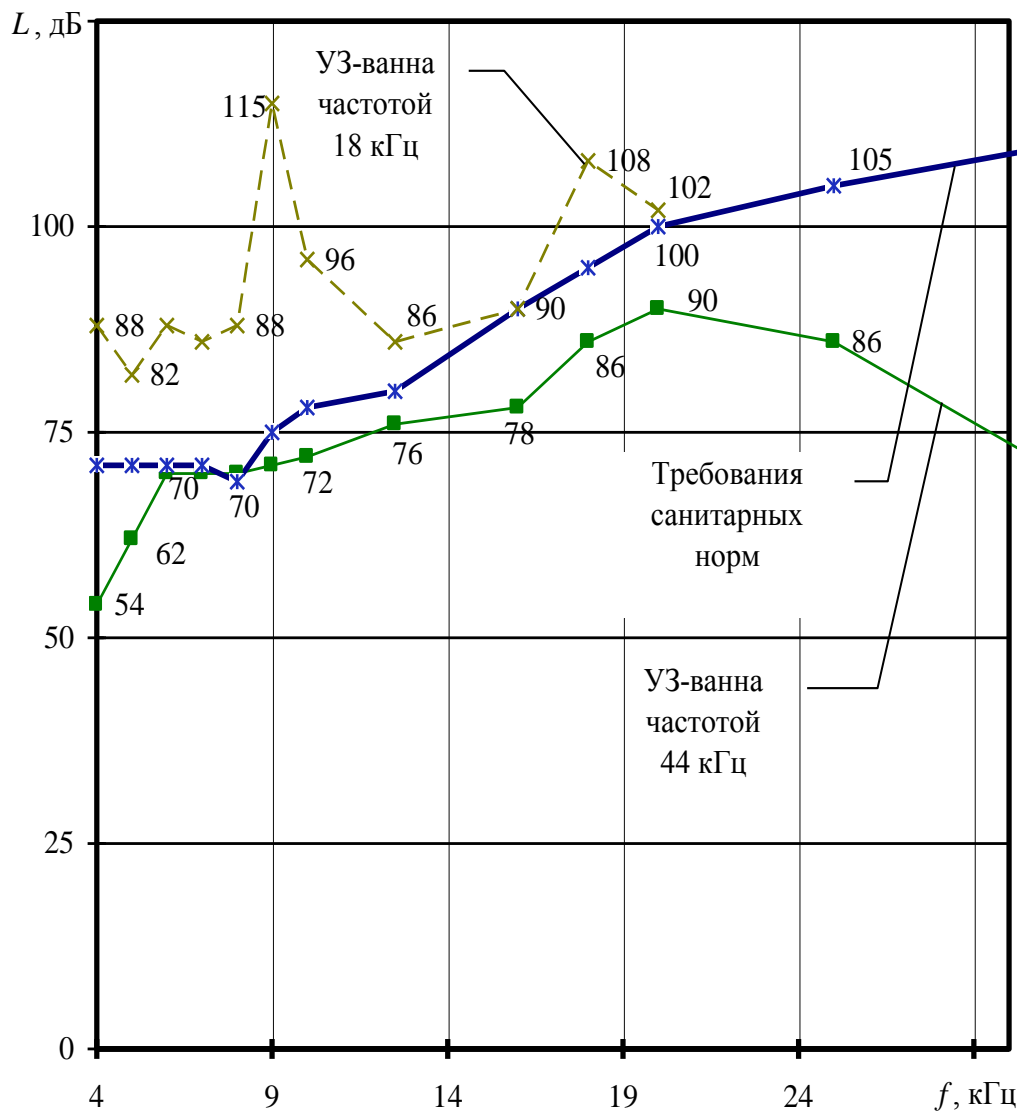


Рис. 24. Спектры шума для двух ультразвуковых установок

С достаточной для инженерных расчётов точностью фактическая звукоизоляция кожуха, дБ, изготовленного из одного материала, имеющего щели, отверстие или проём, покрытого изнутри полностью или частично звукопоглощающим материалом, может быть определена по формуле

$$ЗИ_{\text{фак}} = ЗИ_{\text{соб}} + 10 \lg \left(\alpha \frac{S_{\text{пог}}}{S_{\text{кож}}} \right) - \Delta R,$$

где $ЗИ_{\text{соб}}$ – собственная звукоизолирующая способность пластин; α – коэффициент звукопоглощения материала; $S_{\text{пог}}$ – площадь звукопоглощающего материала; $S_{\text{кож}}$ – площадь внутренней поверхности кожуха; ΔR – член, учитывающий уменьшение звукоизоляции за счёт звукопроводности щелей и отверстий или проёма.

В интересующем нас диапазоне частот звукоизоляция пластин, из которых изготовлен кожух, находится в области пространственного резонанса. Наиболее близкое совпадение с экспериментальными исследованиями для звукоизолирующей способности даёт формула

$$ЗИ_{\text{соб}} = 10 \lg \frac{1.46\mu^2 f_{\text{ср}} \Delta f \eta}{100(\cos \Theta_1 - \cos \Theta_2)},$$

где $\Delta f = f_1 - f_2$ – частотный интервал, для которого рассчитывается звукоизоляции; $f_{\text{ср}}$ – среднегеометрическая частота интервала; μ – масса единицы пластины; η – коэффициент внутреннего трения; $\Theta = \arcsin(c/c_{\text{и}})$, (c – скорость звука в воздухе; $c_{\text{и}}$ – скорость распространения изгибных волн в пластине, зависящая от частоты звука f_1 и f_2).

Увеличение звукоизолирующей способности, а следовательно, и фактической изоляции кожухов в интересующем нас диапазоне частот может быть достигнуто не только за счёт увеличения массы пластины, но и путём увеличения потерь на внутреннее трение, например, оплёткой металлических кожухов вибропоглощающих материалов. Так, приклеивание второго слоя вибропоглощающего материала только по периметру стен, обращённых к источнику шума, даст дополнительное повышение звукоизоляции на 8...10 дБ.

Увеличения фактической звукоизоляции кожухов можно достигнуть также подбором материалов с возможно более высоким коэффициентом звукопоглощения для данного диапазона частот (например, многие марки полиуретана, стекловолокна и др.).

Существенное увеличение фактической звукоизоляции кожухов позволяет уменьшить проводимость щелей, отверстий и проёмов, в частности, уменьшить их площади, так как исходя из условия, что для данного диапазона частот произведение волнового числа K на радиус отверстия $r - Kr \geq 1.5$, звукопроводимость отверстия равна 1. Начиная с частоты 8 кГц, такой звукопроводимостью обладают отверстия радиусом уже в 10 мм.

В связи с малой длиной звуковой волны в области частот, определённых ГОСТ 12.1.001–89, индивидуальные средства защиты, такие как заглушки и наушники, имеют более высокую эффективность, чем в области низких частот. Здесь эффективны также экранные наушники в виде пластинок, закрывающих уши только спереди (снижение шума до 20 дБ), при габаритных размерах $50 \times 40 \text{ мм}^2$, тогда как такое же снижение обычного шума потребовало бы увеличения этих габаритов до размера ушей слона.

Требования к конструкциям по защите от шума ультразвуковых промышленных установок содержатся в ГОСТ 12.2.051–80 “Оборудование технологическое ультразвуковое. Требование безопасности”.

Защита от контактного ультразвука состоит в полном исключении непосредственного соприкосновения с облучаемым инструментом, жидкостью

и изделиями. Загрузка и выгрузка обрабатываемых деталей должна производиться при выключенном источнике ультразвука. Если выключение установки нежелательно, применяют специальные приспособления, например: в ванны для очистки изделия погружают в сетчатых корзинах, снабжённых виброизолирующими покрытиями. В качестве индивидуальных средств защиты эффективно одновременное использование нитяных и резиновых перчаток.

При применении контактного ультразвука в медицине защита медицинского персонала производится виброизоляцией ручек и держателей медицинского инструмента. Защита пациента, в том числе беременных женщин и плода, осуществляется ограничением излучаемой мощности и продолжительности излучения, т. е. ограничением дозы.

В соответствии с СанПиН 2.2.4./2.1.8.582–96 запрещается непосредственный контакт человека с рабочей поверхностью источника ультразвука и с контактной средой во время возбуждения в ней ультразвуковых колебаний. В целях исключения контакта с источниками ультразвука необходимо применять:

- дистанционное управление источниками ультразвука;
- автоблокировку, т. е. автоматическое отключение источников ультразвука при выполнении вспомогательных операций (загрузка и выгрузка продукции, белья, медицинского инструментария и т. д., нанесения контактных смазок и др.);
- приспособления для удержания источника ультразвука или предметов, которые могут служить в качестве твердой контактной среды.

Для защиты рук от неблагоприятного воздействия контактного ультразвука в твёрдых, жидких, газообразных средах, а также от контактных смазок необходимо применять нарукавники, рукавицы или перчатки (наружные резиновые и внутренние хлопчатобумажные).

Стационарные ультразвуковые источники, генерирующие уровни звукового давления, превышающие нормативные значения, должны оборудоваться звукопоглощающими кожухами и экранами и размещаться в отдельных помещениях или звукоизолирующих кабинах.

Неблагоприятное воздействие на человека-оператора воздушного ультразвука может быть ослаблено путем использования в ультразвуковых источниках генераторов с рабочими частотами не ниже 22 кГц.

Для защиты работающих от неблагоприятного влияния воздушного ультразвука следует применять противошумы по ГОСТ 12.4.051.

При использовании ультразвуковых источников, как правило, низкочастотных, в бытовых условиях (стиральные машины, охранная сигнализация, приспособления для отпугивания животных, насекомых и грызунов, устройства для резки и сварки различных материалов и др.) следует чётко выполнять требования по их применению и безопасной эксплуатации, изложенные в прилагаемых к изделиям инструкциях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные в данном учебном пособии вопросы являются достаточно важными для человека, участвующего в процессе труда, во время выполнения им общественных или домашних дел, а также в период активного или пассивного отдыха. Акустические и виброакустические факторы среды обитания несут не только положительный эффект (приятная музыка, речь, предупредительные сигналы, массаж и др.), но могут явиться также причиной ряда заболеваний и акустических или виброакустических травм. Знание характеристик их воздействия, принципов нормирования, средств и методов защиты от одного из самых серьёзных бытовых вредных факторов поможет специалисту разработать новую технику или технологию безвредной, а обычному человеку сделать свою жизнедеятельность приятной и безопасной.

Список рекомендуемой литературы

Безопасность деятельности: Энциклопедический словарь / Под ред. проф. О. Н. Рукаса. СПб.: Информационно-издательское агентство "ЛИК", 2003.

СанПиН 2.2.4./2.1.8.582–96. Гигиенические требования при работах с источниками воздушного и контактного ультразвука промышленного, медицинского и бытового назначения: Санитарные правила и нормы. М.: Информационно-издательский центр Минздрава России, 1997.

Борьба с шумом на производстве: Справ. – М.: Машиностроение, 1985.

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

Колесников А. Е. Шум и вибрация. Л.: Судостроение, 1988.

Лагунов Л. Ф., Осипов Г. Л. Борьба с шумом в машиностроении: М.: Машиностроение, 1980.

Скучик Е. Основы акустики. В 2 т. М.: Мир, 1976.

Средства защиты в машиностроении. Расчёт и проектирование: Справ. / Под ред. С. В. Белова М.: Машиностроение, 1989.

Техническая акустика транспортных машин: Справ. / Под ред. Н. И. Иванова СПб.: Политехника, 1992.

Иванов Н. И. Основы виброакустики. СПб.: Политехника, 2000.

Ильяшук Ю. М. Измерение и нормирование производственного шума: М.: Профиздат, 1964.

Энциклопедия по безопасности и гигиене труда / Пер. с англ. М.: Профиздат, 1986.

Оглавление

Введение.....	3
Характеристики виброакустических величин.....	3
<i>Характеристики вибрации, инфразвука, ультразвука и шума.....</i>	4
Шум.....	6
<i>Классификация шума и воздействие его на человека.....</i>	6
<i>Особенности слухового восприятия шума.....</i>	6
<i>Критерии нормирования шума.....</i>	19
<i>Санитарное нормирование шума.....</i>	20
Измерение шума и обработка результатов.....	28
Методы и средства защиты от шума.....	34
<i>Активная защита от шума.....</i>	40
<i>Звукоизоляция и звукопоглощение.....</i>	41
<i>Акустические экраны.....</i>	53
<i>Техническое нормирование шума.....</i>	55
Инфразвук.....	57
<i>Классификация инфразвука и воздействие его на человека.....</i>	57
<i>Нормирование инфразвука.....</i>	58
Вибрация.....	61
<i>Классификация вибрации и воздействие её на человека.....</i>	61
<i>Нормирование вибраций.....</i>	69
<i>Защита от вибраций.....</i>	72
Ультразвук.....	74
<i>Классификация ультразвука и воздействие его на человека.....</i>	74
<i>Нормирование ультразвука.....</i>	76
<i>Защита от ультразвука.....</i>	78
Заключение.....	83
Список рекомендуемой литературы.....	83

АКУСТИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Учебное пособие

Редактор И. Г. Скачек

Подписано в печать 16.07.04 . Формат 60х84 1/16. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Печ. л. 5.25.
Тираж 1050 экз. Заказ 94.

Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
197376, С.-Петербург, ул. Проф. Попова, 5