

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ И РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТА ДИФРАКЦИИ  
МИКРОФОНОВ*А. Н. Ривин, В. А. Чернак*

Описан новый метод экспериментального определения и расчета коэффициента дифракции для конденсаторных измерительных микрофонов. Способ измерения основан на непосредственном определении отношения напряжений, возникающих на выходе микрофона при работе однотипного с ним излучателя в свободном поле и в замкнутой камере малого объема, и позволяет определить коэффициент дифракции с требующейся при выполнении градуировок образцовых микрофонов по полю точностью 2%. Приведенные в работе расчетные соотношения и графики позволяют при расчетах коэффициента дифракции принять во внимание наличие неравномерного распределения звуковых давлений на мембране и учесть при выполнении расчетов соотношение диаметров мембраны и корпуса микрофона.

Принятые в настоящее время в большинстве стран эталонные установки позволяют производить градуировку образцовых измерительных микрофонов по давлению в широком диапазоне частот от 20 гц до 20 кгц с погрешностью, не превышающей 0,1—0,2 дб [1, 2].

Высокую точность градуировки измерительных микрофонов по давлению не удается, однако, полностью использовать при испытании электрических приборов в свободном поле из-за отсутствия надежного способа определения соотношения между чувствительностью микрофона по полю и его чувствительностью по давлению. Это отношение называют обычно коэффициентом дифракции микрофона.

Используемые в настоящее время способы косвенного определения коэффициента дифракции, основанные на отдельной абсолютной градуировке микрофона по полю и по давлению [3], либо на результатах исследований распределения давления на поверхности мембраны микрофона [4], позволяют определить коэффициент дифракции с погрешностями, не меньшими, чем 0,5—1 дб. Такие же погрешности дает способ, описанный в 1955 г. в работе Шпандока [5], при котором коэффициент дифракции конденсаторного микрофона определяется путем измерения колебательных смещений его мембраны в режиме излучения.

При определении коэффициента дифракции расчетным путем также возникают значительные затруднения, связанные с тем, что точное решение задачи о дифракции звука на торце цилиндра не доведено до расчетных соотношений.

При выполнении расчетов обычно предполагают, что рассеяние звука цилиндрическим микрофоном мало отличается от рассеяния звука сферой и используют для приближенного расчета соотношения, полученные Рэлеем [6] и другими авторами [7, 8] для случая рассеяния звука сферой. Примером такого подхода к решению этой задачи может служить расчет чувствительности конденсаторного микрофона, приведенный в книге Морза [9]. На возникающие при этом значительные, достигающие до 2—3 дб, неточности указано в работах Сивиана, О'Нейла [10] и Мюллера, Блока, Девиса [11].

Наглядным примером затруднений, возникающих из-за отсутствия надежных методов определения коэффициента дифракции, может служить измерительный микрофон, выпускаемый фирмой LEA во Франции. Разме-



ры корпуса этого микрофона, с целью придания ему сферической формы, соответствующей известным расчетным соотношениям, увеличены более чем в два раза по сравнению с размерами капсуля.

С целью устранения этого затруднения нами разработан новый способ экспериментального определения коэффициента дифракции, основанный на измерении отношения напряжений, возникающих на выходе микрофона при работе однотипного с ним излучателя в свободном поле и в замкнутой камере малого объема. Для определения коэффициента дифракции этим способом необходимо иметь два однотипных измерительных микрофона, один из которых используется в качестве излучателя, для чего на его капсулю подается напряжение от генератора. Излучатель и приемник устанавливаются вначале в свободном поле на расстоянии ( $d$ ) друг от друга, а затем в замкнутой камере малого объема ( $V$ ) и измеряют отношение напряжений, возникающих на выходе приемника при первом и втором опыте —  $(E_{\Pi}/E_{\text{К}})$ . Связь между измеренным таким образом отношением напряжений и коэффициентом дифракции микрофона можно найти, если учесть, что напряжения пропорциональны чувствительностям приемника и излучателя по полю ( $M'$  и  $S^0$ ) и по давлению ( $\rho'$  и  $K^0$ ), а также току в цепи излучателя ( $i_{\Pi}^0$  и  $i_{\text{К}}^0$ ).

$$\frac{E_{\Pi}}{E_{\text{К}}} = \frac{M' S^0 i_{\Pi}^0}{\rho' K^0 i_{\text{К}}^0}. \quad (1)$$

Используя соотношения взаимности для свободного поля и для замкнутой камеры, имеющей размеры, малые по сравнению с длиной волны

$$\frac{M^0}{S^0} = \frac{4\pi d}{\rho \omega}; \quad \frac{\rho^0}{K^0} = \frac{\omega V}{\rho c^2},$$

выражение (1) можно записать в таком виде:

$$\frac{E_{\Pi}}{E_{\text{К}}} = \frac{\pi V c^2}{d f^2} \frac{i_{\Pi}^0}{i_{\text{К}}^0} D' D^0, \quad (2)$$

где  $D' = M'/\rho'$  и  $D^0 = M^0/\rho^0$  — коэффициенты дифракции первого и второго микрофонов,  $c$  — скорость звука,  $f$  — частота. Выражение (2) можно упростить, если учесть, что, во-первых, приемник и излучатель имеют одинаковую форму и размеры, а следовательно, и равные коэффициенты дифракции —  $D' = D^0 = D$ , и, во-вторых, при измерениях в свободном поле и в замкнутой камере в цепи излучателя можно поддерживать один и тот же ток  $i_{\Pi}^0 = i_{\text{К}}^0$ . Соотношение для расчета коэффициента дифракции в этом случае будет иметь вид:

$$D = \frac{c}{f} \sqrt{\frac{d}{\pi V} \frac{E_{\Pi}}{E_{\text{К}}}}. \quad (3)$$

Полученное таким образом сравнительно простое соотношение позволяет свести определение коэффициента дифракции к непосредственному измерению отношения двух напряжений и определить его с большей, чем это делалось ранее, точностью. Следует отметить, что повышение точности достигается не только благодаря замене абсолютных измерений чувствительности по полю и по давлению измерением отношения напряжений, но и вследствие значительного уменьшения погрешностей, возникающих обычно из-за воздействия на приемник отраженных волн.

Используя при определении коэффициента дифракции только измерительные микрофоны, имеющие значительно меньшие размеры, чем обычно применяемые при градуировках вспомогательные излучатели и обратимые преобразователи, можно значительно (пропорционально квадрату



размеров преобразователей) уменьшить расстояние между излучателем и приемником и снизить тем самым влияние отраженных волн.

Перейдем к рассмотрению вопроса о расчете коэффициента дифракции. При расчете коэффициента дифракции конденсаторных микрофонов обычно применяют [12] расчетные соотношения и графики, приведенные в цитированной ранее работе Мюллера, Блека и Дэвиса и характеризующие увеличение звукового давления в центральной точке торца цилиндра. При таких расчетах могут получаться значительные ошибки из-за того, что среднее значение давления на мембране микрофона, занимающей значительную часть поверхности торца цилиндра, отличается от давления в центральной точке. Закон распределения давлений на мембране микрофона можно записать в удобном для интегрирования и усреднения виде, используя для этой цели соотношения, полученные Морзом [9] при решении задачи об излучении звука круглым поршнем, в виде разложения в ряд по функциям Бесселя:

$$p(r) = WU_0 \sum_{n=0}^{n=\infty} \xi_n \frac{I_0(\pi\alpha_{0n}r/a)}{I_0(\pi\alpha_{0n})},$$

где  $U_0$  — скорость колебаний поршня,  $a$  — радиус поршня,  $W$  — волновое сопротивление среды,  $\xi_n = \theta_n + j\chi_n$  — коэффициенты разложения в ряд,  $\alpha_{0n}$  — корни уравнения  $d/d\alpha I_0(\pi\alpha) = 0$ . Это соотношение можно использовать для определения давлений, создаваемых рассеянными волнами на поверхности торца цилиндра, если скорость колебаний поршня положить равной колебательной скорости в падающей волне. При нормальном падении плоской звуковой волны эта скорость равна:  $U_0 = P_0/W$ . Действующее на мембрану микрофона давление равно сумме давлений, создаваемых падающей и рассеянными волнами. После усреднения по поверхности мембраны выражение для определения этого давления можно записать в таком виде:

$$P_{cp} = \frac{2\pi \int_0^R [p_0 + p(r)] r dr}{\pi R^2} =$$

$$= p_0 \left[ 1 + \theta_0 + j\chi_0 + \frac{2}{m\pi} \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{(\theta_n + j\chi_n) I_1(m\pi\alpha_{0n})}{\alpha_{0n} I_0(\pi\alpha_{0n})} \right],$$

где  $m$  — отношение радиусов мембраны ( $R$ ) и корпуса микрофона ( $a$ ). Выражение для расчета коэффициента дифракции при этом будет иметь вид:

$$D = \left| \frac{P_{cp}}{P_0} \right| =$$

$$= \sqrt{\left[ 1 + \theta_0 + \frac{2}{m\pi} \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{\theta_n I_1(m\pi\alpha_{0n})}{\alpha_{0n} I_0(\pi\alpha_{0n})} \right]^2 + \left[ \chi_0 + \frac{2}{m\pi} \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{\chi_n I_1(m\pi\alpha_{0n})}{\alpha_{0n} I_0(\pi\alpha_{0n})} \right]^2}.$$

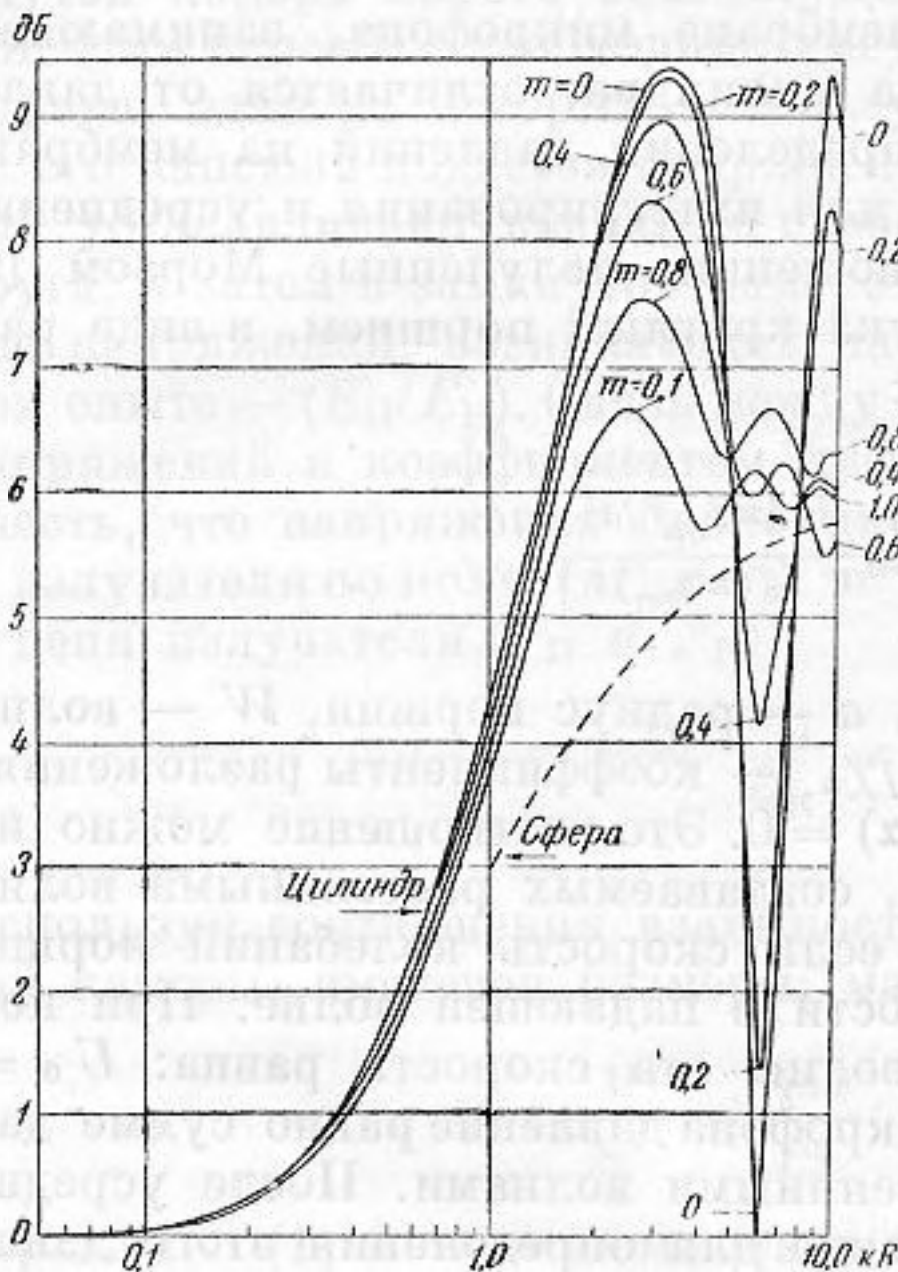
Значения коэффициента дифракции цилиндрического микрофона, рассчитанные для различных значений отношения радиусов мембраны и корпуса микрофона, приведены на фиг. 1. При  $m < 0,2$  значения  $D$  соответствуют значениям, полученным в работе [11] для центральной точки. При  $m$ , близком к единице, что соответствует мембране, занимающей всю поверхность торца цилиндра, значения  $D$  для  $kR > \pi$  приближаются к двум (6 дб), аналогично тому, как это получается для сферического микрофона, значения коэффициента дифракции которого приведены на этой же фигуре по данным, заимствованным из работы [8].



Сопоставление приведенных на фиг. 1 кривых для цилиндра и сферы наглядно показывает, что не только в случае центральной точки, но и для мембраны микрофона, занимающей большую часть поверхности торца цилиндра, значения коэффициента дифракции могут значительно (на 2–4 дб) отличаться от значений, рассчитанных для сферы.

Таким образом, применение при расчетах коэффициента дифракции, полученных выше расчетных соотношений, взамен соотношений, полученных ранее для случая сферы и центральной точки торца цилиндра, позволяет избежать ошибок, которые делаются обычно при расчетах дифракционных поправок для микрофонов.

Описанные выше методы измерения и расчета были использованы при определении коэффициента дифракции измерительного конденсаторного микрофона типа МИК-5 и измерительного конденсаторного микрофона типа 4111 фирмы Брюель и Кьяр. Капсюль микрофона МИК-5 имеет на-



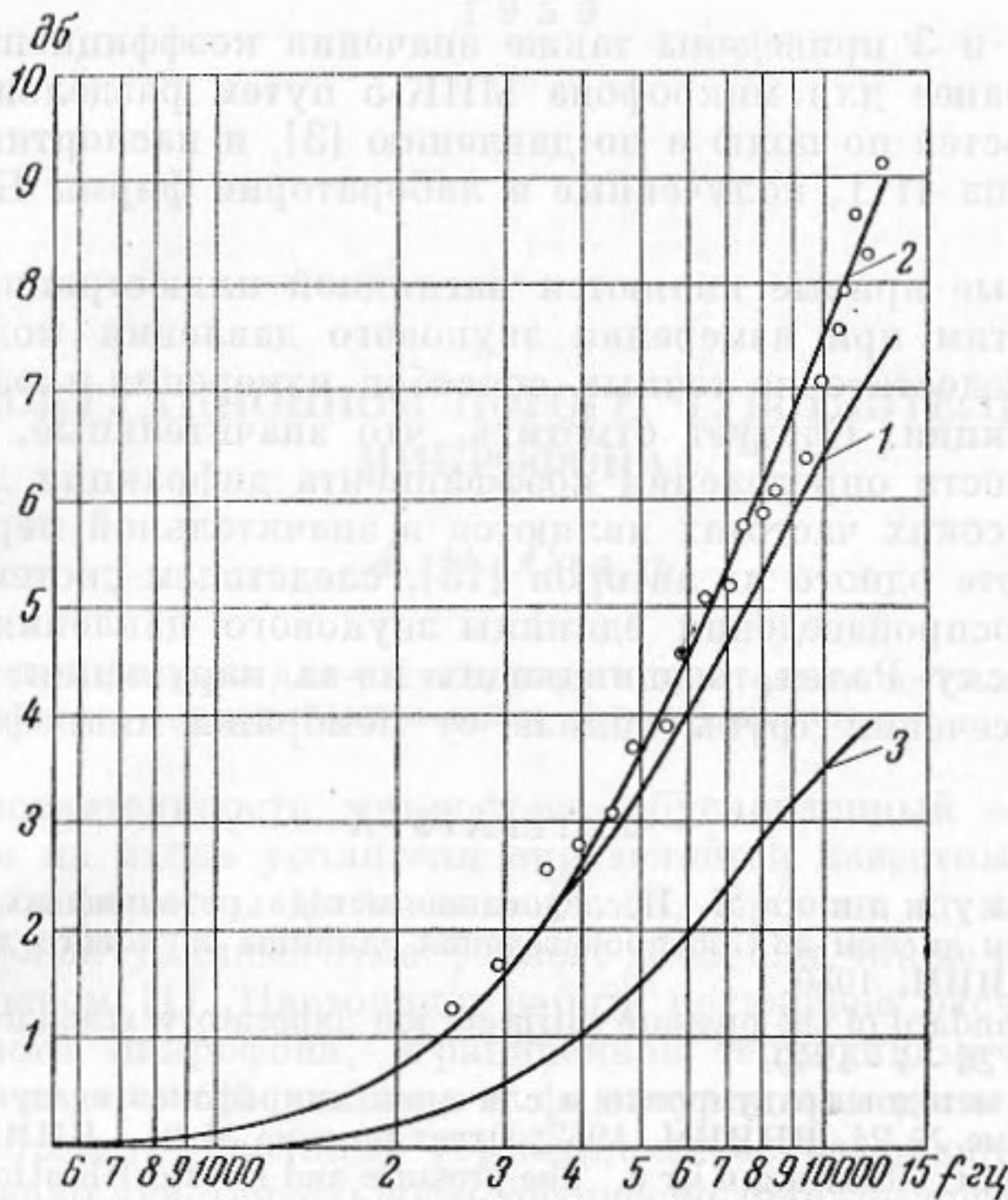
Фиг. 1. Зависимости коэффициента дифракции в дб цилиндрического микрофона и сферы от  $kR = 2\pi R/\lambda$ , рассчитанные для различных отношений  $m$  радиусов мембраны и корпуса микрофона

ружный диаметр 17,5 мм. Его мембрана, имеющая диаметр 11,5 мм, крепится наружным кольцом, создающим спереди полость глубиной 1 мм. Капсюль микрофона типа 4111 имеет диаметр 36 мм. Его мембрана натянута заподлицо с корпусом и имеет диаметр 20 мм.

Измерения производились в обычном незаглушенном лабораторном помещении. Микрофоны крепились на стойке, на высоте 1,7 м над полом и приблизительно на таком же или большем расстоянии от других отражающих звук поверхностей. С целью выяснения степени влияния отраженных волн производились исследования закона убывания напряжения на выходе приемника при удалении его от излучателя. Проведенные измерения показали, что при расстояниях между излучателем и приемником, изменяющихся для микрофона МИК-5 в пределах от 5 до 12 см и для микрофона типа 4111 в пределах от 8 до 18 см, произведение напряжения на расстояние между центрами мембран изменяется не более, чем на  $\pm 0,2$  дб.

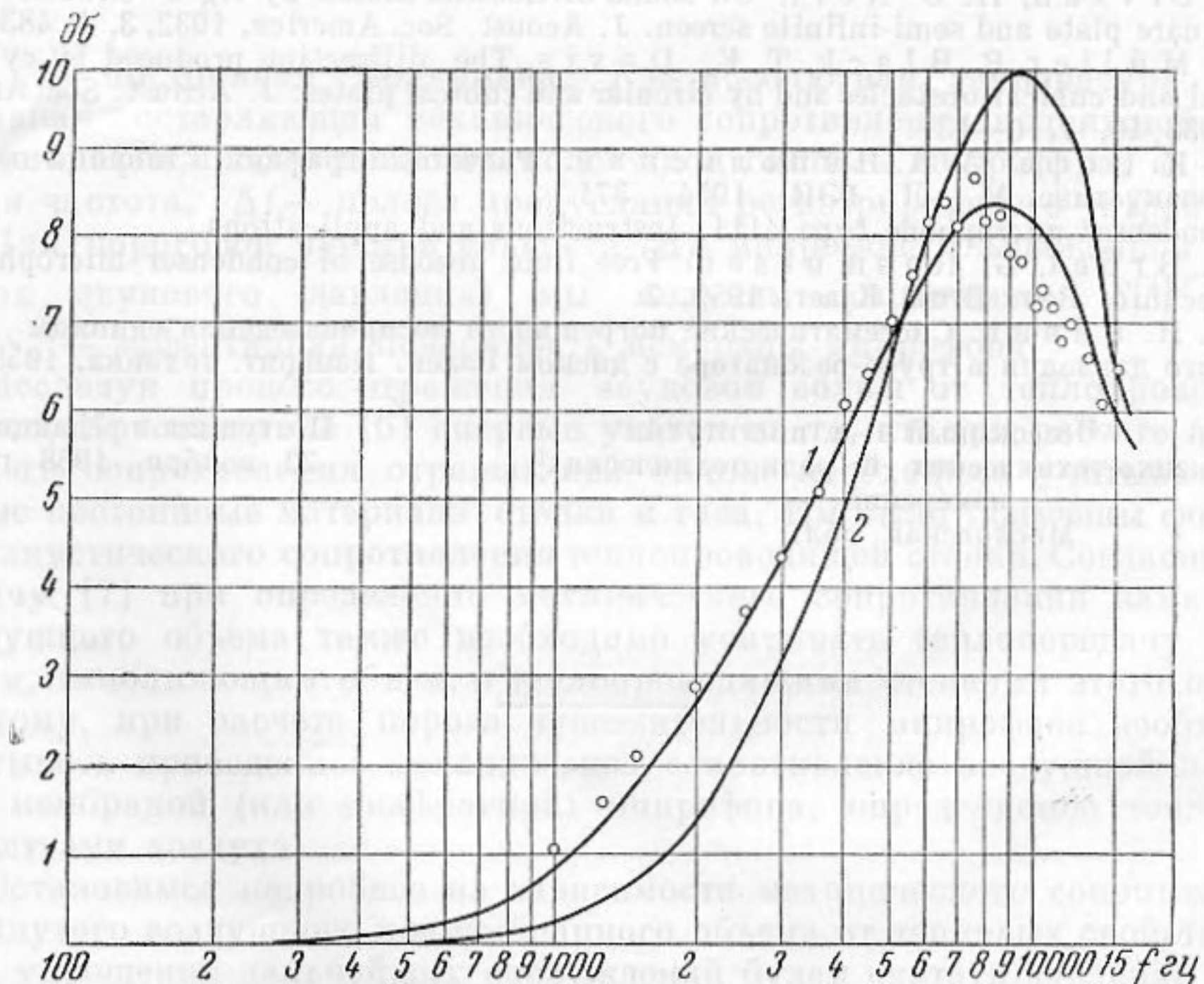
Результаты измерений коэффициента дифракции приведены на фиг. 2 и 3. Для сравнения на этих же фигурах в виде сплошной кривой приведены расчетные значения коэффициента дифракции, полученные из графика фиг. 1. При расчетах коэффициента дифракции для микрофона МИК-5 было учтено наличие полости перед мембраной. Сравнение измеренных значений с расчетными показывает, что различие между ними в случае  $kR < 2,0$  не превышает 0,2 дб. Для значений  $kR > 2,0$  это различие возрастает до 0,5 дб, что может быть объяснено невозможностью при расчете учесть существующие в корпусе микрофона незначительные отклонения от правильной цилиндрической формы. Хорошее совпадение измеренных и рассчитанных значений подтверждает возможность определения коэффициента дифракции описанным выше способом с высокой точностью.





Фиг. 2. Коэффициент дифракции для микрофона МИК-5 при нормальном падении. Кружки — измеренные значения:

1 — значения, рассчитанные для цилиндрического микрофона без полости; 2 — значения, рассчитанные с учетом наличия полости перед мембраной; 3 — значения, полученные путем градуировки микрофона «по полю» и «по давлению» по диску Рэляя



Фиг. 3. Коэффициент дифракции для микрофона типа 4111 при нормальном падении. Кружки — измеренные значения:

1 — расчетные значения; 2 — значения, приведенные в фирменном паспорте



На фиг. 2 и 3 приведены также значения коэффициента дифракции, полученные ранее для микрофона МИК-5 путем отдельных измерений чувствительностей по полю и по давлению [3], и паспортные данные для микрофона типа 4111, полученные в лаборатории фирмы Брюель и Кьяр [13]\*.

Приведенные кривые являются наглядной иллюстрацией того, к каким неточностям при измерении звукового давления может приводить применение недостаточно точных способов измерения и расчета коэффициента дифракции. Следует отметить, что значительные, превышающие 3 дБ, погрешности определения коэффициента дифракции для микрофона МИК-5 на высоких частотах являются в значительной мере, как это показано в работе одного из авторов [15], следствием систематических погрешностей воспроизведения единицы звукового давления в трубе-резонаторе по диску Рэля, возникающих из-за нарушения равномерности внутреннего сечения трубы вблизи от мембраны микрофона.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Н. А. К а л у ж и н о в а. Исследование метода резонансных стоячих волн с звукомерным диском для воспроизведения единицы звукового давления (диссертация). ВНИИМ, 1950.
2. American standard of the pressure calibration laboratory standard pressure microphones, Z - 24 - 4 - 1949.
3. Разработка методов градуировки и сличения микрофонов в звукомерной камере. Отчет по теме № 24, ВНИИМ, 1952; Отчет по теме № 21, ВНИИМ, 1949.
4. A. J. K i n g, C. R. M a g u i r e. The pressure and field calibration of microphones. *Acustica*, 1951, 1, 3, 123—130.
5. F. S p r a n d ö c k. Akustischen Eich — Normalen. *Acustica*, 1955, 5, 4, 197—207.
6. Р э л е й. Теория звука. М., ГТТИ, 1955.
7. S. B a l l a n t i n e. Effect of diffraction around the microphone in sound measurements. *Phys. Rev.*, 1928, 32, 988—992.
8. L. S c h w a r z. Zur Theorie der Beugung einer ebenen Schallwelle an der Kugel. *Akust. Z.*, 1943, 8, 3.
9. Ф. М о р з. Колебания и звук. Л., ГТТИ, 1940, 365—366 и 389—392.
10. J. S i v i a n, H. O' N e i l. On sound diffraction caused by rigid circular plate, square plate and semi-infinite screen. *J. Acoust. Soc. America*, 1932, 3, 4, 483—510.
11. G. M ü l l e r, R. B l a c k, T. E. D a v i s. The diffraction produced by cylindrical and cubical obstacles and by circular and cubical plates. *J. Acoust. Soc. America* 1938, 10, 1, 6—13.
12. В. К. И о ф е, А. А. Я н п о л ь с к и й. Расчетные графики и таблицы по электроакустике. М.—Л., ГЭИ, 1954, 371.
13. Condenser microphone type 4111. Instructions and applications.
14. V. B r ü e l, G. R a s m u s s e n. Free field resonance of condenser microphones. *Technic. Rev. Bruel Kjaer*, 1959, 2.
15. А. Н. Р и в и н. Систематические погрешности воспроизведения единицы звукового давления в трубе-резонаторе с диском Рэля. *Измерит. техника*, 1958, 5.

Всесоюзный н.-и. институт  
физико-технических и радиотехнических  
измерений  
Московская обл.

Поступила в редакцию  
22 ноября 1958 г.

\* Подробные исследования, проведенные Брюель и Расмассеном [14] после ознакомления с разработанным нами методом и приведенными на фиг. 3 результатами, подтвердили правильность полученных нами значений коэффициента дифракции.