

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Ю. М. СУХАРЕВСКИЙ

О ПРЕДЕЛЬНО ВОЗМОЖНОМ УСИЛЕНИИ ЗВУКА В ЗАКРЫТОМ ПОМЕЩЕНИИ

(Представлено академиком С. И. Вавиловым 2 II 1940)

1. В моей предыдущей работе [ДАН, XXVI, № 9 (1940)] был рассмотрен вопрос о предельно возможном усилении звука на открытом воздухе. Был подвергнут анализу ряд факторов, определяющих предельно возможную степень усиления звука (K) и было показано, что применение рупорного громкоговорителя и двусторонне направленного микрофона (с косинусоидальной характеристикой) обеспечивает возможность получения достаточного усиления звука даже в неблагоприятных случаях, например при высоком уровне шума. Иначе обстоит дело в закрытом помещении. Если на открытом воздухе микрофон обычно подвергается воздействию только слабого бокового излучения громкоговорителя, то в закрытом помещении на микрофон действует через отраженный звук полное излучение громкоговорителя. Этот, а также некоторые другие факторы, которые будут рассмотрены ниже, являются причиной сильной акустической обратной связи (а. о. с.) в системах, работающих в закрытых помещениях, крайне затрудняющей их практическое использование. Тем больший интерес представляет количественная оценка этих факторов.

2. Будем рассматривать звукоусилительную систему, работающую в закрытом помещении и состоящую из микрофона, громкоговорителя и соединяющего их усилителя с регулятором усиления. В теории а. о. с. [ДАН, XXVI, 5 (1940)] для такой системы (предполагается линейная система) были рассмотрены два крайних случая: 1) случай полной синфазности всех приходящих к микрофону волн и 2) случай равной вероятности любой фазы в каждой волне. Было показано, что при одинаковой величине коэффициента обратной связи частотные и реверберационные искажения, обусловленные а. о. с., в первом случае получаются значительно большими, чем во втором. Результаты экспериментального исследования а. о. с. в закрытом помещении [ДАН, XXVI, № 7 (1940)] показали, что действительные величины $\frac{p}{p_0}$ и $\frac{T_r}{T}$ *, характеризующие соответственно частотные и реверберационные искажения, в общем хорошо ложатся между вычисленными для упомянутых крайних случаев значениями, причем

* Здесь p —полное давление у микрофона от громкоговорителя, p_0 —давление у микрофона от источника звука, подлежащего усилению, T_r —время регенеративной реверберации, T —время естественной реверберации помещения.

величина $\frac{T_r}{T}$ часто оказывается такой, как если бы имела место полная синфазность всех волн, приходящих к микрофону. Поэтому при вычислении предельно возможной степени усиления приходится исходить из выражений, выведенных для этого худшего случая. Напишем их:

$$\frac{P}{\mu P_0} = \frac{1}{1 - \mu} \quad (1)$$

и

$$\frac{T_r}{T} = \frac{\ln g}{\ln [\mu + g(1 - \mu)]} \quad (2)$$

Для обычных условий можно полагать средний амплитудный коэффициент отражения g близким к единице (g редко бывает меньше 0,8), тогда выражение (3) приближается к виду

$$\frac{T_r}{T} = \frac{1}{1 - \mu} \quad (3)$$

Таким образом, если в условиях открытого воздуха заданный коэффициент обратной связи μ однозначно определяет только величину частотных искажений, а величина реверберационных искажений зависит еще и от высоты подвеса громкоговорителя, то в закрытом помещении заданный μ практически однозначно определяет и те и другие искажения.

3. Предположим сначала, что коэффициент усиления δ не зависит от частоты, постоянен для всех точек помещения и равен максимальному коэффициенту обратной связи μ_{\max} *. Здесь под коэффициентом усиления подразумевается отношение полного давления от громкоговорителя (при стационарном состоянии) в некоторой точке помещения к давлению у микрофона от источника звука, подлежащего усилению, при условии малости μ (т. е. при практическом отсутствии а. о. с.). Будем также предполагать равномерное распределение поглощения по поверхностям помещения и не будем учитывать неравномерности поля, обусловленной стоячими волнами (иначе нельзя было бы полагать δ постоянным). Тогда предельно возможная степень усиления, т. е. разность между средним (для слушателей) уровнем силы звука от громкоговорителя и уровнем силы звука у микрофона от источника звука, подлежащего усилению, определяется выражением**

$$K_{\mu} = 20 \lg \mu_{\max}, \quad (4)$$

где μ_{\max} — максимально допустимый коэффициент обратной связи, который может быть определен из выражения (2), если установлена максимально допустимая величина $\frac{T_r}{T}$. Будем теперь заменять предположенные идеальные условия реальными. В реальных системах условие независимости δ от частоты не имеет места, во-первых, из-за непостоянства чувствительности аппаратуры, во-вторых, из-за неравномерности поля прямого звука и, в-третьих, из-за неравномерности поля отраженного звука, обусловленной стоячими волнами. Если максимальному пику частотной характеристики аппаратуры соответствует некоторый коэффициент усиления $\delta_{\max}(f)$, а средней (по частотам) чувствительности, определяющей общий

* При этом, очевидно, μ зависит от частоты. Такая зависимость при постоянном δ может иметь место за счет непостоянного (по частоте) направленного действия микрофона.

** Здесь не принята во внимание направленность микрофона, т. е. предположено, что при частоте, соответствующей μ_{\max} , микрофон является ненаправленным.

уровень силы звука, соответствует $\delta_{\text{ср}}(f)$, то предельно возможная степень усиления звука, определенная ранее выражением (4), уменьшается на величину

$$K_f = 20 \lg \frac{\delta_{\text{max}}(f)}{\delta_{\text{ср}}(f)}. \quad (5)$$

Влияние неравномерности поля прямого звука можно учесть с помощью выражения

$$K_a = 20 \lg \frac{\delta_{\text{ср}}(a)}{\delta_m}, \quad (6)$$

где $\delta_{\text{ср}}(a)$ —средняя для точек расположения слушателей величина коэффициента усиления, учитывающая энергию прямого и отраженного звука, δ_m —коэффициент усиления для точки расположения микрофона. Влияние неравномерности поля отраженного звука можно учесть с помощью выражения

$$K_c = 20 \lg \frac{\delta_{\text{max}}(c)}{\delta_{\text{ср}}(c)}, \quad (7)$$

где $\delta_{\text{ср}}(c)$ —коэффициент усиления, соответствующий средней плотности энергии отраженного звука, $\delta_{\text{max}}(c)$ —коэффициент усиления, соответствующий наибольшему из интерференционных максимумов в помещении. Влияние направленности микрофона можно учесть, если предположить равномерное распределение энергии по всем направлениям, с помощью выражения

$$K_M = 10 \lg n_M, \quad (8)$$

где n_M —коэффициент осевой концентрации микрофона $= \frac{\nu_0^2}{\nu_g^2}$, ν_g —чувствительность микрофона для диффузного звука, ν_0 —чувствительность для прямого звука, приходящего в направлении оси микрофона (предполагается, что в этом направлении расположен источник звука, подлежащего усилению).

4. Если микрофон ненаправленный, но защищен экраном, обращенная к микрофону сторона которого имеет коэффициент поглощения α_a , превышающий средний коэффициент поглощения помещения $\alpha = 1 - g^2$ *, то влияние такой защиты может быть приближенно учтено с помощью эффективного коэффициента концентрации микрофона **

$$n_{\text{эфф}}(M) = \frac{(1 - \alpha) 4\pi}{(1 - \alpha_a) \Omega + (1 - \alpha)(4\pi - \Omega)}, \quad (9)$$

где Ω —телесный угол, опирающийся на периметр экрана, с вершиной в точке расположения микрофона. Величину $n_{\text{эфф}}(M)$ из выражения (9) следует подставить вместо n_M в выражение (8). Для направленного микрофона, защищенного экраном,

$$n_{\text{эфф}}(M) = \frac{(1 - \alpha)}{(1 - \alpha_a) Q_M + (1 - \alpha)(1 - Q_M)}, \quad (10)$$

где Q_M —отношение энергии, приходящей к микрофону в направлениях, охватываемых телесным углом Ω , ко всей энергии. Величина Q_M зависит от формы характеристики направленности микрофона и ориентировки его оси по отношению к поверхности экрана. Подобная величина (Q) была вычислена для направленного громкоговорителя, работающего в прямо-

* В качестве такого экрана можно рассматривать и близкую к микрофону стену помещения, если ее коэффициент поглощения превышает средний коэффициент поглощения помещения.

** При этом диффракция вокруг экрана во внимание не принимается.

угольном помещении с одной сильно поглощающей гранью [ДАН, XXV, 1 (1939)]. Примененный в этом случае способ вычисления с успехом может быть использован и в рассматриваемом случае. Для ненаправленного микрофона, очевидно, $Q_M = \frac{\Omega}{4\pi}$. Теперь можно написать выражение для действительной величины предельно возможной степени усиления в закрытом помещении. Это выражение имеет следующий вид:

$$K = K_\mu - K_f + K_a - K_c + K_M. \quad (11)$$

5. Прежде чем переходить к определению численных значений величины K для нормальных условий, рассмотрим величину K_a , которая зависит от среднего коэффициента поглощения помещения, характеристики направленности громкоговорителя и расположения последнего относительно слушателей и микрофона. Рассмотрим обычный случай применения громкоговорителя с экспоненциальным рупором. Такой громкоговоритель, как было показано (1), имеет в сравнительно широком диапазоне частот (от $4f_{кр}$ до $24f_{кр}$, где $f_{кр}$ — критическая частота дюрора) постоянную характеристику направленности, которую с практически достаточной точностью можно аппроксимировать эллипсоидом вращения. Для эллипсоидальной характеристики коэффициент направленности* определяется выражением

$$R_\gamma(r) = \frac{(1 - e^2) \cos \gamma}{1 - e^2 \cos^2 \gamma}, \quad (12)$$

а коэффициент концентрации** определяется выражением

$$\eta_\gamma(r) = \frac{4e^2 \cos^2 \gamma}{(1 - e^2 \cos^2 \gamma)^2 \left[\frac{1}{1 - e^2} - \frac{1}{2e} \ln \frac{(1 + e)}{(1 - e)} \right]}, \quad (13)$$

где e — эксцентриситет эллипса, эквивалентного характеристике направленности, γ — угол между данным направлением и осью громкоговорителя. Полная плотность энергии в некоторой точке помещения

$$E = E_{пр} + E_{отр}, \quad (14)$$

где $E_{пр}$ и $E_{отр}$ — части плотности энергии, обусловленные соответственно прямым и отраженным звуком. Можно показать, что при равномерном распределении в помещении энергии отраженного звука величина

$$K_a = 20 \lg \frac{\delta_{ср}(a)}{\delta_M} = 10 \lg \frac{1 + \frac{1}{\eta_{ср}(a)}}{1 + \frac{1}{\eta_M}}, \quad (15)$$

где $\eta_{ср}(a)$ — средняя для точек расположения слушателей величина акустического отношения, η_M — акустическое отношение в точке расположения микрофона (акустическое отношение $\eta = \frac{E_{отр}}{E_{пр}}$). Если в условиях открытого воздуха выгодно направлять ось громкоговорителя на последний ряд слушателей, так как при этом получается наибольшая равномерность звукового поля (2), то в закрытом помещении обычно приходится напра-

* Коэффициент направленности громкоговорителя представляет отношение давления в данном направлении к осевому давлению при равном расстоянии.

** Коэффициент концентрации громкоговорителя представляет отношение силы звука в данном направлении к средней (для всех направлений) силе звука при равном расстоянии.

влять ось громкоговорителя ближе к центру поверхности, занятой слушателями, так как при этом уменьшается средняя величина акустического отношения (за счет уменьшения плотности энергии отраженного звука) и, следовательно, при заданном среднем коэффициенте поглощения α обеспечивается лучшая слышимость (разборчивость)*. При таком направлении оси громкоговорителя можно полагать среднюю (для слушателей) плотность энергии прямого звука равной плотности энергии прямого звука в точке пересечения оси громкоговорителя с поверхностью, на которой расположены слушатели. Для этой точки акустическое отношение

$$\eta_0(a) = \eta_{\text{ср}}(a) = \frac{16\pi [Q(1 - \alpha_1) + (1 - Q)(1 - \alpha_2)] \sin^2 \vartheta}{An_0(r)L^2}, \quad (16)$$

где $A = \alpha S$ — полное поглощение помещения; S — площадь внутренних поверхностей; $n_0(r)$ — коэффициент осевой концентрации громкоговорителя, который можно получить из выражения (13), если положить $\gamma = 0$; ϑ — угол между осью громкоговорителя и вертикалью; α_1 — коэффициент поглощения поверхности, занятой слушателями; α_2 — средний коэффициент поглощения для остальных поверхностей помещения; Q — отношение энергии прямого звука, падающей на поверхность, занятую слушателями, ко всей энергии прямого звука (о способе вычисления Q уже упоминалось); L — расстояние (по горизонтали) от точки пересечения оси громкоговорителя с этой поверхностью до вертикали подвеса громкоговорителя. Если известно $\eta_0(a)$, то η_M может быть вычислено из выражения:

$$\eta_M = \eta_0(a) \frac{\cos^2 \vartheta}{\cos^2 \zeta \cdot R_{\vartheta-\varphi}^2(r)}, \quad (17)$$

где $R_{\vartheta-\varphi}(r)$ — коэффициент направленности громкоговорителя для угла $\vartheta - \varphi$ (с вершиной в точке подвеса громкоговорителя) между направлением на микрофон и осью громкоговорителя. Для обычных условий в помещениях можно полагать $\eta_M = \infty$ (вследствие малого $R_{\vartheta-\varphi}(r)$ и не очень большого ϑ) **.

6. При усилении речи стационарное состояние в помещении не устанавливается вследствие краткости отдельных гласных, уровень силы звука которых в основном определяет общий уровень громкости речи. Если отношение плотности энергии отраженного звука при условиях, соответствующих импульсному характеру речи ($E_{\text{отр}}(\tau)$), к плотности энергии отраженного звука при установившемся состоянии ($E_{\text{отр}}$) обозначить q , то выражение (15) для случая усиления речи нужно переписать так:

$$K'_a = 10 \lg \frac{q + \frac{1}{\eta_{\text{ср}}(a)}}{1 + \frac{1}{\eta_M}}. \quad (18)$$

Можно показать, что

$$q = \frac{1}{1 - \alpha} \left[\frac{\left(1 - e^{-\frac{13,8 \tau_1}{T}}\right)}{\left(1 - e^{-\frac{13,8 (\tau_1 + \tau_2)}{T}}\right)} - \alpha \right], \quad (19)$$

где τ_1 — длительность импульса, τ_2 — промежуток между импульсами. При $\tau_2 = 0$, т. е. для стационарного состояния, $q = 1$ и $K'_a = K_a$.

* Получающееся при этом некоторое увеличение неравномерности поля прямого звука играет относительно меньшую роль.

** Следует отметить, что именно при этих условиях проводилось упомянутое выше экспериментальное исследование а. о. с.

7. На графике фиг. 1 показана предельно возможная степень усиления звука в закрытом помещении при различных средних коэффициентах поглощения, вычисленная для следующих условий: 1) помещение—прямоугольное со сторонами A , B и C , относящимися, как $5 : 3 : 2$ (длина, ширина, высота); 2) расстояние $L=0,75 A$, а высота подвеса громкоговорителя $h=0,75 C$ и, следовательно, угол наклона оси громкоговорителя $\vartheta = 68^\circ$; 3) поглощение распределено по поверхностям помещения равномерно, т. е. $\alpha_1=\alpha_2$; 4) громкоговоритель рупорный, характеристика направленности громкоговорителя—эллипсоид вращения, причем направленность не зависит от частоты; 5) эксцентриситет эллипса, эквивалентного характеристике направленности, $e=0,9$ и коэффициент осевой концентрации $n_{0(r)}=22$ *; 6) число громкоговорителей взято равным 2, так как один громкоговоритель не покрывает широкой площади, занятой слушателями; предположено, что оба громкоговорителя расположены в одной точке (оси направлены под углом); 7) влияние прямого звука одного громкоговорителя в зоне, покрываемой звуком другого громкоговорителя, предположено малым; так как громкоговорители взяты равной мощности, то принято, что применение второго громкоговорителя приводит только к удвоению акустического отношения, определяемого выражением (16); 8) микрофон ненаправленный и без защитного экрана (т. е. $n_{эфф(м)}=1$), микрофон расположен непосредственно под громкоговорителями (т. е. $\varphi=0$); 9) величина акустического отношения у микрофона принята равной бесконечности; 10) величина неравномерности (по частоте) чувствительности аппаратуры принята равной 5 дб; 11) величина неравномерности поля, обусловленной стоячими волнами в помещении, в соответствии с экспериментальными данными принята равной 8 дб, что соответствует наибольшему из наблюдаемых отношений $\frac{\delta_{\max(c)}}{\delta_{\text{ср}(c)}}=2,5$; 12) длительность усиливаемых сигналов предположена достаточно большой для установления в помещении стационарного состояния; 13) величина $\frac{T_r}{T}$ взята равной 1,7; как показали результаты экспериментов, при такой величине $\frac{T_r}{T}$ еще не возникает искажений, обусловленных а. о. с., соответствующая величина μ вычислена по формуле (2); 14) уменьшение направленности рупора на нижних частотах во внимание не принималось, что, как можно показать, в данном случае вполне допустимо.

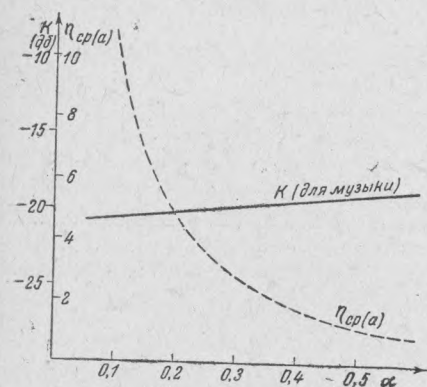
График фиг. 1 свидетельствует о том интересном факте, что предельно возможная степень усиления почти не зависит от среднего коэффициента поглощения. Следует также отметить, что для определенной формы помещения и определенных условиях размещения громкоговорителя предельно возможная степень усиления не зависит от объема помещения. Наконец, и это самое важное, график фиг. 1 свидетельствует о том, что возможности усиления звука в помещениях весьма ограничены, так как величина K в общем оказывается порядка—20 дб, что при неблагоприятных условиях в смысле уровня шума, мощности источника звука, подлежащего усилению, расстояния от источника до микрофона и т. п. является недостаточным. Применение микрофонов с односторонней и двусторонней направленностью, имеющих коэффициент концентрации $n_m=3$, дает выигрыш в предельно возможном усилении только на 5 дб **. Некоторые преимущества

* Подстановка в формулу (13) $e=0,9$ и $\gamma=0$ дает $n_{0(r)}=25$. Поскольку формула (13) не учитывает небольшого заднего и бокового излучения громкоговорителя, взятое значение $n_{0(r)}=22$ более соответствует истинному.

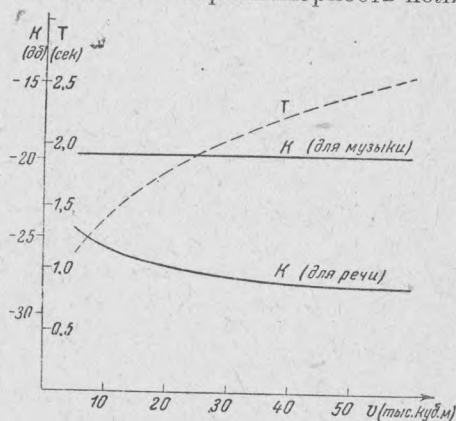
** Т. е. значительно меньший выигрыш, чем дает двусторонне направленный микрофон в условиях открытого воздуха (20 дб).

дает применение нагрудных или петличных микрофонов, для которых экраном является тело оратора. Полагая для этих микрофонов $\alpha_0 = 1$, угол $\Omega = 2\pi$, получаем $n_{эфф(м)} = 2$ и, принимая во внимание в 2—3 раза меньшее расстояние от рта оратора (чем при обычном микрофоне), получаем выигрыш в предельно возможном усилении при применении нагрудных микрофонов на 10—12 дБ по сравнению с обычным ненаправленным микрофоном*.

8. Величины акустического отношения $\eta_{ср(a)}$, вычисленные по формуле (16) (с добавочным коэффициентом в числителе—2, учитывающим применение двух громкоговорителей) для различных α , приведены также на графике фиг. 1. Первые результаты проводимых в настоящее время экспериментов по определению влияния на разборчивость речи величины акустического отношения показывают, что при времени реверберации до 3 сек. акустическое отношение, не превышающее 3—5, уже гарантирует хорошую разборчивость. Учитывая неравномерность поля



Фиг. 1. Предельно возможное усиление звука в помещении и средняя величина акустического отношения для различных коэффициентов поглощения (громкоговоритель рупорный, микрофон ненаправленный).



Фиг. 2. Предельно возможное усиление звука и время реверберации для помещений различного объема при средней величине акустического отношения $\eta_{ср(a)} = 2,5$ (громкоговоритель рупорный, микрофон ненаправленный).

прямого звука и исходя из этой величины [акустического] отношения, можно принять $\eta_{ср(a)} = 2,5$, которому при упомянутых выше условиях соответствует $\alpha = 0,325$. Вычисленные при таком коэффициенте поглощения (по формуле Эйринга) значения времени реверберации для различных объемов помещения приведены на графике фиг. 2. Там же приведена вычисленная зависимость от объема помещения величины предельно возможной степени усиления звука для случая усиления сигнала импульсного характера. Величина τ_1 принята равной 0,05 сек., а $\tau_2 = 0,15$ сек., что примерно соответствует характеру речи. Остальные условия были приняты такими же, как и при вычислении кривых фиг. 1. Средний коэффициент поглощения α был принят равным 0,325. Для сравнения на графике фиг. 2 нанесена прямая, соответствующая случаю усиления длительных сигналов, например музыки. График фиг. 2 показывает, что условия для усиления речи в закрытом помещении крайне неблагоприятны. Поэтому изыскание всевозможных средств для ослабления а. о. с. в звукоуси-

* Применение ультранаправленных микрофонов с коэффициентом концентрации 10 могло бы дать выигрыш на 10 дБ, но для использования в помещениях существующие конструкции этих микрофонов слишком громоздки.

лительных установках, работающих в закрытом помещении, является весьма актуальным. В качестве одного из таких средств можно предложить «размешивание» стоячих волн в помещении, которое можно осуществить, например, путем покачивания или медленного вращения рупора, так чтобы ось рупора описывала некоторый конус*. В этом случае у микрофона пучности стоячих волн быстро сменяются узлами и система ведет себя так, как если бы на микрофон действовала средняя величина давления. Упомянутое средство уменьшения а. о. с. было проверено на опыте, причем с установкой, которая при неподвижном положении рупора генерировала (конечно, при μ , близком к 1), удавалось, вращая рупор, не только получить отсутствие генерации, но и обеспечить хорошее качество усиления речи. Вместо вращения рупора можно предложить размешивать стоячие волны с помощью вращающегося экрана, расположенного либо в самом рупоре у его устья, либо непосредственно перед ним. От размешивания стоячих волн можно ожидать увеличения предельно возможной степени усиления звука в закрытом помещении на 6—8 дб.

Поступило
2 II 1940

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Ю. М. Сухаревский, Электросвязь, № 4 (1939). ² Ю. М. Сухаревский, Известия ОН АН СССР, № 7 (1939).

* Механизм громкоговорителя при этом только поворачивается вокруг своего центра.