

ФИЗИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ И ИХ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА БИОЛОГИЧЕСКИЕ ОБЪЕКТЫ

УДК 628.517

ОСОБЕННОСТИ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ИЗМЕРЕНИЯ УРОВНЕЙ ИНФРАЗВУКА

В. А. Гордиенко, Б. И. Гончаренко

Показано, что реакция колебательных систем живых организмов на акустические воздействия определяется не только уровнем звукового давления (которое преимущественно регламентируется существующими санитарными нормами), но и колебательной скоростью частиц среды, движущихся под действием градиента звукового давления, и амплитудой их смещения из равновесного состояния. Поэтому делается вывод, что для правильной регламентации уровней звука в низкочастотной области следует измерять одновременно как звуковое давление, так и колебательную скорость частиц среды.

Среди физических полей, активно воздействующих на биологические объекты и на человека в частности, важное место занимают акустические поля. В узком смысле под акустическим сигналом понимают звук, т. е. упругие колебания и волны в газах, жидкостях и твердых телах, слышимые человеческим ухом. Поэтому акустическое поле и акустические сигналы (звук) прежде всего рассматривают как средство коммуникативного общения. Звуковые волны с частотами ниже 16–20 Гц обычно называют инфразвуком. Акустические волны с частотами ниже 200÷300 Гц, распространяющиеся в земной коре, иногда называют сейсмоакустическими, а ниже 10÷20 Гц (чаще менее 1 Гц) — сейсмическими. Представления об акустическом поле как загрязнителя окружающей среды появились относительно недавно. Особенно это касается акустических сигналов в диапазоне частот, не воспринимаемом человеческим ухом. В связи с этим в последнее время при анализе экологической ситуации окружающей среды все чаще начинает встречаться термин «акустическая экология».

Под акустической экологией, как правило, понимают раздел экологии, занимающийся изучением воздействия акустических колебаний и волн на биологические объекты, экосистемы и человека в частности.

При анализе воздействия шума на человека следует различать два основных механизма раздражения: непосредственное воздействие звука на слуховые органы через слуховые клетки и нервы и косвенное — через возбуждение сигналов в нервных клетках, не являющихся слуховыми [1].

Тот факт, что слышимый звук, вибрации и инфразвук оказывают в общем случае вредное воздействие на человека, отмечают многие исследователи. Особенно вредно их совместное воздействие.

В обоих случаях происходит возбуждение вегетативной нервной системы и (или) возникают дополнительные психические реакции. Для вегетатив-

ной нервной системы характерно четкое соответствие между шумом и реакцией, в то время как в области психики такое соответствие отсутствует. Хуже, когда нарушение ощущения комфорта проявляется через психологическое состояние или (реже) через болевые ощущения внутренних органов (обычно в низкочастотном и инфразвуковом диапазонах излучения). Выраженные психические реакции проявляются уже начиная с уровней 30 дБ(А). Решающую роль в ощущении комфорта или дискомфорта у человека играет его отношение к источнику звука. Например, звук падающих из крана капель или тиканье будильника может вызвать раздражение, а громкая музыка может оказать на одного человека положительное воздействие (радость, расслабление), на других — отрицательное.

Однако звуковое воздействие не всегда вызывает отрицательную реакцию. Известно, например, что при монотонном труде с помощью музыки можно достичь повышения производительности труда. Шум положительно влияет на процесс конкретного мышления и отрицательно — на абстрактное мышление. При этом с нарастанием громкости производительность сначала растет, а потом снова снижается.

Исходя из этого ISO (Всемирная организация здравоохранения) определила акустический шум как «звук, оцениваемый негативно и наносящий вред здоровью».

Тем не менее и при первом механизме могут возникать ощущения дискомфорта, на первый взгляд, не связанные с наличием звукового раздражителя. Последнее определяется особенностями строения уха человека, в частности внутренним ухом — полостью, расположенной в выемке височной кости. Оно состоит из костной улитки, имеющей вид закрученной спирали и спиральной пластины, которая делит спиральный канал костной улитки на две параллельные полости — верхнюю (вестибулярную) и нижнюю (барабанную). В основном нижняя часть через группу

мембран и звукочувствительных (волосовых) клеток передает в головной мозг информацию о звуке. Однако возбуждение на определенных частотах и при некоторых уровнях громкости вестибулярной части уха может привести к возбуждению нервных клеток, не связанных со звукочувствительными элементами. Кроме этого волны, попадающие на кости черепа, вызывают их колебания и также возбуждают окончания неслуховых нервов.

Ощущение дискомфорта могут вызывать различные уровни звука в зависимости от индивидуума, условий его работы, предыстории его психического состояния. В большинстве случаев дискомфортность исчезает при исчезновении источника раздражения. Однако в некоторых случаях возникают остаточные явления, которые либо проходят бесследно через некоторое время после выключения раздражителя, либо, снимая внешнее проявление дискомфорта спустя какое-то время, накапливаются в организме, приводя через определенное время к необратимым изменениям в организме.

В целом воздействие на организм акустических волн весьма напоминает воздействие радиоактивности или рентгеновских лучей, правда, с несколько иными последствиями. Поэтому при введении предельно допустимых норм акустических сигналов и шумов необходимо учитывать не только «громкость» и частотную полосу излучения, но и время, в течение которого человек подвергается данному воздействию, регулярности такого воздействия и т. д.

В соответствии с принятыми стандартами существуют три различающихся критерия оценки шумности:

- по уровню громкости звука;
- по уровню звукового давления;
- по кривым предельных спектров.

В настоящее время считается, что уровни действующего вредным образом на организм звука в диапазоне частот выше 60 Гц установлены относительно правильно. Введен стандарт на санитарные нормы допустимого шума в помещениях и на территориях жилой застройки в этом диапазоне.

Под воздействием звуковых волн определенной интенсивности кроме слуховых ощущений могут возникнуть следующие основные функциональные изменения.

Оглушение, а иногда и разрыв барабанных перепонок при акустическом раздражении высокой интенсивности, возникающем мгновенно (например, при взрыве).

Временное повышение порога слышимости при воздействии звука достаточно большой интенсивности за счет сужения и даже перекрывания кровеносных сосудов внутреннего уха, нарушения обмена веществ и появления усталости слуховых клеток (снижение чувствительности слуховых органов).

Тугоухость (необратимые потери слуха) при длительном воздействии звука высокой интен-

сивности. Тугоухость как профессиональная болезнь проявляется в диапазоне $2 \div 6$ кГц, поскольку большая часть промышленных шумов имеет максимум интенсивности в данном диапазоне.

Волокна слуховых нервов достигают центральных областей продолговатого мозга, откуда раздражение передается далее. В результате изолированное раздражение уха может сопровождаться комплексной реакцией.

Повышение частоты дыхания после прекращения действия шумов.

Реакция вегетативной нервной системы на изменения в системе кровообращения. Реакция на звук выражается незначительным уменьшением кровяного давления, некоторым увеличением частоты пульса и в гораздо большей степени — сужением (спазмами) сосудов при интенсивности звука более 70 дБ(А).

Наряду с реакцией на интенсивность шума обнаружена линейная зависимость периферийного сопротивления от ширины полосы шума, связанная с настроенностью волокон слуховых нервов на определенную частоту. Так что в узкой полосе реакция на интенсивность определяется преимущественно количеством слуховых импульсов за единицу времени.

Вегетативные реакции, вызываемые звуковым раздражением, не зависят от фактора привыкания.

Расширение зрачков, которое зависит от интенсивности звука и начиная с 75 дБ(А) происходит нелинейно. В результате может наблюдаться уменьшение глубины резкости зрения.

Психические реакции.

Градация последствий воздействия шума на человека в зависимости от интенсивности насчитывает четыре диапазона.

Диапазон I (30 ÷ 65 фон) — область чисто психических реакций.

Диапазон II (65 ÷ 90 фон) наряду с психическими вызывает вегетативные реакции.

Диапазон III (90 ÷ 120 фон) характеризуется возможными необратимыми изменениями психики, сильными вегетативными реакциями, а также повреждением внутреннего уха.

Диапазон IV (120 фон и выше) превышает порог болевых ощущений.

Воздействие на психику возрастает с повышением частоты, увеличением громкости и уменьшением частотной полосы шума, хотя шум не всегда вызывает отрицательную реакцию.

При длительном воздействии шума с интенсивностью, превышающей предельную, возникает опасность органических повреждений. Наиболее часто происходят патологические изменения периферийной системы кровообращения. Считается, что порог раздражения вегетативной нервной системы в состоянии бодрствования примерно 70 дБ(А), в состоянии глубокого сна — 55 дБ(А). Для нормального сна мо-

жет быть благоприятным средний уровень шума не более 35 дБ(А) без дискретных составляющих, превышающих это значение более чем на 10 дБ.

Инfrasound может оказывать весьма существенное влияние на человека, в частности на его психику. В литературе неоднократно отмечались, например, случаи самоубийств под воздействием мощного источника инфразвука. Поэтому важно выявить и мелкие источники.

Рассматривают естественные (природные) и искусственные (антропогенные, т.е. связанные с деятельностью человека) источники инфразвука.

Природными источниками инфразвука являются землетрясения, извержения вулканов, раскаты грома, штормы, ветры. Немалую роль в их возникновении играет турбулентность атмосферы. Например, мистраль (северный или северо-западный холодный ветер на юге Франции) создает инфразвук с частотой 0,6 Гц. Естественный инфразвук, возникающий при штормах, использовался в Японии для заблаговременного предупреждения цунами (звукоулавливающие приборы «Софер»).

Искусственные источники инфразвука более разнообразны. Это прежде всего взрывы, в том числе атомные, выстрелы из тяжелых орудий, вибрации зданий, конструкций, прессы, вентиляционные системы, вибрации различных транспортных средств и т.п. Обычно искусственные источники имеют ярко выраженные частоты и довольно сильно различаются как по частоте, так и по интенсивности.

Данные о физиологическом действии инфразвука противоречивы. Однако считается установленным, что его влияние на человека связано с резонансами внутренних органов [2]. Некоторые авторы отмечают три существенных резонанса на частотах 5, 10 и 15 Гц. Различные органы имеют различные собственные частоты. Как видно из табл. 1, в области инфразвука лежат резонансы органов брюшной полости, поэтому в первую очередь действие инфразвука на человека, так же как и при «морской» болезни, связано с нарушением действия желудочно-кишечного тракта — появляются тошнота, головокружение, чувство страха, ужас.

Т а б л и ц а 1

Орган	Частота, Гц
Голова	30
Грудная клетка	60
Позвоночный столб	8
Брюшная полость	4 ÷ 8
Таз	4 ÷ 6

В диапазоне 7 ÷ 13 Гц воздействие инфразвука может быть связано с тем, что инфразвук синхронизован с α -ритмом головного мозга, однако достаточных данных по этому вопросу нет. Возможно также,

что воздействие на организм связано с явлением биоакустических резонансов.

Так как длина волны инфразвука значительно больше размеров человека, то он подвергается ее воздействию синфазно (синхронно со всех сторон). Это существенно для всех воздушных включений в теле человека, например в среднем ухе, в легких.

В случае резонансов могут быть большие периодические смещения органов и тканей. При этом движение всех органов происходит в фазе. При больших интенсивностях (свыше 170 дБ) инфразвук может приводить к разрывам и кровотечениям в легких.

Известно, что существует 4 уровня воздействия инфразвука на человека (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

Уровень	Интенсивность, дБ	Воздействие
1	190 ÷ 150	Смертельное
2	150 ÷ 140	Психические изменения (допустимое воздействие — не более 2 мин)
3	140 ÷ 120	Физиологические расстройства
4	менее 120	Слабое (при длительном облучении возможны физиологические расстройства)

Наблюдается некоторое сходство воздействия на человека инфразвука и алкоголя [3]. При этом обращается внимание, что вредное действие определяется не только уровнем звука, но и его частотой.

Как отмечалось выше, основной особенностью воздействия инфразвука на человека является то, что он не воспринимается непосредственно органами чувств. Это создает опасность использования источников инфразвука в качестве оружия массового поражения людей. Из очевидных последствий, обнаруженных на облучавшихся добровольцах, отметим следующие:

изменение артериального давления и частоты сердечной деятельности (7 ÷ 10 Гц);

нарушение вестибулярных функций мозга (20 Гц и менее);

нарушение зрения (40 ÷ 60 Гц);

нарушение работы желудочно-кишечного тракта, тошнота, рвота, головокружение;

появление чувства страха, ужаса.

Особенно сильно подвержены действию низкочастотного звука люди старше 50 лет.

Как известно, акустическое поле принято характеризовать звуковым давлением $P(t)$ и колебательной скоростью частиц среды $V(t)$, обусловленными изменением плотности среды. Различают уровень звука по давлению: $P^2 = \langle P(t)^2 \rangle$ (символ $\langle \cdot \rangle$ означает усреднение за время, не меньшее периода коле-

баний) и уровень звука по колебательной скорости: $V^2 = \langle V(t)^2 \rangle$.

Уровни звукового давления в акустике L_P принято измерять (в децибелах, дБ) относительно некоторого уровня P_0 , принятого за нулевой (обычно в акустике в качестве нулевого используют условный порог слышимости человеческого уха $P_0 = 2 \times 10^{-5}$ Па):

$$L_P = 20 \lg(P/P_0) = 10 \lg(P^2/P_0^2). \quad (1)$$

Аналогично определяется уровень звука по колебательной скорости:

$$L_V = 20 \lg(\rho c V/P_0) = 10 \lg[(\rho c V)^2/P_0^2]. \quad (2)$$

Здесь ρ — плотность среды, c — скорость распространения звука в ней.

Вдали от источника или в плоской акустической волне обычно $L_P = L_V$, поэтому не имеет принципиального значения, какую характеристику поля измерять. По этой причине все известные нам (в особенности отечественные) санитарные нормы ориентируются на уровень звукового давления.

Специального ГОСТа на инфразвуковую область частот в настоящее время не существует, за исключением одного параграфа ГОСТ 12.1.003-76, запрещающего даже кратковременное пребывание в зонах с уровнем звукового давления свыше 135 дБ в любой октавной полосе.

В настоящее время существует значительный разброс в допустимых нормах: имеется ряд санитарных норм на допустимые уровни инфразвука и низкочастотного шума на территории жилой застройки (СанПиН 42-128-4948-89), рабочих местах (ГОСТ 3223-85, 23337) и др. Так же как и в области более высоких частот, нормируемым параметром является уровень давления в октавных, 1/3-октавных частотных полосах или интегральная интенсивность по звуковому давлению в исследуемом частотном диапазоне.

Однако такой подход применительно к инфразвуку не может быть признан в полной мере объективным, прежде всего по следующим причинам. Для инфразвука связь между давлением и колебательной скоростью в низкочастотном и инфразвуковом диапазонах, когда длина возбуждаемой волны велика, в общем случае не является однозначной.

В качестве иллюстрации на рис. 1 приведена частотная зависимость вычисленного по формулам (1) и (2) уровня излучения на расстояниях 0,5; 1 и 5 м от громкоговорителя, установленного в звукозаглушенной камере физического факультета МГУ. Нетрудно заметить, что на низких частотах наблюдается заметное расхождение уровней, измеренных различными типами звукоприемников. Примерно такое же различие должно наблюдаться, если измерения произвести одновременно разными микрофонами, например угольным и ленточным: ленточный чувствителен

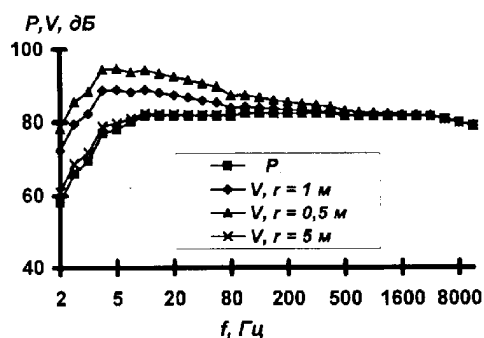


Рис. 1

к градиенту звукового давления в волне, угольный — к уровню звукового давления.

Особое место занимает проблема регламентации уровней низкочастотных шумов аэро- или гидродинамического происхождения (шум в узком участке тоннеля метрополитена при движении по нему поезда, шум реактивных и винтовых двигателей и т. д.). В этом случае приборы и инструменты, реагирующие на градиент давления или колебательную скорость, будут испытывать воздействие на 20÷40 дБ больше, чем по уровню звукового давления в волне.

Укажем также на возможность возникновения в трубах, тоннелях, салонах автомобилей и других замкнутых помещениях небольшого размера стоячих или близких к ним инфразвуковых волн. В этом случае сильное воздействие на организм и приборы может происходить и в области пространства, в которой измеренное значение давления близко к нулю, так как в этих областях обычно наблюдается пучность градиента звукового давления или колебательной скорости.

Кроме того, в закрытых помещениях, многократно отражаясь от стен и предметов, звуковые волны создают многоголосое эхо (явление реверберации) со сложным распределением звукового давления и колебательной скорости.

Вместе с тем следует указать, что реакция колебательной системы, в том числе живых организмов, на акустические воздействия определяется не только уровнем звукового давления, но и колебательной скоростью частиц среды, движущихся под действием градиента звукового давления, и амплитудой их смещения из равновесного состояния.

Как показывают исследования, у довольно значительного числа биологических объектов органы слуха оказываются чувствительными именно к колебательной скорости или градиенту звукового давления в волне. Величиной этих параметров в ряде случаев определяется и амплитуда вынужденных колебаний внутренних органов животных и человека.

Мы считаем, опираясь как на результаты измерений уровней звука, описанные в литературе, так и на свой многолетний опыт работы в низкочастотном и инфразвуковом диапазонах, что для правильной регламентации уровней звука в данном диапазоне сле-

дует измерять одновременно как звуковое давление, так и колебательную скорость частиц среды в волне или градиент звукового давления. В результате появляется возможность для характеристики акустического поля помимо уровня звукового давления (1) использовать еще уровень колебательной скорости (2), а также следующие параметры: интенсивность звука I (силу звука), определяемую через интенсивность звука в плоской звуковой волне, при которой сквозь поверхность площадью в 1 м^2 , расположенную перпендикулярно к направлению распространения волны, передается акустическая мощность 1 Вт (измеряется в Вт/м^2):

$$I_p = P^2 / \rho c; \quad I_v = \rho c V^2;$$

вектор Умова–Пойнтинга — произведение $P(t)V(t)$ и поток акустической энергии $W = \langle P(t)V(t) \rangle$, характеризующий ту часть энергии волны, которая переносится в пространстве (в стоячей волне поток акустической мощности равен нулю).

С точки зрения защиты от низкочастотных шумов путем локализации их источников данный метод представляется весьма перспективным, так как позволяет решать указанную обратную задачу акустики на основании измерений, выполненных в области пространства, размеры которой существенно меньше длины волны. Впервые такая идея была высказана сотрудниками кафедры акустики физического факультета МГУ еще в 1960-х гг. В настоящее время такой подход реализован преимущественно в гидроакустике, в отечественной литературе он называется методом векторно-фазовых измерений (векторно-фазовым методом). Однако в аэро- и архитектурной акустике в нашей стране он до сих пор не получил распространения и реализован только за рубежом (в частности, фирмой «Брюль и Кьер» для локализации низкочастотных источников шума). Тем не менее до сих пор статистика одновременного измерения абсолютных уровней инфразвука по давлению и колебательной скорости чрезвычайно мала. В связи с этим международных стандартов на допустимые уровни инфразвука также не существует.

Принципиальную важность различения таких характеристик, как I_p и W , мы проиллюстрируем на примере проведенных нами измерений уровней шума в инфразвуковом диапазоне частот внутри салона автомобиля повышенного класса при различных скоростях движения по городским трассам.

При измерении поля акустических шумов использовался метод, основанный на одновременном измерении в малой области пространства звукового давления, проекций его градиента на три взаимно ортогональных направления в пространстве и разности фаз между ними. Последнее, как указано выше, позволяет определять интенсивность звука и поток акустической энергии в различных направлениях, а при необходимости — отдельно уровни звукового давления. Преимущество этого метода заключается в том,

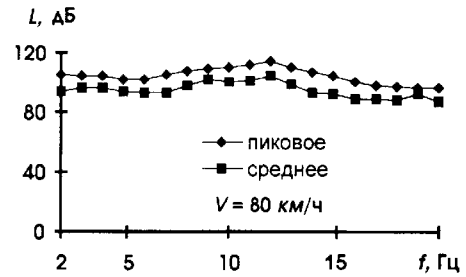


Рис. 2

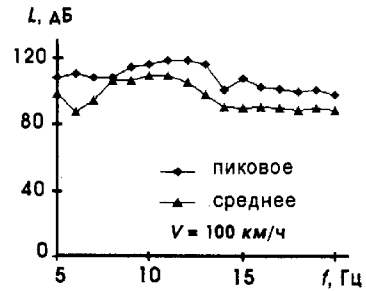


Рис. 3

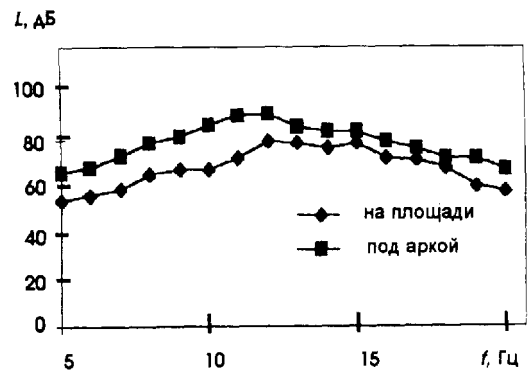


Рис. 4

что возможно проводить измерения в ограниченных объемах, определять уровни шума при наличии дополнительных помех, локализовать источники звука и определять направления потока акустической энергии, который может быть различным для различных частот. Все это представляет интерес при разработке мероприятий по борьбе с шумом. В качестве приемника звукового давления использовался микрофон производства фирмы «Брюль и Кьер». Звукоприемником градиента давления служил трехкомпонентный векторный приемник диаметром 190 мм, разработанный на физическом факультете МГУ. Векторный приемник и приемник звукового давления были упруго подвешены на специальном каркасе. Частота резонанса упругой подвески звукоприемников в воздухе была меньше 2 Гц. Полученные экспериментальные результаты измерения шумовой помехи внутри салона автомобиля представлены рис. 2 и 3 для двух скоростей движения по городским трассам.

Как следует из представленных результатов, наблюдается повышенный уровень инфразвука в области частот $8 \div 16 \text{ Гц}$ (рис. 2). Кроме того, наблюдается область резонансных частот в диапазоне $8 \div 14 \text{ Гц}$ (рис. 3). В этой области шумовая помеха достигает

значительных уровней и может оказывать вредное физиологическое воздействие на человека, длительное время управляющего автомобилем. На рис. 4 отмечается значительное повышение уровня инфразвука в салоне автомобиля при проезде под аркой здания по сравнению с соответствующим уровнем, измеренным, когда автомобиль двигался на площади.

Вместе с тем спектральные уровни, приведенные к эквивалентному уровню звукового давления (например, по формулам (1) и (2)), которые были измерены микрофоном и векторным приемником, оказались различными, причем разность уровней зависела от точки размещения приемной системы внутри салона, что свидетельствовало о возникновении почти

стоячих волн. Различие значений достигало 15 дБ.

Следует отметить, что в процессе измерений шумовой помехи внутри салона автомобиля были получены данные, которые позволили определить направление на источник шумовой помехи и с учетом этого выдать рекомендации по уменьшению уровня помех в инфразвуковом диапазоне частот внутри салона некоторых автомобилей повышенного класса.

Литература

1. Борьба с шумом на производстве / Под ред. Е. Я. Юдина. М., 1985.
2. Колесников А. Е. Шум и вибрация. Л., 1988.
3. Шум на транспорте / Под ред. Р. Хеберга. М., 1995.