

Вестник МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 6 — 1971

УДК 534.64

И. В. ЛЕБЕДЕВА, А. А. ШКОЛЬНИКОВА

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕВЕРБЕРАЦИОННОГО ПОЛЯ В СТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ

Проведено исследование степени пространственной однородности звукового поля в реверберационной камере МГУ в диапазоне частот от 100 до 4000 гц с различными типами сигналов. Проведены измерения диффузного коэффициента звукопоглощения резонансного звукопоглотителя методом интенсивностей с различными полосами шума и проведено сравнение результатов с данными реверберационного метода при тех же сигналах.

Звуковое поле в реверберационной камере даже при осуществлении всех мер, способствующих улучшению диффузности, неоднородно по пространству, причем степень неоднородности зависит от типа возбуждающего сигнала. В последнее время опубликовано несколько статей [1, 2, 3, 4, 6] в основном теоретического характера, посвященных исследованию статистических свойств реверберационных звуковых полей. В настоящей работе проведена экспериментальная проверка положений теории [1, 2, 3], имеющих значение для усовершенствования методики реверберационных измерений.

Статистические законы управляют параметрами звукового поля в замкнутом объеме при условии некогерентности сигналов, приходящих в одну точку, и на частотах, при которых накладывается достаточное количество нормальных мод помещения. Эти требования определяют нижнюю граничную частоту. Ограничение в области высоких частот обусловлено возрастанием поглощения звука в воздухе. Необходимо, чтобы реверберационный звук преобладал над прямым звуком от источника.

Ватерхауз [1] показал, что при возбуждении поля в камере чистым тоном или мультитоном, содержащим компоненты равной амплитуды, закон пространственного распределения среднеквадратичного давления может быть описан χ -распределением с $2M$ степенями свободы $\chi(x, M, 1/M)$, где M — число компонентов мультитона, x — среднеквадратичное давление $p^2(\omega)$, нормированное к среднему значению $\langle p^2\omega \rangle$, принятому за единицу. Функция плотности вероятности этого распределения имеет вид

$$P(x) = M^M x^{M-1} e^{-Mx} / (M-1)!,$$

$P(x)$ включает в себя все случаи, начиная с экспоненциального закона $P(x) = e^{-x}$ при $M=1$ и вплоть до нормального закона распределе-

ния при больших значениях M . При этом нормированная дисперсия среднеквадратичного давления изменяется обратно пропорционально M : $v^2 = 1/M$.

В простейшем случае сигнала единичной частоты ($M=1$) $v^2=1$, т. е. пространственные флуктуации уровня звукового давления очень велики. Используя M частотных компонентов равной амплитуды, можно в M раз повысить точность измерений при условии, что все компоненты создают статистически независимые поля. Согласно теории Шредера [3], мерой корреляции двух сигналов, отличающихся по частоте на Δf , является функция автокорреляции $\rho(\Delta f) = [1 + (\Delta f/B)_0^2]^{-1/2}$, зависящая только от отношения разницы частот к ширине полосы моды помещения B_0 . Сигналы будут независимы при условии $\Delta f/B \gg 1$ (при этом $\rho(\Delta f) \rightarrow 0$).

Усреднение по набору частот можно заменить усреднением по набору точек в пространстве. Чтобы получить статистически независимые измерения, нужно выбрать точки, удаленные друг от друга на расстояния, превышающие $\lambda/2$ (λ — длина волны средней частоты измерительного сигнала). В том случае, когда производится усреднение и по частоте и по пространству, параметр M представляет собой произведение $M=R \cdot L$, где R — число независимых частот, L — число независимых точек.

При возбуждении поля полосой белого шума шириной B Лубман [2] предложил в качестве параметра M брать величину $M \approx 1 + BT_0/6,9$. (T_0 — время реверберации в пустой камере.) Соотношение выполняется с большой степенью точности при $BT_0 \gg 20$, что легко реализуется в реверберационных камерах. M определяет число эквивалентных тонов, которые дают ту же дисперсию, что и данная полоса шума.

Статистические свойства реверберационного поля в стационарном режиме изучались нами в реверберационной камере МГУ, имеющей объем 217 м^3 [5]. Было выбрано такое расположение двух озвучивающих камеру громкоговорителей, которое обеспечивает приблизительно одинаковый средний уровень звукового давления во всех частях камеры. Из-за высокой добротности ширина полосы собственных колебаний камеры на низких частотах составляет доли герца и приближается к 1 гц на самых высоких частотах. Поэтому, несмотря на большую плотность нормальных мод, условия статистического возбуждения (наложения мод) выполняются начиная приблизительно с 400 гц , т. е. только выше этой частоты в камере можно ожидать хорошего согласия эксперимента с выводами статистической теории.

Измерения звукового давления производились в объеме камеры ненаправленным микрофоном, как правило, в ста точках, достаточно удаленных друг от друга, от граничных поверхностей и от источника звука. По измеренным значениям $p^2(\omega)$ определялось среднее значение $\langle p^2\omega \rangle$, а затем все значения нормировались к среднему, принятому за единицу. Группировка полученных величин $x = p^2(\omega) / \langle p^2\omega \rangle$ по достаточно узким интервалам значений дает число m попаданий x в эти интервалы, а отношение m/n (где n — полное число измерений) определяет вероятность получения этих значений при измерениях. Суммирование числа значений x , имеющих величину, меньшую или равную заданному значению x , дает интегральный закон распределения $F(x) = P[p^2(\omega) \leq x]$. Так как измерения производились в конечном числе точек, экспериментальная кривая для $F(x)$ имеет ступеньки, размер которых зависит также от способа обработки опытных данных.

Было выбрано такое количество измерительных точек и такие интервалы суммирования, которые обеспечивают необходимую точность. Чтобы исключить ошибку, вызванную попаданием отдельных больших значений в неполный статистический ансамбль, применялся графический способ уточнения среднего значения по сдвигу интегральной кривой, полученной из эксперимента, относительно теоретически рассчитанной. Разброс среднеграфических значений, определенных таким образом для 100, 50 и 25 точек из одного и того же ансамбля, всегда оказывается меньше, чем разброс среднеарифметических значений.

На рис. 1 представлен график теоретически рассчитанной интегральной функции распределения $F(x)$ для $M=1, 2$ и 5 (здесь и дальше изображена гладкой кривой), и нанесены экспериментальные значения для $f=500$ гц (здесь и дальше — ступенчатая функция). Между пунктир-

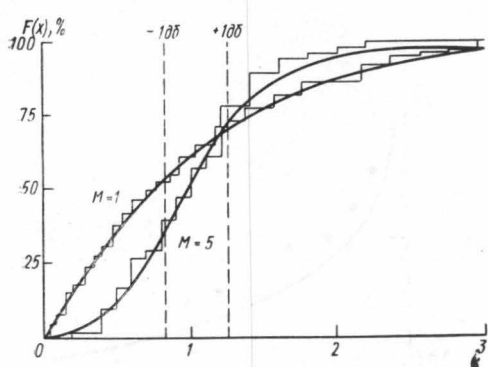


Рис. 1. Интегральный закон распределения $x = \frac{p^2(\omega)}{\langle p^2\omega \rangle}$ в камере при возбуждении поля чистым тоном частотой 500 гц ($M=1$) и мультитоном ($M=5$)

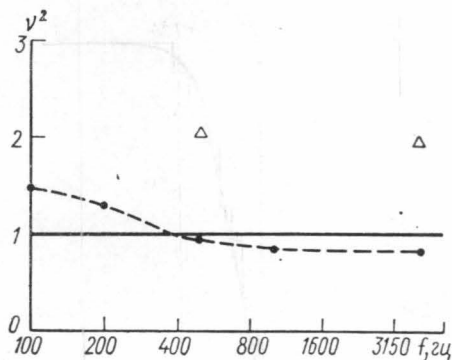


Рис. 2. Значения нормированной дисперсии, измеренные на чистых тонах ($M=1$, $v^2=1$): — теория, • — реверберационная камера, Δ — помещение лаборатории

ными прямыми заключены значения x , лежащие в пределах ± 1 дб от среднего значения. При измерении с чистым тоном ($M=1$) вероятность получить эти значения в одной произвольно выбранной точке составляет всего лишь 16%. Нормированная дисперсия, подсчитанная для этого случая из эксперимента: $v^2 = 0,98$ ($v^2_{\text{теор}} = 1$).

Измерения с чистым тоном на других частотах с такой же точностью подтверждают теоретические расчеты, и только на самых низких частотах (100, 200 гц), где не выполняются условия наложения мод, расхождение несколько увеличивается. На этих частотах нормированная дисперсия заметно превышает 1. На рис. 2. показано изменение v^2 с частотой, полученное в реверберационной камере МГУ (точки на графике). Каждая точка получена как среднее из нескольких независимых ансамблей измерений. Нормированная дисперсия экспериментальных данных на средних частотах (500 гц) мало отличается от 1. Заниженные по сравнению с теорией значения v^2 на высоких частотах можно частично отнести за счет усредняющего действия микрофона, который уже нельзя считать точечным по сравнению с пространственной неоднородностью поля. Кроме того, даже при использовании чистого тона, на высоких частотах за счет высокой плотности собственных мод помещения происходит возбуждение соседних мод с амплиту-

дами, несколько меньшими, чем у основной частоты. Оценка вклада этих мод по формуле Лубмана [2] показывает, что размер пространственных флуктуаций уменьшается. Здесь же для сравнения приведены результаты измерений на двух частотах (500 и 4000 гц) в помещении лаборатории в условиях недиффузного поля (треугольники на рис. 2). Значение нормированной дисперсии там достигает двух. Следовательно, статистика поля в стационарном режиме может служить критерием пригодности помещения для реверберационных измерений. Нормированная дисперсия более чувствительна к изменению свойств поля, чем интегральная кривая распределения. При переходе от $M=1$ к $M=2$ ход $F_2(x)$ изменяется не очень существенно, в то время, как v^2 уменьшается в два раза.

Измерения с мультитоном затрудняются, потому что необходимо обеспечить равную среднюю плотность звуковой энергии в объеме ка-

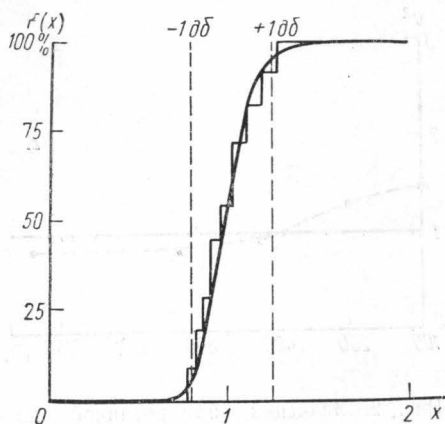


Рис. 3. Интегральный закон распределения $x = \frac{p^2(\omega)}{\langle p^2(\omega) \rangle}$ при возбуждении поля мультитоном с 5 компонентами при усреднении по 10 точкам ($M=50$)

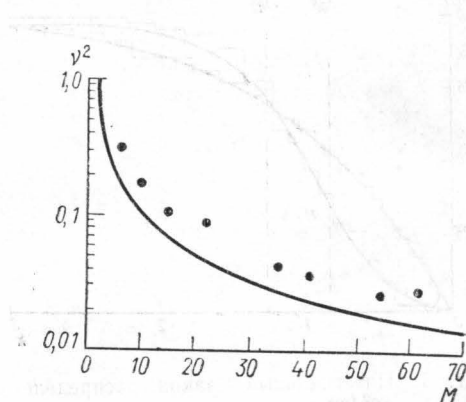


Рис. 4. Нормированная дисперсия как функция параметра M для 3-процентных полос белого шума (—теория, •—эксперимент). $v^2=0,46$ при $M=2$ ($v^2_{\text{теор}}=0,50$) и $v^2=0,18$ при $M=5$ ($v^2_{\text{теор}}=0,20$)

меры для каждого компонента в отдельности. Нами были проведены измерения с мультитоном, со средней частотой 500 гц, содержащим 2 и 5 компонентов. Частотный интервал между компонентами составлял 10 гц. В камере МГУ эти компоненты создают статистически независимые поля, так как отношение $\Delta f/B_0=42$. Результаты измерений с мультитоном, содержащим 5 компонентов, в сравнении с теоретическими кривыми приведены на графике 1. Как видим, теория хорошо подтверждается экспериментом. Нормированная дисперсия в этих измерениях достаточно хорошо совпадает с расчетом.

Точность среднего значения, полученного по измерениям в нескольких точках, повышается пропорционально числу измерений. Это подтверждается экспериментальными данными, представленными на рис. 3. Результаты измерений с мультитоном, содержащим 5 компонентов, рассмотренные выше, были использованы для расчета усредненных по 10 точкам значений $\langle p^2(\omega) \rangle$. Распределение этих усредненных значений подчиняется закону, соответствующему $M=50$. Как видно из графика, при таком методе измерений вероятность получить значение $p^2(\omega)$, лежащее в пределах ± 1 db от среднего значения, составляет уже 90%.

Стандартная методика реверберационных измерений предполагает использование $1/3$ октавных полос белого шума, создающих в камере достаточно однородное поле и позволяющих с большей или меньшей точностью проследить частотную зависимость исследуемого явления. Однако в некоторых случаях представляет интерес производить измерения с более узкими частотными полосами.

Нами были использованы фильтры с постоянной относительной полосой пропускания в $1/3$ октавы и в 3% от основной частоты. Последний случай более интересен для статистических измерений. Действительно, для $1/3$ -октавной полосы шума на частоте 500 гц ожидаемое значение нормированной дисперсии $v^2=0,007$, а значение стандартной девиации, рассчитанное по формуле Шредера [3], составляет $\approx 0,35$ дб, т. е. флуктуации уровня звукового давления в камере практически незаметны.

Измерения пространственного распределения среднеквадратичного давления производились в диапазоне частот от 100 до 4000 гц. Для 3-процентных полос шума при этом получается широкий спектр значений M , начиная от $M=6$ на частоте 100 гц и $M=61$ на частоте 2500 гц, (расчет сделан для идеальной полосы пропускания). На рис. 4 показан ход изменения нормированной дисперсии в зависимости от значения M , и нанесены экспериментальные точки, соответствующие измерениям на разных частотах. Они все оказались выше теоретической кривой. Из этих данных можно определить эквивалентную полосу пропускания фильтра $B_{\text{ЭКВ}} \approx 6,9(1/v^2-1)/T_0$. На

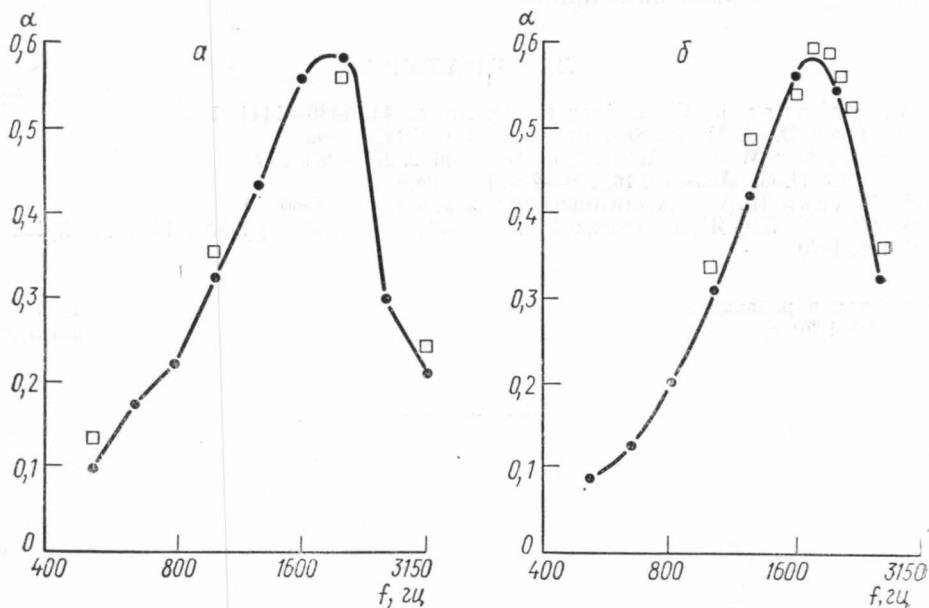


Рис. 5. Коэффициенты звукопоглощения резонансной конструкции, измеренные двумя способами с разными измерительными сигналами: *a* — $1/3$ -октавные полосы белого шума, *б* — 3-процентные полосы белого шума (● — реверберационный метод, □ — метод интенсивностей)

всех частотах у использованного нами фильтра с 3-процентной полосой пропускания $B_{\text{ЭКВ}}$ оказалось на 30—40% уже идеальной полосы. Поэтому полученные из опыта значения $v_{\text{ЭКСП}}^2$ приблизительно на такую же величину превышают рассчитанные значения v^2 .

Проведенные исследования позволили с иной точки зрения подойти к использованию давно известного, но считавшегося недостаточно точным, сравнительного метода интенсивностей для определения коэффициента звукопоглощения α . Этим методом с полосами шума шириной в $1/3$ октавы и 3% от основной частоты были произведены измерения α -образца однослойного резонансного звукопоглотителя, максимум поглощения которого лежит приблизительно в области частот 1250—2500 гц. Средняя интенсивность звукового поля в пустой камере и камере с образцом определялась по измерениям в 50-ти точках. В процессе измерения контролировалось постоянство выходного напряжения генератора, питающего источники звука в камере. Для сравнения поглощение тех же образцов измерялось реверберационным методом. Результаты измерений представлены на рис. 5. Видно, что оба метода дают хорошо совпадающие значения α . В области резонанса относительная погрешность полученных значений α составляет: а) при измерениях с $1/3$ -октавными полосами шума — 4% для реверберационного метода и 5% для метода интенсивностей; б) для измерений с 3-процентными полосами шума соответствующие значения равны 13 и 15%.

Таким образом, в реверберационной камере можно производить измерения коэффициентов звукопоглощения, звукоизоляции и пр. с узкополосными сигналами, причем описанные в настоящей работе эксперименты позволяют выбрать такие условия, при которых достигается желательная точность результатов.

Авторы приносят благодарность проф. С. Н. Ржевкину за интерес к работе и полезные замечания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Waterhouse R. V. J. Acoust. Soc. Amer., 43, 1436—1444, 1968.
2. Lubman D. J. Acoust. Soc. Amer., 44, 1491—1502, 1969.
3. Schroeder M. R. J. Acoust. Soc. Amer., 46, 2, 277—283, 1969.
4. Andres H. G. Acustica, 16, 279—294, 1965/1966.
5. Лебедева И. В. «Акустический журнал», 6, вып. 3, 1960.
6. Барон С. Б., Янпольский А. А. «Акустический журнал», 16, вып. 2, 192—198, 1970.

Поступила в редакцию
4.9 1970 г.

Кафедра
акустики