

ОБЩИЙ И ЧАСТНЫЙ КРИТЕРИИ АКУСТИЧЕСКОГО КАЧЕСТВА ПОМЕЩЕНИЙ. ИХ АДЭКВАТНОСТЬ

Е. Е. Голиков

Коэффициент Q'' , предложенный автором для оценки акустики помещений, и оптимум времени реверберации рассматриваются как общий и частный критерии артикуляционного качества помещений. Показывается адекватность общего и частного критериев; приводится доказательство правильности коэффициента Q'' как критерия качественной оценки акустики помещений.

В качестве однозначного критерия для оценки акустики помещений автором был предложен [1] новый коэффициент (критерий), построенный на основе известного критерия Сухаревского — Струтта с введением двух уточняющих множителей, учитывающих фактор громкости и интегральный эффект слухового восприятия. Выражение для этого коэффициента имеет вид:

$$Q'' = \frac{\left[\frac{P\theta_0 R^2(\varphi)}{4\pi cr^2} + \frac{PT}{13,8V} \left(1 - e^{-\frac{13,8}{16T}} \right) \right] TK_r}{\frac{PT}{13,8V} e^{-\frac{13,8}{16T}} + E_h}, \quad (1)$$

где P , θ_0 , $R(\varphi)$ — акустическая мощность, коэффициент осевой концентрации и фактор диаграммы направленности источника звука соответственно, V — объем помещения, r — расстояние точки наблюдения от источника звука, c — скорость звука, E_h — плотность звуковой энергии шума в тех же единицах, в каких берутся значения других слагаемых в числителе и знаменателе, также имеющих размерность плотности звуковой энергии.

Одним из уточняющих множителей является время реверберации T ; второй множитель K_r выражается через уровень громкости следующим образом:

$$K_r = 0,0388N_r e^{-N_r/70}. \quad (2)$$

Заметим, что в выражении (1) первое и второе слагаемые в скобках в числителе и первое слагаемое в знаменателе, представляющие собою плотности звуковой энергии соответственно прямого звука, полезной и вредной частей отраженного звука, записаны так, как предложено Струттом. Если же названные слагаемые определять по уточненным формулам Сухаревского [2], то выражение коэффициента Q'' получает вид:

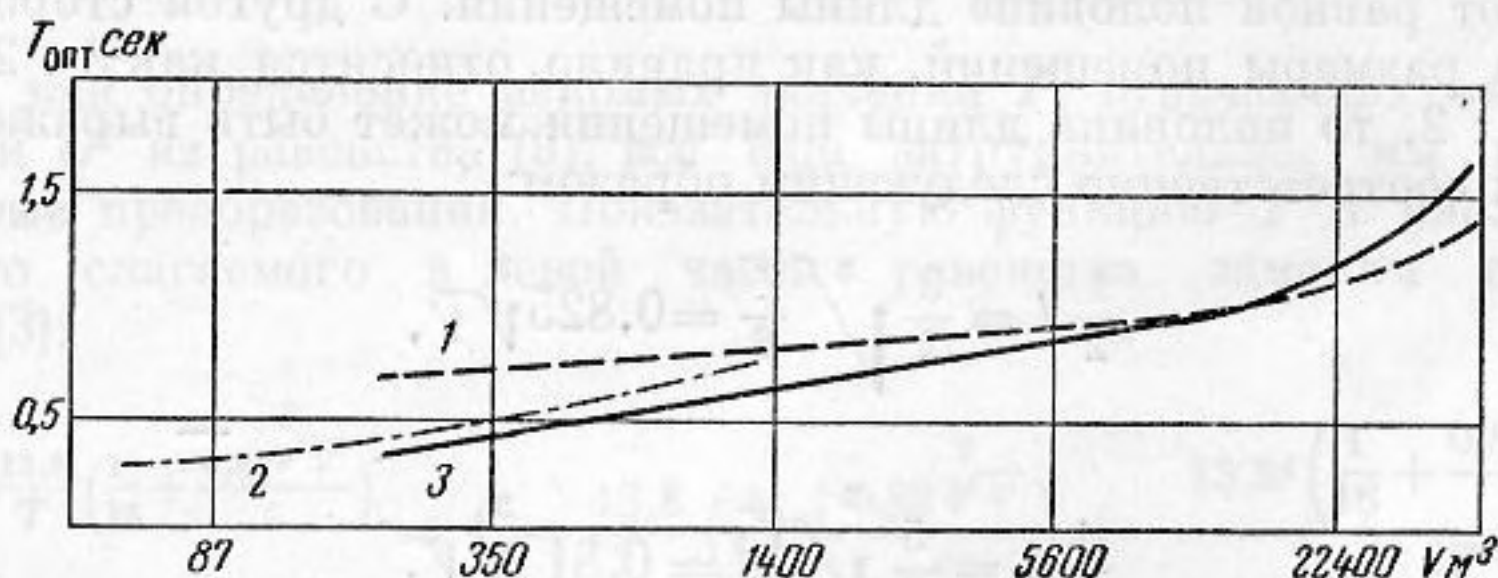
$$Q'' = \frac{\left\{ \left[\frac{P}{4\pi cr^2} - \frac{4P}{cS} \right] \theta_0 R^2(\varphi) + \frac{PT}{13,8V} \left[1 - e^{-\frac{13,8}{T} \left(\frac{1}{16} + \frac{r}{c} \right)} \right] \right\} TK_r}{\frac{PT}{13,8V} e^{-\frac{13,8}{T} \left(\frac{1}{16} + \frac{r}{c} \right)} + E_h}, \quad (3)$$

где S — площадь внутренних поверхностей помещения. Поправки Сухаревского в выражении данного критерия оказываются противоположными по знаку и в значительной мере взаимно компенсируются. Разница численных значений критерия, определенных с учетом поправок Сухаревского и без такового, составляет не более 5 ÷ 6% от этих значений. По-

этому оба выражения коэффициента Q'' могут рассматриваться как тождественные. Выражение (1) проще и удобнее для инженерных архитектурно акустических расчетов, с другой стороны, выражение (3) является несколько более строгим.

Коэффициент Q'' учитывает все наиболее существенные акустические факторы, влияющие на акустическое качество помещения. Поэтому, при его использовании оценка акустики помещения оказывается более всесторонней и полной, чем при использовании в качестве критерия объемного артикуляционного оптимума реверберации (в совокупности с значениями частотного оптимума реверберации). Последний критерий учитывает только влияние реверберационного фактора и фактора громкости, которые являются очень существенными, но далеко не единственными факторами, определяющими акустическое качество помещений. В соответствии с этим, предложенный новый критерий, с одной стороны, и оптимум времени реверберации, — с другой, могут рассматриваться как общий и частный критерии акустического качества.

Очевидно, должна иметь место адекватность значений общего и частного критериев. Значения объемного артикуляционного оптимума реверберации, например, широко известные значения Кнудсена (кривая 1 на фигуре) должны соответствовать оптимальным значениям критерия Q''^* , если эти последние будут определены для помещений различных



объемов в зависимости от времени реверберации (т. е. в зависимости от одного только этого аргумента при наличии ряда других аргументов функции Q''). Кроме того, те значения времени реверберации как аргумента функции Q'' , которые отвечают максимумам этой функции, очевидно, должны совпасть со значениями объемного артикуляционного оптимума реверберации, если выражение нового критерия Q'' правильно.

Оптимальное артикуляционное время реверберации не зависит от места расположения в помещении той точки, в которой осуществляется измерение. Однако, как критерий акустического качества помещений, оно связано с артикуляцией, определяемой для всего помещения в среднем. Эта средняя для всего помещения артикуляция может рассматриваться как артикуляция в средней точке помещения. Поэтому определенные Кнудсеном экспериментальные значения артикуляционного оптимума реверберации можно считать привязанными к средним точкам помещений различных объемов.

В соответствии с этим максимумы общего критерия Q'' и отвечающие этим максимумам значения времени реверберации при упомянутом сопоставлении со значениями объемного артикуляционного оптимума реверберации, должны быть взяты также для средних точек помещений различных объемов.

Так как установление адекватности общего и частного критериев акустического качества помещений может служить дополнительным доказа-

* В данном случае оптимальные значения являются максимальными, так как более высокому акустическому качеству (процентной артикуляции) отвечают более высокие значения коэффициента Q'' [1].

тельством правильности нового уточненного общего критерия, произведем расчеты, необходимые для проверки действительного существования такой адекватности.

Согласно сказанному выше, эти расчеты должны быть направлены на определение значений аргумента T , отвечающих максимумам функции Q'' . При этом мы будем пользоваться при анализе более точным и строгим выражением (3). Кроме того, введем некоторые условия и ограничения, которые вполне допустимы с точки зрения точности производимых выкладок и в то же время позволяют упростить выражение функции и все последующие операции. Прежде всего, нужно учесть то обстоятельство, что значения объемного артикуляционного оптимума реверберации, на сопоставление с которыми мы ориентируем наши проверочные выкладки, получены экспериментально для условий естественной (т. е. неусиленной и направленной) передачи речи. Поэтому коэффициенты, учитывающие в выражении (3) направленность источника звука, должны быть приравнены единице.

Далее, поскольку в наших выкладках должны рассматриваться значения функции Q'' , относимые к средней точке помещений различных объемов, то соответственно координата точки приема звука относительно источника его r в выражении функции должна соответствовать координате средней точки помещений. Последнюю в акустических расчетах обычно принимают равной половине длины помещения. С другой стороны, если линейные размеры помещений, как правило, относятся как 3 : 2 : 1, или как 5 : 3 : 2, то половина длины помещения может быть выражена через его объем соответственно следующим образом:

$$\frac{1}{2} l = \frac{3}{2} \sqrt[3]{\frac{V}{6}} = 0,825 \sqrt[3]{V}, \quad (4)$$

или

$$\frac{1}{2} l = \frac{5}{2} \sqrt[3]{\frac{V}{30}} = 0,81 \sqrt[3]{V}. \quad (5)$$

В соответствии с этим, в выражении функции Q'' положим

$$r \cong 0,82 \sqrt[3]{V}. \quad (6)$$

Через объем помещения мы выразим и площадь внутренних поверхностей помещения S . Приведенные выше обычные соотношения линейных размеров помещений позволяют получить зависимость.

$$S \cong 6,6 \left(\sqrt[3]{V} \right)^2. \quad (7)$$

В соответствии с фактическими данными можно считать, что уровни речи, наблюдаемые в средних точках помещений наиболее часто встречающихся объемов, при свойственных таким объемам временах реверберации и средних голосовых возможностях диктора, не опускаются ниже $N_r = 45 \div 50$ дб. Соответственно, значения коэффициента K_r в выражении (3) изменяются в узких пределах $0,94 \div 1$ и близки к единице. Следовательно, относя значения функции Q'' к средним точкам помещений, мы можем считать коэффициент K_r в выражении функции постоянной величиной, не зависящей от аргумента T и равной единице.

Наконец, примем во внимание, что величину плотности звуковой энергии посторонних звуков или шума в выражении рассматриваемой функции E_h всегда можно выразить в долях реверберационной помехи (первого слагаемого в знаменателе выражения). Для обозначения величины доли введем символ δ .

С учетом всех сформулированных допущений и условий выражение для Q'' (3) должно быть переписано в виде

$$Q'' = \frac{\left\{ \frac{P}{4\pi c (0,82\sqrt{V})^2} - \frac{4P}{6,6 (\sqrt{V})^2 c} + \frac{PT}{13,8V} \left[1 - e^{-\frac{13,8}{T} \left(\frac{1}{16} + \frac{0,82\sqrt{V}}{c} \right)} \right] \right\} T}{(1+\delta) \frac{PT}{13,8V} e^{-\frac{13,8}{T} \left(\frac{1}{16} + \frac{0,82\sqrt{V}}{c} \right)}} \quad (8)$$

Применив обычные приемы анализа последнего выражения функции Q'' для определения значений T , отвечающих максимуму Q'' , мы получаем условие:

$$\begin{aligned} & - \frac{V}{4\pi c (0,82\sqrt{V})^2} + \frac{4V}{6,6 (\sqrt{V})^2 c} - \frac{T}{13,8} + \\ & + \frac{T^2}{13,8^2 \left(\frac{1}{16} + \frac{0,82\sqrt{V}}{c} \right)} - \frac{T^2 e^{-\frac{13,8}{T} \left(\frac{1}{16} + \frac{0,82\sqrt{V}}{c} \right)}}{13,8^2 \left(\frac{1}{16} + \frac{0,82\sqrt{V}}{c} \right)} = 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Так как определение искоемых значений T , отвечающих экстремумам функции Q'' из равенства (9), все еще затруднительно, мы произведем некоторые преобразования. Показательную функцию T в числителе последнего слагаемого в левой части равенства заменим следующим рядом [3]:

$$\begin{aligned} F = e^{-\frac{13,8}{T} \left(\frac{1}{16} + \frac{0,82\sqrt{V}}{c} \right)} &= 1 - \frac{13,8}{T} \left(\frac{1}{16} + \frac{0,82\sqrt{V}}{c} \right) + \frac{13,8^2 \left(\frac{1}{16} + \frac{0,82\sqrt{V}}{c} \right)^2}{2T^2} - \\ & - \frac{13,8^3 \left(\frac{1}{16} + \frac{0,82\sqrt{V}}{c} \right)^3}{6T^3} + \frac{13,8^4 \left(\frac{1}{16} + \frac{0,82\sqrt{V}}{c} \right)^4}{24T^4} - \\ & - \frac{13,8^5 \left(\frac{1}{16} + \frac{0,82\sqrt{V}}{c} \right)^5}{120T^5} + \frac{13,8^6 \left(\frac{1}{16} + \frac{0,82\sqrt{V}}{c} \right)^6}{720T^6} - \dots \\ & \dots = u_1 - u_2 + u_3 - u_4 + u_5 - u_6 + u_7 - \dots \end{aligned} \quad (10)$$

Условие правомерности такого разложения функции F в ряд в данном случае выполняется, так как $T > 0$.

Ограничиваясь при вычислениях функции F , при различных значениях объемов и соответственном времени реверберации шестью членами ряда, мы получаем погрешность не более 5,6% и только при самых малых возможных значениях объемов погрешность может быть больше, достигая 7—10%.

Такая погрешность в наших проверочных расчетах является допустимой, так как значения объемного артикуляционного оптимума реверберации, с которыми должны быть сопоставлены наши искомые величины, определяются с той же точностью.

Если, заменяя функцию F суммой шести членов ряда (10), одновременно два последних члена, а именно — пятый и шестой, выразим в долях четвертого члена, т. е. представим их в следующем виде:

$$u_5 = \frac{X}{4} u_4, \quad (11)$$

$$u_6 = \frac{X^2}{20} u_4, \quad (12)$$

где

$$X = \frac{13,8}{T} \left(\frac{1}{16} + \frac{0,82\sqrt[3]{V\bar{V}}}{c} \right), \quad (13)$$

причем величину X в выражениях (11) и (12) заменим средним значением, отвечающим среднему значению диапазона возможных объемов помещений $V_{\text{ср}} = 11\,200 \text{ м}^3$ и среднему значению времени реверберации $T_{\text{ср}} = 2 \text{ сек}$, то сумма шести членов ряда, которой мы заменяем функцию F , приводится к виду

$$F \cong 1 - \frac{13,8}{T} \left(\frac{1}{16} + \frac{0,82\sqrt[3]{V\bar{V}}}{c} \right) + \frac{13,8^2}{2T^2} \left(\frac{1}{16} + \frac{0,82\sqrt[3]{V\bar{V}}}{c} \right)^2 - 0,834 \frac{13,8^3}{6T^3} \left(\frac{1}{16} + \frac{0,82\sqrt[3]{V\bar{V}}}{c} \right)^3. \quad (14)$$

Очевидно, что представление величины X средним значением будет вносить некоторую дополнительную погрешность в производимые выкладки, но только при крайних возможных значениях аргумента функции F и соответственных крайних нижних и верхних пределах возможных объемов.

После подстановки (14) в равенство (9) последнее принимает вид:

$$-\frac{V}{4\pi c (0,82\sqrt[3]{V\bar{V}})^2} + \frac{4V}{6,6 (\sqrt[3]{V\bar{V}})^2 c} - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{16} + \frac{0,82\sqrt[3]{V\bar{V}}}{c} \right) + 0,834 \frac{13,8}{6T} \left(\frac{1}{16} + \frac{0,82\sqrt[3]{V\bar{V}}}{c} \right)^2 = 0,$$

откуда значения времени реверберации T , при которых функция Q'' имеет максимум, могут быть выражены следующим образом:

$$T = \frac{1,93 \left(\frac{1}{16} + \frac{0,82\sqrt[3]{V\bar{V}}}{c} \right)^2}{\frac{V}{4\pi c (0,82\sqrt[3]{V\bar{V}})^2} - \frac{4V}{6,6 (\sqrt[3]{V\bar{V}})^2 c} + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{16} + \frac{0,82\sqrt[3]{V\bar{V}}}{c} \right)}. \quad (15)$$

Если учесть, что максимумам функции Q'' отвечают максимумы артикуляции, то значения T , получаемые из выражения (15) для различных объемов помещений V , представляют собою ни что иное, как значения объемного артикуляционного оптимума реверберации. Поэтому мы назовем эти значения времени реверберации оптимальными теоретическими $T_{\text{опт(т)}}$ в отличие от найденных экспериментально, которые назовем оптимальными экспериментальными $T_{\text{опт(э)}}$.

На фигуре приведено сопоставление $T_{\text{опт(э)}}$ (сплошная кривая 3) с экспериментальными значениями $T_{\text{опт(э)}}$ по данным Кнудсена (кривая 1) и по данным Беранека (кривая 2). Величины $T_{\text{опт(т)}}$ и $T_{\text{опт(э)}}$ даны в функции объема помещения V . Законы изменения теоретических и экспериментальных значений артикуляционного оптимума времени реверберации близки, и имеет место довольно точное совпадение самих значений оптимума для средней части диапазона объемов. Заметим, что при значении объема $V = 11\,200 \text{ м}^3$, для которого выражение (15) является наиболее точным, полученное теоретическое значение реверберационного оптимума совершенно точно совпадает с экспериментальным. Существенное расхождение сопоставляемых значений имеет место лишь на границах диапазона объемов и объясняется тем, что для этих областей уравнение (15) определяет теоре-

тические значения объемного артикуляционного оптимума с погрешностью, превышающей допустимые 7—10%.

Кроме того, необходимо учитывать, что отвечающие кривой 1 экспериментальные значения объемного артикуляционного оптимума реверберации определены Кнудсенем в 1929 году при отсутствии тогда достаточного опыта в проведении акустических измерений. Современные данные, например, данные Беранека [4], свидетельствуют о том, что значения Кнудсена для малых объемов являются несколько завышенными против действительного оптимума времени реверберации. Эти более точные экспериментальные значения (кривая 2) расходятся с теоретическими весьма незначительно.

Таким образом, полученные при анализе выражения общего критерия артикуляционного качества помещений, теоретические значения частного критерия — объемного артикуляционного оптимума времени реверберации, хорошо согласуются с экспериментальными.

Этим доказывается предположенная выше адекватность общего и частного критериев. Это служит также доказательством правильности предложенного общего критерия акустического качества помещений.

Зададимся теперь вопросом, имеется ли то же соответствие в произвольных точках помещений, или же для точек, далеких от «средней», максимумы Q'' имеют место при тех или других отклонениях времени реверберации от оптимальных значений.

Для ответа на поставленный вопрос осуществим в выражении (15) учет влияния координаты точки наблюдения. Воспользовавшись соотношением (6) и произведя подстановку его в выражение (15), найдем новое выражение, которое позволяет определять значения времени реверберации, отвечающие максимумам критерия Q'' в произвольных точках помещений различных объемов:

$$T = \frac{1,93 \left(\frac{1}{16} + \frac{r}{c} \right)^2}{\frac{V}{4\pi cr^2} - \frac{4V}{3} + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{16} + \frac{r}{c} \right)}, \quad (16)$$

где r — расстояние точки наблюдения от источника звука.

Далее, пользуясь выражением (16), определим в конкретном случае одного из помещений с объемом $V = 11\,000 \text{ м}^3$ численные значения времени реверберации, отвечающие максимумам Q'' в трех точках: в средней точке названного помещения и в двух других точках, расположенных относительно источника звука вдвое ближе и вдвое дальше, чем средняя точка.

Сведя данные этих расчетов, находим в них искомый ответ на поставленный выше вопрос. Данные позволяют заключить, что максимумы Q'' в точках, далеких от средней точки, имеют место при времени реверберации, отклоняющемся от оптимальных значений.

При расстояниях точки наблюдения от источника звука	r (среднее)	$0,5 r$ (меньше среднего)	$2r$ (больше среднего)
Время реверберации T , отвечающее максимуму Q'' в рассматриваемой точке	1,0	0,425	1,22

Этот вывод находится в полном соответствии с понятием общего однозначного критерия акустического качества помещений, как критерия, учитывающего влияние на акустический результат, кроме реверберационного, еще и других акустических факторов. Действительно, в значениях общего критерия учитывается не только реверберационный фактор маскировки компонент речи, но и другие акустические факторы, зависящие от того же времени реверберации, а именно — интегральный эффект слуха, соотношение прямого и отраженного звука, соотношение полезной и

вредной частей отраженного (реверберационного) звука. Все эти факторы зависят еще и от координат точки наблюдения.

С изменением координаты точки наблюдения должно измениться и соотношение названных факторов, а следовательно, и акустический результат. Условия в произвольной точке помещения могут быть приведены к оптимальным, но при этом, очевидно, должно иметь место соответственное изменение второго аргумента (времени реверберации). Поэтому в каждой точке помещения наивыгоднейший акустический результат (максимум критерия Q'') может иметь место только при различном, а не при одном и том же значении времени реверберации. Если бы максимумы критерия Q'' в различных точках помещения имели бы место при одних и тех же значениях времени реверберации, то это означало бы, что критерий Q'' и критерий в виде артикуляционного оптимума времени реверберации в сущности идентичны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Е. Е. Голиков. К вопросу о новых коэффициентах качественной оценки акустики помещений. Акуст. журн., 1956, 2, 3, 255—266.
2. Ю. М. Сухаревский. Влияние акустических условий в помещении на разборчивость воспроизведения. Глава из диссертации. МЭИ, 1940.
3. И. Н. Бронштейн и К. А. Семендяев. Справочник по математике для инженеров и учащихся ВТУЗов. М., Гостехиздат, 1948.
4. Leo L. Beranek. Developments in studio design. Proceedings of the I. R. E. 1950, 38, 5, 470—474.

Томский электро-механический
институт инженеров ж.-д. транспорта

Поступила в редакцию
11 августа 1956 г.