ЛИТЕРАТУРА

1. *Jongen H. A. H., Thilssen M. J., van den Aarssen M., Verhoef W. A.* A general model for the absorption of ultrasound by biological tissues and experimental verification // J. Acoust. Soc. Amer. 1986. V. 79. № 2. P. 535–540.
2. *Nassiti D. K., Hill C. K.* The differential and total bulk acoustik scattering cross sections of some human animal tissues // J. Acoust. Soc. Amer. 1986. V. 79. № 6. P. 2034–2047.
3. *Nassiri D. K., Hill C. K.* The use of angular acoustic scattering measurements to estimate structural parameters of human and animal tissues // J. Acoust. Soc. Amer. 1986. V. 79. № 6. P. 2048–2054.
4. *Sehgal C. M., Greenleaf J. F.* Scattering of ultrasound by tissues // Ultrasound Imag. 1984. V. 6. P. 60–80.
5. *Allegra J. R., Hawley S. A.* Attenuation of sound in suspensions and emulsions: theory and experiments // J. Acoust. Soc. Amer. 1971. V. 51. № 5. P. 1545–1564.
6. *Clarke R. L.* The contributions of scattering to the observed back-scattered intensity an ultrasound beam // Acoust. Letter. 1981. V. 4. № 11. P. 224–226.
7. *Dunn F., Law W. K., Frissel L. A.* Nonlinear ultrasonic wave propagation in biological materials // Ultras. Symp. Proc. Chicago. IEEE Oct. 14–16. 1981. № 1. N. Y. № 4. P. 527–532.
8. *Власюк П. А., Власенко Н. Е., Мицко В. Н.* Химический состав картофеля и пути улучшения его качества // Киев: Наук. думка, 1979. С. 193.
9. *Ратинская И. А.* О затухании звука в эмульсиях // Акуст. журн. 1962. Т. 8. № 2. С. 210–215.
10. *Кольцова И. С.* Поглощение и рассеяние акустических волн в дисперсных средах // Акуст. журн. 1987. Т. 33. № 3. С. 510–512.
11. *Зинин П. В., Левин В. М., Маев Р. Г.* Затухание звука в суспензии структурированных микрочастиц // Акуст. журн. 1987. Т. 33. № 5. С. 889–894.

Ленинградский государственный университет

Поступило в редакцию 7.VII.1988

УДК 534.84

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ АКУСТИЧЕСКОГО КАЧЕСТВА МУЗЫКАЛЬНЫХ РАДИОВЕЩАТЕЛЬНЫХ СТУДИЙ

Ланэ М. Ю., Нестеренко Н. С.

Для оценки акустических свойств помещений в дополнение к времени реверберации (T) предлагается использовать большое число разнообразных критериев. Среди них – группа энергетических критериев (ЭК), получаемых из импульсного отклика помещения $P(t)$ путем преобразования

$$E(t)=\int_0^t P^2(t)\,dt, \tag{1}$$

служащего основой для вычисления большинства ЭК. Наибольшее распространение получили индексы ясности, четкости, гулкости, пространственного впечатления и громкости. В данной работе будут рассмотрены первые три из них. Обозначив через E_τ значение $E(t)$ в произвольный момент времени τ, мс, приведем в столбце 2 таблицы наиболее распространенные определения ЭК. Если предположить (в рамках допущений статистической теории), что, начиная с момента выключения источника, процесс спада плотности звуковой энергии сразу происходит по экспоненциальному закону, то все критерии однозначно определяются T [1]. Расчетные соотношения для этого случая с учетом обозначений $a=\exp(-1{,}1/T)$ и $b=\exp(-0{,}69/T)$ представлены в столбце 3 таблицы. При дополнительном учете прямого звука в получаемые по статистической теории формулы (столбец 4) входит расстояние r от источника возбуждения поля до точки приема и радиус гулкости r_h (при $r=r_h$ в установившемся состоянии плотности энергии прямого звука и всех отражений равны [1]). Возможна также форма записи с использованием вместо r_h акустического отношения.

При оценке акустики театрально-концертных залов измерения ЭК применяются достаточно широко [1–3]. Однако данные о значениях ЭК применительно к музыкальным радиовещательным студиям в литературе практически отсутствуют. В восьми музыкальных студиях с объемами от 1040 до 7740 м³ были измерены значения индексов ясности, четкости и гулкости. Звуковое поле возбуждалось выстрелами стартового пистолета из точек размещения различных групп исполнителей (1-е и 2-е скрипки, виолончели и т. п.). Измерительный ненаправленный микрофон последовательно располагался в характерных точках размещения студийных микрофонов при звукозаписи. Сигнал с выхода микрофона усиливался и записывался на профессиональный магнитофон. Для получения значений ЭК сигнал с выхода магнитофона

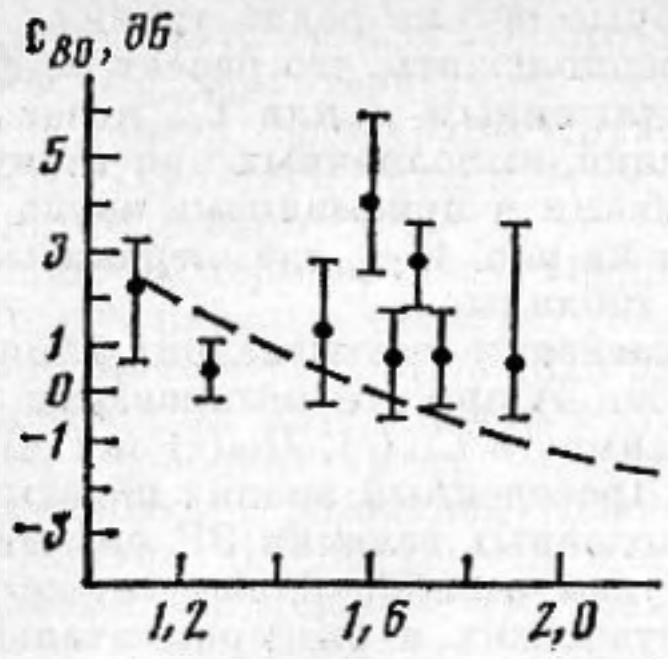

Рис. 1

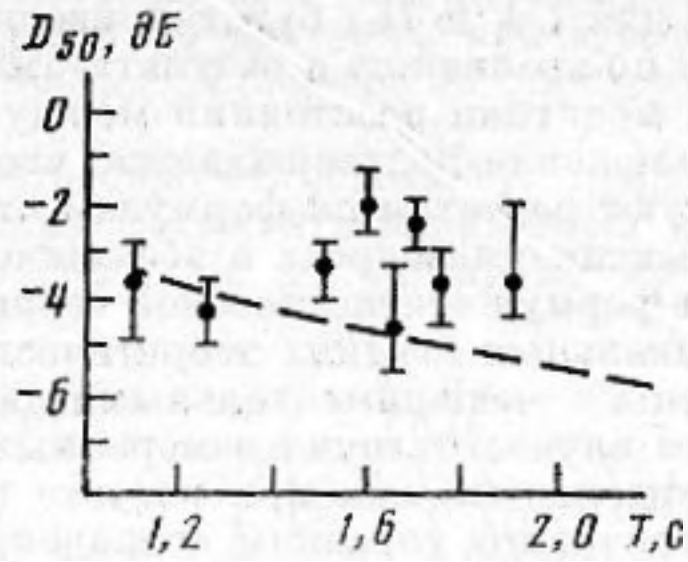

Рис. 2

Рис. 1. Зависимость индекса ясности от времени реверберации без учета прямого звука

Рис. 2. Зависимость индекса четкости от времени реверберации без учета прямого звука

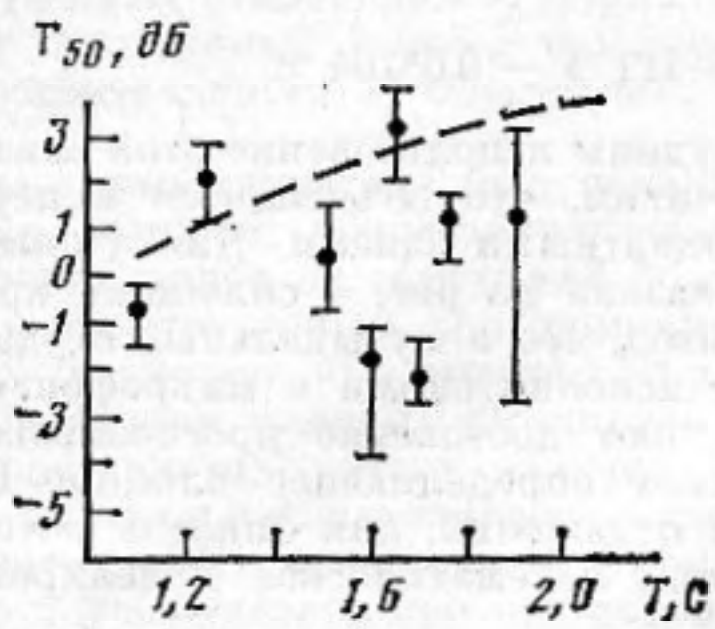

Рис. 3

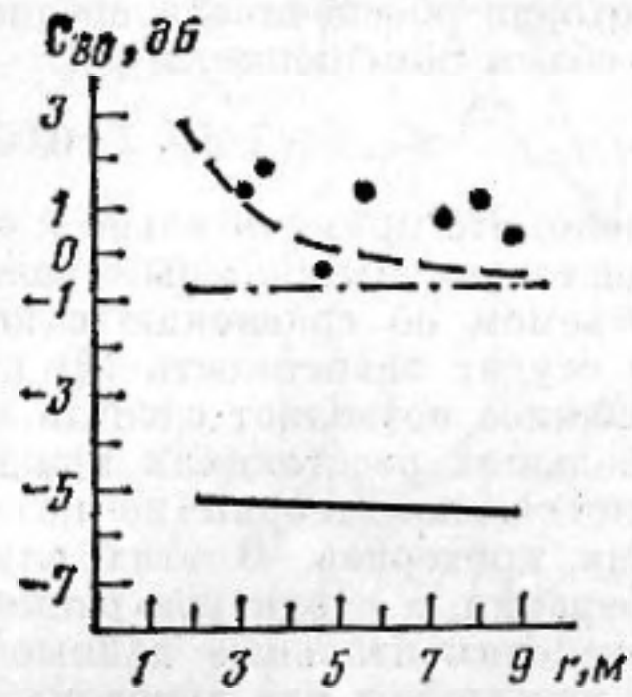

Рис. 4

Рис. 3. Зависимость индекса гулкости от времени реверберации без учета прямого звука

Рис. 4. Зависимость индекса ясности от расстояния между источником и приемником звука для малой музыкальной студии

поступал на электронный ключ, а затем через АЦП – на цифровое устройство, осуществляющее операции возведения в квадрат и интегрирования, с цифровой индексацией результата. Каждый импульсный отклик воспроизводился магнитофоном 3 раза при последовательной установке электронного ключа на время 50, 80 и 500 мс, что позволяло получать необходимые для расчета ЭК величины E_{50}, E_{80} и E_{500}. Возможность использования E_{500} вместо всей энергии отклика студии E_∞ подтверждалось предварительными экспериментами, показавшими, что при $T \leqslant 2$ с подавляющая часть энергии отклика содержится в интервале до 500 мс.

Результаты измерений представлены на рис. 1—3, где вертикальные отрезки соответствуют разбросу значений ЭК при разных положениях источника и микрофона в студии, а черные кружки отмечают усредненные значения. Очевидно, что приведенные в столбце 4 таблицы расчетные формулы преобразуются в соответствующие выражения столбца 3 при $r \gg r_h$. Для реально используемых в музыкальных студиях значений T вычисленные по формулам столбцов 3 и 4 ЭК будут отличаться друг от друга менее чем на 0,5 дБ при $r \geqslant (4—5)\, r_h$. Последнее противоречит принятой сту-

Критерий	Определение	Расчетные соотношения	
Индекс ясности C_{80}	$10 \lg \frac{E_{80}}{E_\infty - E_{80}}$	$10 \lg \frac{1-a}{a}$	$10 \lg \frac{(r_h/r)^2 + 1 - a}{a}$
Индекс четкости D_{50}	$10 \lg \frac{E_{50}}{E_\infty}$	$10 \lg (1-b)$	$10 \lg \frac{(r_h/r)^2 + 1 - b}{(r_h/r)^2 + 1}$
Индекс гулкости Γ_{50}	$10 \lg \frac{E_\infty - E_{50}}{E_{50}}$	$10 \lg \frac{b}{1-b}$	$10 \lg \frac{b}{(r_h/r)^2 + 1 - b}$

дийной практике размещения микрофонов, которые весьма редко удаляют на столь большие расстояния. Исходя из этого можно предположить, что расчет по формулам столбца 3 для C_{80} и D_{50} будет приводить к заниженным, а для Γ_{50} к завышенным величинам по сравнению с результатами измерений, выполненных при типичных для студийной практики расстояний между источниками и приемниками звука. В целом это предположение подтверждается, что следует из рис. 1—3, где штриховые кривые соответствуют расчетам по формулам столбца 3 таблицы.

Для выяснения вопроса о возможности применения учитывающих влияние прямого звука формул статистической теории (столбец 4) при прогнозировании значений ЭК в музыкальных студиях теоретические зависимости $C_{80}(r)$, $D_{50}(r)$ и $\Gamma_{50}(r)$ были сопоставлены с экспериментальными данными. Проведенный анализ показывает, что хотя в этом случае отличие измеренных и вычисленных величин ЭК оказывается не столь значительным, как при расчете по формулам столбца 3, но все же не отмечается устойчивого хорошего совпадения теоретических и экспериментальных данных. В качестве примера на рис. 4 показаны черными кружками измеренные величины индекса ясности в одной из малых музыкальных студий. Штрихпунктирная кривая показывает зависимость $C_{80}(r)$, вычисленную по формуле столбца 4, а штриховая линия отмечает постоянное значение D_{80}, полученное по формуле столбца 3, для соответствующего этой студии времени реверберации.

Тот факт, что измеренные значения C_{80} превышают вычисленные по формулам статистической теории величины, уже отмечался применительно к полученным в пяти залах результатам [2]. В той же работе была предложена эмпирическая зависимость, которая обеспечивала среднеквадратическую ошибку при определении в 1,05 дБ (V — объем помещения, м^3)

$$C_{80}=-3{,}499\ T+0{,}0001411\ V-0{,}08204\ r. \qquad (2)$$

Установлено, что применительно к студиям использование этой зависимости приводит к существенно заниженным величинам, что объясняется в первую очередь их малым объемом по сравнению с концертными залами. Для упомянутой малой музыкальной студии зависимость (2) показана на рис. 4 сплошной кривой.

Вышесказанное позволяет сделать вывод, что в музыкальных студиях при сравнительно небольших расстояниях между исполнителями и микрофонами известные методы статистической теории не позволяют достоверно прогнозировать значения энергетических критериев. В этих случаях определяющее влияние оказывает не время реверберации, а структура ранних отражений, для анализа которой надо использовать экспериментальные данные или математическое моделирование по методу мнимых источников или лучевому.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Рейхардт В.* Акустика общественных зданий. М.: Стройиздат, 1984. С. 198.
2. *Bradley J. S.* Auditorium acoustics measures from pistol shots // J. Acoust. Soc. Amer. 1986. V. 80. № 1. P. 199—205.
3. *Jordan V. L.* Acoustical criteria for concert hall stages // Applied Acoustics. 1982. V. 15. № 5. P. 321—328.

Всесоюзный научно-исследовательский институт телевидения и радиовещания

Поступило в редакцию 13.XI.1987

УДК 616.28—072+534.1.13

РЕЗОНАНСНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОЛОВЫ ЧЕЛОВЕКА И СЛУХОВЫЕ ПОРОГИ ПО КОСТНОМУ ПРОВЕДЕНИЮ

Тигранян Р. Э., Шорохов В. В.

Снимались аудиограммы слуховых порогов по костному проведению в диапазоне частот 4—12 кГц с шагом 200 Гц.

Показано, что аудиограммы для каждого испытуемого имеют сугубо индивидуальный характер. В то же время все аудиограммы имеют безусловное сходство. Сходство состоит в наличии чередующихся подъемов и спадов чувствительности, а различие — в положении экстремумов на оси частот и их относительной величине. Вид пороговых кривых может быть интерпретирован как результат их формирования под влиянием резонансных свойств костей черепа и головы как целого.

Задача об определении резонансных характеристик головы человека обычно ставится в приложении к моделированию условий защиты от механических повреждений. Однако во всех работах, как теоретических, так и экспериментальных, как правило, исследуются объекты, существенно отличные от реального прототипа. Первые, в качестве модели, рассматривают замкнутые сферические оболочки разной жесткости, заполненные жидкостью [1, 2], объектом экспериментаторов являются в лучшем случае сухие черепа [3, 4]. Есть также и аудиометрические исследования, в которых резонансами названы аномалии в скорости распространения звуковой