

БСТ: Бюллетень строительной техники. 2024. № 6 (1078), с. 04–07.

BST: Byulleten' stroitel'noj tehniki. 2024; (6): 04–07

Научная статья

УДК 534.84

РИНЦ: elibrary.ru/contents.asp? titleid=9733

О точности расчетов характеристик направленности источников звука при проектировании систем озвучивания

Х.А. Щиржецкий¹,

А.В. Перетокин²,

¹ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук» (НИИСФ РААСН), Россия, Москва

²ООО «Проектный Институт Строительной Акустики», Россия, Москва

¹a021069@yandex.ru; ²ap@acoustic.ru

On the accuracy of calculations of directional characteristics of sound sources in the design of sound systems

Kh.A. Shchirzhetskiy¹,

A.V. Peretokin²,

¹Research Institute of Building Physics Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (NIISF RAASN), Russia, Moscow

²LLC «Design Institute of Construction Acoustics», Russia, Moscow

¹a021069@yandex.ru; ²ap@acoustic.ru

Аннотация. В работе произведен анализ соотношения между используемыми при расчете прямого поля системами озвучивания с различными характеристиками направленности, необходимых для оценки уровней звукового давления в открытых пространствах. На основании физического представления связи между коэффициентами направленности по звуковому давлению и коэффициентами осевой концентрации получены выводы о необходимости коррекции известных формул по расчету общего показателя направленности различных излучателей звука. Расчетные формулы при этом дифференцированы для вариантов одиночных громкоговорителей и их групповых образований (например, линейных массивов).

Ключевые слова: громкоговорители, акустические системы, характеристика направленности, уровни звукового давления.

Abstract. The article analyses the correlation between the directivity coefficients of sounding systems with different directivity characteristics used in the calculation of the direct field, which are necessary for the estimation of sound pressure levels in open spaces. On the basis of the physical representation of the relationship between sound pressure directivity coefficients and axial concentration coefficients, conclusions about the necessary correction of the known formulas for calculating the total directivity index of different sound emitters are obtained. The calculation formulas are differentiated for variants of single loudspeakers and their group formations (for example, linear arrays).

Key words: loudspeakers, acoustic systems, directivity characteristic, sound pressure levels.

Введение

При расчетах звуковых полей, формируемых при работе систем озвучивания различного назначения, одним из основных факторов, определяющих точность расчетов уровней звукового давления (УЗД) в проектируемых объектах, является корректное определение характеристик направленности используемых акустических систем. Необходимо отметить, что во всех современных руководствах по проектированию систем озвучивания нормируются, как основные параметры, требования по средним УЗД и их допустимой неравномерности на площади озвучивания, что невозможно точно рассчитать без правильного решения указанной задачи, например, [1–3].

При расчетах прямого звукоизлучения систем озвучивания практически во всех современных методиках используется физическая модель формирования сферической волны, формирующейся на некотором расстоянии от акустического центра источника звука, [4]. При этом, на основании некоторых физических представлений принято считать, что для одиночных громкоговорителей $r_0 = 1$ м, так же, как и для их группы (акустических систем), например, [4–7]. К этому расстоянию от центра источника звука привязывают как излучаемую им общую акустичес-

кую мощность, так и, вследствие геометрических и частотных характеристик направленности звукоизлучателя, пространственное распределение интенсивности создаваемых им звуковых потоков.

По этой модели плотность энергии звуковых потоков прямого звукоизлучения в некоторой точке звукового поля можно представить в следующем виде:

$$\varepsilon_i = \frac{P_A D(\theta_i)}{4\pi r_i^2 c}, \quad (1)$$

где P_A – акустическая мощность источника звука, r_i – расстояние до исследуемой точки, c – скорость звука, θ_i – угол между направлением на точку приема и акустической осью излучателя, $D(\theta_i)$ – фактор направленности источника звука под углом θ_i .

При оценке прямого звукоизлучения по звуковому давлению в i -ой точке приема следует использовать известную формулу распространения сферических волн [2]:

$$\bar{p}_i(\theta_i) = \frac{\bar{p}\Phi(\theta_i)}{r_i}, \quad (2)$$

где $\Phi(\theta_i)$ – коэффициент (характеристика) направленности источника под углом θ_i , привязанная к соотношению эффективных звуковых давлений $p(0)/p(\theta_i)$.

В отношении показателя направленности вплоть

до настоящего времени нет твердого согласования его оценки, однако в общем виде в большинстве источников он представляется следующей формулой, например, [6, 8]:

$$D(\theta_i) = \Omega \Phi^2(\theta_i), \quad (3)$$

где Ω – коэффициент осевой концентрации источника звука.

Физический смысл последнего параметра фактически состоит в перераспределении площадей мощности звукоизлучения от ненаправленного к направленному, вдоль акустической оси источника звука [4]. Следовательно, параметр Ω является интегральным критерием характеристик звукоизлучения, в то время как амплитудный параметр $\Phi(\theta)$ – дифференциальным, см. формулу (2).

Очевидно, что с этим противоречием связано некоторое разночтение в практическом использовании для расчетов уровней звука параметра D , так как в ряде источников он приводится как в виде формулы (3), так и как $\Phi^2(\theta)$, например, [7, 8].

Изложенное приводит к необходимости еще раз вернуться к физическому смыслу сочетания параметров D , Ω и $\Phi(\theta)$, что необходимо для увеличения точности акустических расчетов систем озвучивания. Наиболее логичным в этом плане является модель процесса, по которой вокруг акустического центра излучения создается условная сфера радиуса r и выделяется ее поверхностная часть в виде пояса $ds = 2\pi r^2 \sin(\theta) d\theta$, через которую излучается «элемент» интенсивности звукового потока J_θ , создающий часть общей звуковой мощности $dPA = J_\theta dS$ [4]. Интеграл потока энергии по всей площади излучения приводит к следующему выводу:

$$P_A = \frac{p_0^2}{\rho c} \cdot 2\pi r^2 \int_0^\pi \Phi^2(\theta) \sin \theta d\theta, \quad (4)$$

где ρ – плотность воздуха.

Вводя, на основании данного выражения, параметр Ω , равный:

$$\Omega = \frac{2}{\int_0^\pi \Phi^2(\theta) \sin \theta d\theta}. \quad (5)$$

Формулу (4) можно привести к виду:

$$P_A = \frac{p_0^2}{\rho c} \cdot \frac{4\pi r^2}{\Omega}, \quad (6)$$

откуда следует, что, если внести в рассмотрение соответствующую мощность ненаправленного излучателя P'_A (то есть при $\Phi(\theta) = 1$), то параметр Ω можно представить в виде:

$$\Omega = \frac{P'_A}{P_A}. \quad (7)$$

Параметр Ω показывает, насколько меньшую мощность должен излучать направленный источник звука, чтобы получать идентичное звуковое давление p_0 .

Таким образом, при сопоставлении представленного вывода с принятой в большинстве методических рекомендаций формулой (3) расчета показателя направленности следует считать ее недостаточно корректной, так как по ней фактически (при $\theta \neq 0$) происходит двойной учет распределения мощности звукоизлучения по различным направлениям, что может

привести к реальной потере величин требуемых уровней УЗД при расчетах уровней прямого поля на площадях вне направлений акустических осей систем озвучивания, особенно при проведении специфических мероприятий повышенного шумового фона.

Наиболее логичным выходом из создавшегося положения представляется дифференциация расчетных формул (1–3) по направлениям звуковых потоков ($\theta = 0$ и $\theta \neq 0$) на основе следующих физических предпосылок, связанных с размерами звукоизлучателей: отдельные громкоговорители или их определенное количество, встроенное в габаритную акустическую систему.

1 Расчет прямого поля для одиночных громкоговорителей

1.1 Расчет УЗД по направлению акустических осей (при $\theta = 0$)

В этом случае формула (1) принимает вид:

$$\varepsilon_i(r_i, 0) = \frac{P_A \Omega}{4\pi r_i^2 c}. \quad (8)$$

Учитывая известное соотношение $\varepsilon = J/c$, где J – интенсивность звуковых потоков, и вводя в расчеты пороговое значение восприятия интенсивности звука $J_{\text{пор}} = 10^{-12}$ Вт/м², формулу (8) для перехода к принятым в практике уровням звука следует преобразовать к виду:

$$L_i = 10 \lg \left\{ \frac{\frac{P_A \Omega}{4\pi r_i^2}}{\left(\frac{10^{-12} \text{ Вт}}{\text{м}^2} \right)} \right\} = 120 \text{ дБ} + 10 \lg \{ \Omega P_A \} - 20 \lg r_i - 11 \text{ дБ} = \quad (9)$$

$$= 10 \lg \{ \Omega P_A \} - 20 \lg r_i + 109 \text{ дБ}.$$

В соответствии с практикой расчета поля уровней отдельных громкоговорителей в качестве начального значения одиночного источника звука принимают расстояние $r_0 = 1$ м от его акустического центра, например, [2]. Таким образом, из формулы (9) можно получить следующие выражения:

$$L_0 = 10 \lg \{ \Omega P_A \} + 109 \text{ дБ}, \quad (10)$$

$$L_i = L_0 - 20 \lg r_i. \quad (11)$$

Необходимо отметить, что в паспортных данных по громкоговорителям приводятся только значения их электрической мощности $P_{\text{эл}}$, связанной с акустической следующим соотношением:

$$P_A = P_{\text{эл}} \cdot \eta(\%), \quad (12)$$

где η – коэффициент полезного действия громкоговорителя, обычно не превышающий 1–2%.

Стоит отметить, что предложенная сводка формул (9–12) позволяет провести и обратный расчет, то есть по заданному УЗД рассчитать требуемую для его достижения электрическую мощность отдельного громкоговорителя.

1.2 Расчет УЗД по направлениям распространения звука вокруг акустических осей (при $\theta \neq 0$)

В данном случае, в соответствии с законом распространения сферических волн, формула (2), для физически корректной оценки УЗД прямого поля по

направлению θ_i следует представлять в следующем виде, например, [4]:

$$\varepsilon_i(r_i, \theta_i) = \frac{\bar{p}^2(r_i, \theta_i)}{\rho c^2} = \frac{\bar{p}_0^2(r_0, \theta_i) \Phi^2(\theta_i)}{\rho_i^2 \cdot r_i^2}, \quad (13)$$

где $\bar{p}$ – среднеквадратное (эффективное) значение звукового давления в некоторой точке поля, ρ – плотность звука в воздухе, $\bar{p}_0$ – эффективное значение звукового давления источника на расстоянии 1 м от его акустического центра.

Для расчета УЗД формулу (13) необходимо преобразовать к следующему выражению:

$$\left\{ \frac{\bar{p}(r_i, \theta_i)}{p_{\text{пор}}} \right\} = 20 \lg \bar{p}(r_0, \theta_i) + 20 \lg \Phi(\theta_i) - 20 \lg r_i + 94 \text{ дБ}, \quad (14)$$

где $p_{\text{пор}} = 2 \times 10^{-5}$ Па – пороговое значение звукового давления.

При $r_0 = 1$ м и известном из камеральных измерений $L_0 = 20 \lg(r_0 = 1 \text{ м}, \theta_i)$, формулу (14) можно представить в виде:

$$L_1(\theta_i) = L_0(1 \text{ м}, \theta_i) + 20 \lg \Phi(\theta_i) + 94 \text{ дБ}. \quad (15)$$

В свою очередь, расчет УЗД по направлению θ_i должен проводиться по формуле:

$$L_i(r_i, \theta_i) = L_1(\theta_i) - 20 \lg r_i. \quad (16)$$

2 Расчет прямого поля акустических систем из набора громкоговорителей

В физическом плане методология данного расчета не должна отличаться от соответствующих выводов для одиночных громкоговорителей. Единственным здесь отличием является правильный выбор начального состояния r_0 от акустического центра источника звука, принятое, как уже отмечалось, для отдельных громкоговорителей как 1 м. Однако, вследствие значительных размеров современных акустических систем, такое малое расстояние зачастую не позволит сформировать фронт распространения звуковых волн, близкий к модели сферических волн, что требует разработки дополнительных рекомендаций по выбору необходимой точки отсчета начального УЗД.

Для решения поставленной задачи может быть использовано так называемое «условие Горелика», по которому для близких к плоскостным излучателям дискообразной формы разработано следующее условие формирования сферической волны [9]:

$$\Delta \leq \frac{\lambda}{4}, \quad (17)$$

где Δ – разность хода звуковых лучей в некоторой точке поля, в сравнении между центром и концами излучателя, λ – длина волны.

В приложении к задаче Горелика это решение состоит в выполнении следующего условия [9]:

$$\frac{a^2}{2r} \leq \frac{\lambda}{4}, \quad (18)$$

где a – радиус модели излучателя дискообразной формы, r – расстояние, требуемое для формирования фронта сферической волны.

В наших условиях необходимо, кроме выполнения этого требования, обеспечить возможность звукоизлуче-

ния исследуемой акустической системы, для чего, при моделировании области формирования начального (исходного) звукового потока сферической волной также требуется выполнение следующего условия для пульсирующей поршневой диафрагмы [10]:

$$ka \geq 1,28, \quad (19)$$

где $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число, a – в данном случае радиус модели поршневой диафрагмы, идентичный нашей модели излучателя.

В любом случае, при анализе геометрических характеристик распространения звуковых потоков, для правильного понимания условий излучения необходимо использовать соответствующие представления в длинах волн, которые, учитывая, что частотные характеристики современных акустических систем имеют диапазон от 20 Гц до 20 кГц, могут достигать 16 – 17 м.

Таким образом, физически корректным является следующая последовательность расчета начального радиуса формирования сферических волн для акустических систем.

При возможности имитации формы корпуса исследуемой акустической системы прямоугольным параллелепипедом, что практически всегда соответствует их реальным конструкциям, для перехода к модели излучателя в виде поршневой диафрагмы, необходимо ввести характеристический параметр $\bar{a}$, формула (18), путем следующего расчета:

$$\bar{a} = \frac{L + B}{2\pi}, \quad (20)$$

где L – длина, B – ширина прямоугольной панели излучения акустической системы.

Далее, с помощью выражения (19) можно получить формулу минимально необходимого размера характеристического параметра $\bar{a}$ излучателя, требуемого для возможности работы акустической системы в диапазоне низких частот:

$$\bar{a} \geq \frac{1,38 \lambda_{\text{max}}}{2\pi} = 0,22 \lambda_{\text{max}} = \frac{74,8}{f_{\text{H}}}, \quad (21)$$

где λ_{max} – максимальная длина волны, требуемая для излучения граничной частоты f_{H} низкочастотного диапазона.

Необходимо отметить, что поскольку параметр $\bar{a}$ является усредненной величиной габаритов акустической системы, то правильным решением здесь будет для расширения полосы низкочастотного диапазона, допустимое, по конструктивным соображениям, расширение ее размеров до величин, не менее чем $2\bar{a}$.

Для обоснованного выбора начального радиуса формирования шарового излучения r_{min} представляется логически правильным преобразовать формулу (18) к следующему виду:

$$\frac{r_{\text{min}}}{2\bar{a}} \geq \frac{\bar{a}}{\lambda_{\text{max}}}. \quad (22)$$

Данное выражение наглядно показывает, что для формирования сферического звукоизлучения акустической системы отметка начального отсчета УЗД должна не менее чем в 2 раза превышать диаметр

моделирующей ее поршневой диафрагмы (то есть основного габарита акустической системы), а размер каждого из лицевых габаритов должен быть не менее $\lambda_{\max}$.

Для практического расчета требуемого r_0 формулу (21) можно представить в отношении необходимой граничной частоты звукоизлучения акустической системы:

$$r_0 \geq \frac{2\bar{a}^2}{\lambda_{\max}} \cong 0,1\lambda_{\max} = 0,1 \cdot \frac{c}{f_H} \cong \frac{34,0}{f_H}. \quad (23)$$

Из проведенного анализа следует, что для возможности увеличения качества басовых звучаний с возможностью расширения гармоник в низкочастотном диапазоне необходимо несколько увеличить предельные требования по допустимым геометрическим параметрам акустической системы, представленные в выражениях (21–23). Отсюда следует вывод, что установленный для одиночных громкоговорителей начальный радиус отметки сформированной шаровой волны $r_0 = 1$ м должен быть увеличен. Вместе с тем, ориентировочные расчеты по формулам (21–23) показывают, что рекомендованный в ряде прикладных руководств радиус отметки начального УЗД для акустической системы $r_0' = 10$ м вполне приемлем даже для весьма низких частот. Следовательно, коррекция формул (9–11) и (14–16) должна проводиться в приложении к данному начальному радиусу.

2.1 Расчет УЗД для акустических систем по направлению акустических осей (при $\theta = 0$)

В данном случае, при сохранении общего физического смысла формулы (9), формула (10) приобретает вид:

$$L_0 = L(10 \text{ м}, \theta = 0) = 10 \lg\{\Omega P_A\} - 20 \lg 10 + 109 \text{ дБ} = \quad (24) \\ = 10 \lg\{\Omega P_A\} + 89 \text{ дБ}.$$

При этом выражение (11) также является корректным, но при условии $r_i > r_0' = 10$ м.

2.2 Расчет УЗД для акустических систем по направлениям распространения звука вокруг акустической оси (при $\theta = 0$)

Здесь также, при сохранении общего вида формулы (14), с тем только отличием, что вместо $r_0 = 1$ м вводится $r_0' = 10$ м, откуда выражение (15) приобретает следующий вид:

$$L_{10} = L_0(10 \text{ м}, \theta_i) + 20 \lg \Phi(\theta_i) + 74 \text{ дБ}. \quad (25)$$

При этом, формула (16) также преобразуется к соответствующему виду:

$$L_i(r_i, \theta_i) = L_{10}(\theta_i) - 20 \lg r_i, \quad (26)$$

при тех же условиях, то есть при $r_i > r_0' = 10$ м.

Заключение

В связи с тем, что, как было доказано, показатель направленности $D(\theta_i)$ в принятом в ряде руководств виде $\Omega \Phi^2(\theta_i)$ ведет как к потере угловой информации (если оставить его в виде $D = \Omega$), так и ее избыточности (если

полностью сохранять его расчет по формуле (3)). Кроме того, нуждается в коррекции по отношению к современным акустическим системам величина начального радиуса формирования сферических волн и, следовательно, правильной отметки L_0 исследуемого источника звука.

В связи с этим, при условии сохранения параметра D в качестве удобного критерия управления расчетами УЗД при проектировании систем озвучивания можно прийти к следующим выводам:

1. Рекомендуется следующий выбор значений параметра $D(\theta_i)$:

- Ω при $\theta = 0$;
- $\Phi^2(\theta_i)$ при $\theta \neq 0$.

2. Для оценки УЗД одиночных громкоговорителей ($r_0 = 1$ м):

по направлению акустических осей использовать формулы (10–11);

по всем остальным направлениям (при $r_0 \neq 0$) использовать формулы (15–16).

3. Для оценки УЗД группы громкоговорителей акустических систем ($r_0' = 10$ м) рекомендуется:

по направлению акустических осей использовать формулы (11) и (24);

всем остальным направлениям (при $\theta \neq 0$) использовать формулы (25–26).

4. Для оценки акустической мощности источников звука следует использовать формулу (12), привязанную к излучению по направлениям акустических осей. Реально решаемой, как было неоднократно показано, является и обратная задача – по заданному УЗД определить требуемую для создания этого уровня в реперных точках звукового поля акустическую мощность источников звука, например, [8].

Список источников.

1. СП 415.1325800.2018 Здания общественные. Правила акустического проектирования – М., 2018.
2. Руководство по проектированию систем звукового обеспечения на строящихся и реконструируемых объектах Москвы. М: Московская архитектура, 2000.
3. Ahnert W., Noy D. Sound Reinforcement for Audio Engineers. L. – N.Y., 2023.
4. Фурдеев В.В. Акустические основы вещания. М. «Связьиздат». 1960.
5. Сапожков М.А. Звукофикация помещений. М. «Связь», 1979.
6. Маньковский В.С. Акустика студий и залов для звуковоспроизведения. М. Искусство, 1966.
7. Анерт В., Штеффан Ф. Техника звукоусиления. М. Изд-во ООО «ПКФ Леруша», 2003.
8. Рекомендации по акустическому проектированию крытых спортивных сооружений. М: Стройиздат, 1987.
9. Горелик Г.С. Колебания и волны. М.-Л.: Гостехиздат, 1950.
10. Фурдеев В.В. Электроакустика. М.-Л.: Госуд. изд. Техн.-теорет. литературы, 1948.