



О. В. Кочнов,
начальник отдела
научно-технического
развития
компании ESCORT GROUP,
к.т.н.

г. Москва, ул. Автозаводская, д. 23А, к. 2, офис 907,
8 (495) 937-5341/42 (многоканальные),
8 (800) 3333-005 (бесплатный),
info@escortpro.ru,
support@escortpro.ru,
www.escortpro.ru



ВВЕДЕНИЕ В РАСЧЕТ ЗВУКОВОГО ДАВЛЕНИЯ НА ОТКРЫТЫХ ПЛОЩАДКАХ (ЧАСТЬ I)

Системы оповещения имеют повсеместное применение. В сфере безопасности применяются системы экстренного оповещения – системы оповещения о пожаре и управления эвакуацией людей (СОУЭ), системы оповещения при чрезвычайных ситуациях (ЧС) – на промышленных объектах (ОСО) и окружающих территориях (ЛСО), системы оповещения в сфере транспортной безопасности [1], [2].

По-прежнему актуальной является задача создания систем уличной звукофикации, решаемая комплексными системами экстренного оповещения (КСЭОН), как части централизованных систем (ЦСО) в области ГОЧС. Системы КСЭОН обеспечивают экстренное и своевременное доведение сигналов оповещения и информации до жителей мегаполисов [3]. В сфере транспортной безопасности системы оповещения решают самый широкий круг задач, связанных с оповещением людей на ж/д платформах, вокзалах, автовокзалах, привокзальных площадках, метрополитенах. При проектировании систем экстренного оповещения выполняются акустические расчеты на открытых площадках.

По существующей нормативной документации (НД) [4] СОУЭ должны осуществлять оповещение как внутри защищаемого здания, так и внешней, прилегающей к нему территории. В рамках проектирования СОУЭ озвучивание внешних территорий актуально при построении СО на автозаправках, парковках, парках, зонах отдыха, выставочных территориях и мн. др.

Проектирование всех вышеперечисленных систем сопровождается электроакустическим расчетом (ЭАР), необходимым для:

- обеспечения требуемого уровня звукового давления (нужной громкости) в местах нахождения (присутствия) людей;
- оптимизации параметров громкоговорителей – окончательных технических средств в области ЧС, речевых оповещателей в области пожарной безопасности;
- оптимальной расстановке и расчету количества громкоговорителей, необходимых для выполнения требова-

ний НД и технического задания на проектирование.

Для выполнения акустических расчетов на открытых площадках силами среднестатистического проектировщика (без использования профессиональных дорогостоящих акустических программ) необходима упрощенная методика, элементы которой как раз и рассматриваются в данной статье.

Элементы упрощенной методики являются адаптацией ГОСТа 31295.2-2005 «Шум. Затухание звука при распространении на местности» [5]. Такая адаптация связана в первую очередь со спецификой применения СО, в которых источником шума является громкоговоритель – речевой оповещатель (в СОУЭ), оконечное техническое средство (в ОСО/ЛСО). Расчет уровня звукового давления на открытых площадках является актуальной задачей, но не вполне решенной (в плане необходимых и достаточных оснований).

Практические измерения, проведенные в городских условиях (плотная застройка), демонстрируют несоответствие результатам, полученным при выполнении расчетов по [5], частичное устранение которых может быть достигнуто использованием методов, указанных в СНиП 23-03-2003 «Защита от шума» [6].

Предлагаемый подход опирается на следующие положения:

- основные требования к расчету изложены в [4];
- основные положения изложены в [6];
- для учета поглощения звука на воздухе использован ГОСТ [5];
- громкоговорители рассматриваются как направленные источники, для кото-

рых рекомендуется определять характеристики направленности согласно [7].

Рупорные громкоговорители

Рупорные громкоговорители (РГ) – оконечные технические устройства, используемые в системах экстренного речевого оповещения.

РГ обладают такой важной характеристикой, как высокая эффективность, под которой подразумевается соотношение развиваемого звукового давления (по сути, громкости звучания) к частотному диапазону (по сути, качеству) и, конечно, – цене. В системах экстренного оповещения используются трансформаторные РГ, имеющие следующие преимущества: двойное гальваническое согласование позволяет повысить устойчивость работы как РГ, так и выходных каскадов усилителя мощности к воздействию наводок электромагнитного и электростатического характера, минимизировать токовую составляющую при передаче одного и того же эквивалента мощности за счет дополнительного повышения напряжения на выходе усилителя мощности и, как следствие, при сохранении передаваемой мощности снизить токовую составляющую и минимизировать электромагнитные наводки.

Высокое звуковое давление РГ развивают за счет согласующего устройства, называемого рупором. Приведем пример. Параметры громкоговорителей являются входными и определяющими точность акустического расчета. На рис.1 изображен внешний вид РГ и технические характеристики производства компании ROXTON. Отметим важное обстоятельство.



ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ	
Тип	Рупорный
Мощность (100 В)	50/25 Вт
Импеданс (1 кГц)	200/400 Ом
Частотный диапазон	200-14000 Гц
Чувствительность (SPL) (1кГц)	108 дБ
Входное напряжение	70-100 В
Угол раскрыва	1/4 кГц-90°/30°
Степень защиты	IP-66
ПРОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ	
Материал	Металл
Габариты	D325x350 мм
Вес	2,3 кг
Цвет	Серый

Рис. 1. Внешний вид и технические характеристики рупорного громкоговорителя ROXTON HS-50T

Основные расчетные формулы

Основной характеристикой громкости, развиваемой громкоговорителем, является звуковое давление, измеряемое в дБА (децибелах, скорректированных по шкале А). Согласно [5], эквивалентный (взвешенный) уровень звукового давления (equivalent continuous – weighted sound pressure level) L , дБА, определяется по формуле:

$$L = 10 \cdot \log \left\{ \frac{\left[\frac{1}{T} \int_0^T p_A^2(t) dt \right]}{p_0^2} \right\}, \quad (1)$$

где $p_A^2(t)$ – мгновенное, скорректированное по шкале «А» звуковое давление, Па [8]; p_0 – опорное звуковое давление ($p_0 = 20 \cdot 10^{-6}$ Па); T – заданный временной интервал, с.

Временной интервал T должен быть достаточным для усреднения при изменяющихся метеорологических условиях. В [5] рассмотрены две ситуации: усреднение в течение короткого временного интервала (при краткосрочных изменениях ветра) и усреднение в течение долгосрочного временного интервала.

Усредненный на долгосрочном временном интервале уровень звука L_{AT} , дБА, рассчитывают по формуле:

$$L_{AT} = L - C_{мет} \quad (2)$$

где $C_{мет}$ – поправка на метеорологические условия [5].

В нашем случае поправкой $C_{мет}$ предлагается пренебречь (принять равной нулю) по причине:

- практической трудности определения таких поправок в тех или иных метеорологических условиях;
- отсутствия заметного влияния этих поправок даже на больших расстояниях.

Эквивалентный уровень звука в РТ (на приемнике с подветренной стороны) $L_{РТ}$,

дБА, определяют суммированием эквивалентных скорректированных по шкале «А» октавных уровней звукового давления для каждого точечного источника и источника, представляющего собой зеркальное отображение точечного (мнимого) источника (3), рис. 2:

$$L_{РТ} = 10 \cdot \log \left[\sum_{i=1}^n (10^{0.1 \cdot L_{дби i}}) \right], \quad (3)$$

где n – число (в т. ч. мнимых) источников шума или траекторий распространения звука, влияние которых учитывают; i – номер источника шума или траектории распространения звука; $L_{дби}$ – усредненный (эквивалентный) уровень звука (основного или мнимого) звукового источника, дБА.

Эквивалентный скорректированный по шкале «А» октавный уровень звукового давления, обеспечиваемый i -м источником, $L_{дби}$, дБА, рассчитывают по формуле:

$$L_{дби} = 10 \cdot \log \left[\sum_{j=1}^5 10^{0.1(P_{дбj} - \Delta_{aj} - A_j)} \right], \quad (4)$$

где j – номер октавной полосы с частотами: 250/500/1000/2000/4000 Гц; $P_{дбj}$ – уровень давления, развиваемого звуковым источником на j -й частоте в расчетном направлении, дБ; A_j – затухание для j -й частоты при распространении звука от источника шума к приемнику, дБ; Δ_{aj} – стандартные значения поправок для частотной коррекции по шкале «А» для 5-октавных уровней, табл.1:

Стандартные значения поправок для частотной коррекции по шкале «А» для 5-октавных уровней					
Частота, f, Гц	250	500	1000	2000	4000
Коррекция Δ_{aj} , дБ	8,6	3,2	0	-1,2	-1

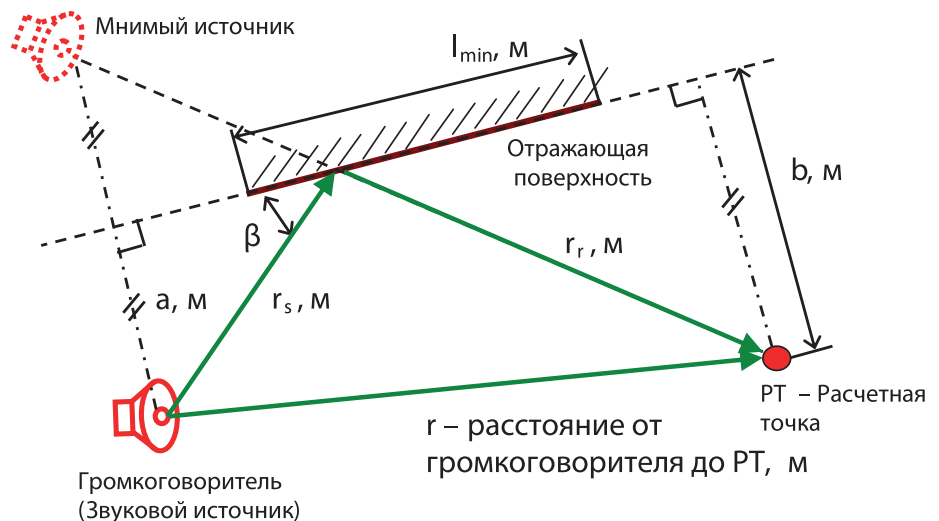


Рис. 2. Учет зеркального отражения от плоской поверхности (экрана)

Подставляя (4) в (3), получим следующую практическую формулу для расчета звукового давления в РТ, $L_{рТ}$, дБА:

$$L_{рТ} = 10 \cdot \log \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^5 10^{0.1(P_{дбij} - \Delta_{aj} - A_{ij})} \right], \quad (5)$$

Точный расчет звукового давления, развиваемого звуковым источником на j -й частоте в расчетном направлении, сопряжен с необходимостью определения ряда параметров громкоговорителя и способа его установки по следующей формуле:

$$L_{дб} = P_0 + 10 \log \frac{\Phi_n \cdot P_{вт}}{\Omega r^2}, \quad (6)$$

где P_0 , дБ – чувствительность громкоговорителя – звуковое давление, развиваемое на расстоянии 1 м, в точке, выбранной на рабочей оси громкоговорителя при подведении мощности 1 Вт, дБ; $P_{вт}$ – мощность, подводимая к громкоговорителю, Вт; Φ_n – фактор направленности (в [6] принимается равным 1); Ω – пространственный угол излучения источника, рад; r – расстояние от громкоговорителя до расчетной точки (РТ), м.

Коэффициент Ωr^2 называется **дивергенцией** – убыванием звукового давления из-за распространения в открытом пространстве. Пространственные углы для практических расчетов принимают равными:

- $\Omega = 4\pi$ – при установке звукового источника в открытом пространстве;
- $\Omega = 2\pi$ – при установке звукового источника на стене;
- $\Omega = \pi$ – при установке звукового источника в месте, ограниченном двумя плоскостями;
- $\Omega = \pi/2$ – при установке звукового источника в месте, ограниченном тремя плоскостями.

Примечание: В методике [7] значение фактора направленности для ненаправленного источника принимают равным единице.

Тогда для открытого пространства можно записать:

$$L_{дб} = P_0 + 10 \log(P_{вт}) - 20 \log(r) - 11 \text{ дБ} \quad (7)$$

Однако громкоговоритель является направленным источником звука, поэтому фактор направленности нужно уметь определять.

Фактор направленности

Разъясним физический смысл ФН, для чего рассмотрим следующие определения [7], [9]:

Фактор направленности – отношение интенсивности звука $I(\varphi)$, создаваемо-

го источником в направлении с угловой координатой φ , к средней интенсивности $I_{ср}$, которую развил бы в этой же точке ненаправленный источник, имеющий ту же звуковую мощность и излучающий звук во все стороны равномерно.

Данное определение не предлагает упрощенного инструмента для нахождения численного значения ФН. Для его получения рассмотрим дополнительные характеристики. Разберемся с понятием ФН более подробно.

$$\Phi_n = \frac{I(\varphi)}{I_{ср}}, \quad (8)$$

ФН складывается из двух понятий:

- коэффициент осевой концентрации;
- характеристика направленности.

Рассмотрим следующие определения:

Определение 1. Коэффициент осевой концентрации – отношение квадрата звукового давления, развиваемого громкоговорителем, измеренного на частоте или в полосе частот со среднегеометрической частотой в условиях свободного поля на рабочей оси на определенном расстоянии от рабочего центра громкоговорителя, к среднему по сфере, в центре которой находится громкоговоритель, квадрату звукового давления, измеренному при тех же условиях и на том же расстоянии от рабочего центра.

Данным определением достаточно сложно воспользоваться для практических целей. Не вполне корректен термин:

к среднему по сфере, т. к. само по себе определение сферы, как равноудаленного расстояния от центра, не предполагает какого-либо усреднения. Скорректируем данное определение следующим образом.

Определение 2. Коэффициент осевой концентрации (обозначим его ξ) – отношение квадрата звукового давления, измеренного на рабочей оси на расстоянии 1 м. P_0^2 , дБ, к квадрату звукового давления, соответствующего значению, указанному в ДН громкоговорителя, усредненного по всем направлениям $P_{ср}^2$, дБ:

$$\xi = (P_0^2)/(P_{ср}^2) \quad (9)$$

Определение 3. Характеристика направленности – зависимость звукового давления, развиваемого громкоговорителем на частоте или в полосе частот со среднегеометрической частотой, в точке свободного поля, находящейся на определенном расстоянии от рабочего центра, от угла между рабочей осью и направлением на указанную точку.

Следует отметить различие понятий коэффициент и характеристика. Коэффициент осевой концентрации ξ выражается в виде конкретного значения, определяющего направленные свойства громкоговорителя, в то время как «характеристика направленности» является функциональной зависимостью.

Приведем пример. На рис. 3 приведена диаграмма (характеристика) направленности РГ ROXTON HS-30T для различных частот.

Диаграмма направленности рупорного громкоговорителя HS -50T на частотах 0,3/0,5/1/2/4 кГц

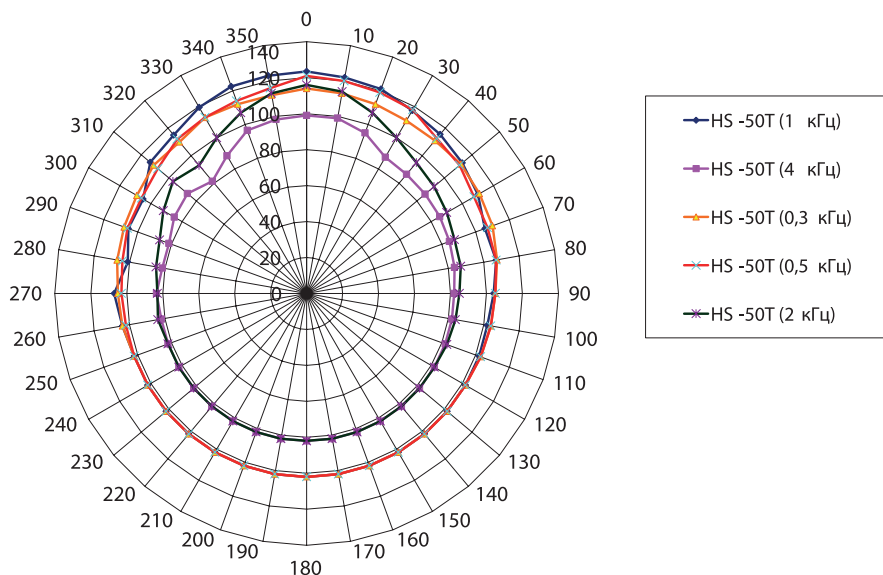


Рис. 3. Диаграмма направленности рупорного громкоговорителя ROXTON HS-30T для различных частот

На основании вышесказанного, а также с целью упрощения дадим следующее определение:

Определение 4. Коэффициент направленности ξ_θ – отношение квадрата звукового давления, развиваемого громкоговорителем в точке свободного поля, находящейся на определенном расстоянии от рабочего центра, P_θ , дБ, к квадрату звукового давления на рабочей оси громкоговорителя, P_θ , дБ:

$$\xi_\theta = (P_\theta^2)/(P_0^2) \quad (10)$$

Опираясь на определения 1–4, можно сформулировать определение ФН как произведения коэффициента осевой концентрации и коэффициента направленности.

Фактор направленности Φ^* – отношение квадрата звукового давления, развиваемого громкоговорителем в точке свободного поля, находящейся на определенном расстоянии от рабочего центра, P_θ^2 , дБ, к квадрату звукового давления, соответствующего значению, указанному в ДН громкоговорителя, усредненного по всем направлениям, P_{cp}^2 , дБ.

$$\Phi^* = \xi \cdot \xi_\theta = (P_\theta^2)/(P_{cp}^2) \quad (11)$$

Фактор направленности (ФН), выраженный в децибелах, называется «Индексом направленности» I_θ , дБ:

$$I_\theta = 10 \log \Phi^* = 20 \log (P_\theta/P_{cp}) \quad (12)$$

Тогда для направленного источника формулу (6) можно записать:

$$L_{дб} = P_0 + 10 \log (P_{вт}) + I_\theta - 20 \log (\Omega \cdot r) \quad (13)$$

Приведем пример. Для РГ, рис. 3, ШДН = 40° на частоте 4 кГц. При эллиптической аппроксимации диаграммы фактор направленности ФН ~ 8 дБ практически компенсирует полупространственный фактор.

Для громкоговорителей, ограниченных тремя и более плоскостями, очень хорошее приближение дает следующая (практическая) формула:

$$P_{дб} = P_\theta + 10 \log (P_{вт}) - 20 \log (r) \quad (14)$$

где P_θ – звуковое давление, развиваемое громкоговорителем на расстоянии 1 метр от геометрического центра в направлении, имеющем отклонение от рабочей оси на угол θ при подведении мощности 1 Вт.

Общее затухание в октавной полосе частот при распространении звука от точечного источника шума к приемнику

Под термином распространение звука от точечного источника к приемнику (в терминологии, применимой к системам оповещения) следует понимать – распространение звука от громкоговорителя до расчетной точки (РТ). Общее затухание звуковой энергии на определенном расстоянии определяется суммированием затуханий, рассчитываемых для каждого (i-го) звукового источника и для каждой (j-й) среднегеометрической звуковой частоты (5). В общем виде затухание A , измеряемое в дБА, определяется по формуле:

$$A = A_{div} + A_{atm} + A_{gr} + A_{bar} + A_{misc} \quad (15)$$

где A_{div} – затухание из-за геометрической дивергенции – расхождения энергии при излучении в свободное пространство, дБ; A_{atm} – затухание из-за звукопоглощения атмосферой, дБА; A_{gr} – затухание из-за влияния земли, дБА; A_{bar} – затухание из-за экранирования, дБА; A_{misc} – затухание из-за влияния прочих эффектов, дБ.

Затухание из-за геометрической дивергенции, являющееся определяющим (имеющим наибольшее значение), было рассмотрено выше и использовано в формулах (5), (12).

Затухание из-за звукопоглощения атмосферой

Затухание из-за звукопоглощения атмосферой A_{atm} , дБ, на расстоянии r , м, от источника шума до РТ (в [2] – до приемника) определяются по формуле:

$$A_{atm} = \alpha \cdot r / 1000 \quad (16)$$

где α – коэффициент затухания звука в октавной полосе частот в атмосфере, таблица 2.

Примечание: значения α при иных атмосферных условиях, не указанных в таблице 2, даны в таблице 1 [5].

Заметим, что коэффициенты затухания звука в атмосфере зависят от частоты, температуры и относительной влажности и слабо зависят от атмосферного давления. При упрощенных расчетах коэффициент затухания в атмосфере α усредняют по частотам и выбираются в соответствии с погодными условиями для конкретной местности.

Другие виды затуханий и другие аспекты, которые необходимо учитывать при акустических расчетах на открытых площадках, мы рассмотрим в следующих статьях.

Список литературы

- Кочнов О. В. «Системы оповещения о чрезвычайных ситуациях». Журнал «Безопасность» №4 (2020 год).
- Кочнов О. В. «Специфика применения систем оповещения на объектах различного назначения. Часть 4». Журнал «Безопасность» №2 (2022 год).
- Кочнов О. В. «Звукофикация улиц города Москва». Журнал «Безопасность» №1 (2019 год).
- СП 3.13130.2009. Системы противопожарной защиты. Система оповещения и управления эвакуацией людей при пожаре. Требования пожарной безопасности. М.: ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2009
- ГОСТ 31295.2-2005 (ISO 9613-2:1996) «Шум. Затухание звука при распространении на местности. Часть 2. Общий метод расчета», М.:Стандартинформ, 2006.
- СНиП 23-03-2003 «Защита от шума (Soundprotection)». Система нормативных документов в строительстве. Строительные нормы и правила РФ, Москва, 2004.
- Акустика: учебник для вузов / Ш.Я. Вахитов [и др.]; под ред. Ю.А. Ковалгина. М.: Горячая линия-Телеком, 2009. 660 с.
- ГОСТ 17187-2010 (IEC61672-1:2002) «Шумомеры. Технические требования», М.: Стандартинформ, 2012.
- ГОСТ Р 53575-2009 (МЭК 60268-5:2003). Громкоговорители. Методы электроакустических испытаний. М: Стандартинформ, 2011.

Частоты в октавных полос, Гц	Температура воздуха, °С									
	0°			10°			20°			
	Относительная влажность, %									
	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03
63	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05
125	0,08	0,07	0,07	0,09	0,09	0,09	0,09	0,11	0,11	0,11
250	0,21	0,16	0,14	0,17	0,17	0,17	0,21	0,21	0,21	0,21
500	0,61	0,42	0,33	0,39	0,35	0,35	0,42	0,42	0,42	0,42
1000	1,8	1,2	0,93	1,4	0,78	0,91	0,85	0,85	0,85	0,85
2000	4,8	3,6	2,8	3,1	2,1	1,7	2	1,7	1,7	1,7
4000	12	9,6	7,7	8,6	6,1	4,6	5,3	3,9	3,4	3,4
8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000

Табл. 2. Коэффициент затухания звука в атмосфере α , в 8-октавных полосах частот