ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р МЭК 61094-2— 2011

Государственная система обеспечения единства измерений

МИКРОФОНЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ

Часть 2

Первичный метод градуировки по давлению лабораторных эталонных микрофонов методом взаимности

(IEC 61094-2:2009,
Electroacoustics — Measurement microphones —
Part 2: Primary method for pressure calibration of laboratory standard microphones by the reciprocity technique, IDT)

Издание официальное

Москва
Стандартинформ
2019

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

1 ПОДГОТОВЛЕН Федеральным государственным унитарным предприятием «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений» (ФГУП «ВНИИФТРИ») на основе собственного перевода на русский язык англоязычной версии стандарта, указанного в пункте 4

2 ВНЕСЕН Управлением метрологии Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 13 декабря 2011 г. № 1080-ст

4 Настоящий стандарт идентичен международному стандарту МЭК 61094-2:2009 «Электроакустика. Микрофоны измерительные. Часть 2. Первичный метод градуировки по давлению лабораторных эталонных микрофонов методом взаимности» (IEC 61094-2 Edition 2.0 2009-02 «Electroacoustics — Measurement microphones — Part 2: Primary method for pressure calibration of laboratory standard microphones by the reciprocity technique», IDT).

Наименование настоящего стандарта изменено относительно наименования указанного международного стандарта для приведения в соответствие с ГОСТ Р 1.5—2012 (пункт 3.5).

При применении настоящего стандарта рекомендуется использовать вместо ссылочных международных стандартов соответствующие им национальные стандарты, сведения о которых приведены в дополнительном приложении ДА

5 ВЗАМЕН ГОСТ Р МЭК 61094-2—2001

6 ПЕРЕИЗДАНИЕ. Март 2019 г.

*Правила применения настоящего стандарта установлены в статье 26 Федерального закона от 29 июня 2015 г. № 162-ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации». Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодном (по состоянию на 1 января текущего года) информационном указателе «Национальные стандарты», а официальный текст изменений и поправок — в ежемесячном информационном указателе «Национальные стандарты». В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в ближайшем выпуске ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты». Соответствующая информация, уведомление и тексты размещаются также в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет (*gost.e-ecolog.ru

© Стандартинформ, оформление, 2013, 2019

Настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии

Содержание

1 Область применения . . . 1
2 Нормативные ссылки . . . 1
3 Термины и определения . . . 1
4 Опорные внешние условия . . . 2
5 Принципы градуировки по давлению методом взаимности . . . 2
5.1 Общие принципы . . . 2
5.1.1 Общие сведения . . . 2
5.1.2 Общие принципы при использовании трех микрофонов . . . 2
5.1.3 Общие принципы при использовании двух микрофонов и вспомогательного источника звука . . . 2
5.2 Основные уравнения . . . 3
5.3 Метод замещения напряжения . . . 3
5.4 Определение акустического передаточного импеданса . . . 4
5.5 Поправка на теплопроводность . . . 5
5.6 Поправка на капиллярность трубки . . . 6
5.7 Окончательные уравнения для чувствительности по давлению . . . 6
5.7.1 Метод с использованием трех микрофонов . . . 6
5.7.2 Метод с использованием двух микрофонов и вспомогательного источника звука . . . 6
6 Факторы, влияющие на чувствительность по давлению . . . 7
6.1 Общие сведения . . . 7
6.2 Напряжение поляризации . . . 7
6.3 Стандартная конфигурация заземленного экрана . . . 7
6.4 Распределение давления по мембране . . . 7
6.5 Влияние внешних условий . . . 8
6.5.1 Статическое давление . . . 8
6.5.2 Температура . . . 8
6.5.3 Влажность . . . 8
6.5.4 Переход к опорным внешним условиям . . . 8
7 Составляющие неопределенности градуировки . . . 8
7.1 Общие сведения . . . 8
7.2 Электрический передаточный импеданс . . . 8
7.3 Акустический передаточный импеданс . . . 9
7.3.1 Общие сведения . . . 9
7.3.2 Характеристики камеры связи . . . 9
7.3.3 Параметры микрофона . . . 10
7.4 Несовершенство теории . . . 11
7.5 Неопределенность уровня чувствительности по давлению . . . 11
Приложение А (обязательное) Потери на теплопроводность и вязкое трение в замкнутой полости . . . 13
Приложение В (обязательное) Акустический импеданс капиллярной трубки . . . 16
Приложение С (справочное) Цилиндрические камеры связи, применяемые для градуировки микрофонов . . . 19

Приложение D (справочное) Влияние окружающей среды на чувствительность микрофонов 23
Приложение E (справочное) Методы определения параметров микрофона 25
Приложение F (справочное) Физические свойства влажного воздуха 27
Приложение ДА (справочное) Сведения о соответствии ссылочных международных стандартов национальным стандартам 31

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Государственная система обеспечения единства измерений

МИКРОФОНЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ

Часть 2

Первичный метод градуировки по давлению лабораторных эталонных микрофонов методом взаимности

State system for ensuring the uniformity of measurements. Measurement microphones. Part 2. Primary method for pressure calibration of laboratory standard microphones by the reciprocity technique

Дата введения — 2013—05—01

1 Область применения

Настоящий стандарт:

- распространяется на лабораторные эталонные микрофоны (далее — микрофоны), удовлетворяющие требованиям МЭК 61094-1, и на другие конденсаторные микрофоны, имеющие такие же размеры;
- устанавливает первичный метод определения комплексной чувствительности микрофонов по давлению, позволяющий получить воспроизводимость и необходимую точность при измерении звукового давления.

Все величины выражены в единицах Международной системы единиц (СИ).

2 Нормативные ссылки

Следующие ссылочные стандарты обязательны при использовании настоящего стандарта. Для датированных ссылок применяют только указанное издание. Для недатированных — последнее издание, включая любые дополнения.

IEC 61094-1: 2000 Measurement Microphones — Part 1: Specifications for laboratory standard microphones (Микрофоны измерительные. Часть 1. Микрофоны лабораторные эталонные. Технические требования)

ISO/IEC Guide 98-3, *Uncertainty of measurement — Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)*[1] [Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности в измерении (GUM:1995)]

3 Термины и определения

В настоящем стандарте применены термины и определения по МЭК 61094-1 и ИСО/МЭК Руководству 98-3, а также следующие термины с соответствующими определениями:

[1] ИСО/МЭК Руководство 98-3:2008 — переиздание Руководства по выражению неопределенности в измерениях (GUM) 1995 г.

Издание официальное

3.1 **обратимый микрофон** (reciprocal microphone): Линейный пассивный микрофон, для которого импеданс холостого хода в обратном направлении и передаточный импеданс в прямом направлении равны по абсолютному значению.

3.2 **фазовая чувствительность микрофона по давлению** (phase angle of pressure sensitivity of microphone): Фазовый угол на данной частоте между напряжением холостого хода и равномерно распределенным звуковым давлением, действующим на мембрану.

Примечание — Единица измерения: градус или радиан (...° или рад).

3.3 **электрический передаточный импеданс** (electrical transfer impedance): Для системы из двух акустически связанных микрофонов — это отношение напряжения холостого хода микрофона-приемника к входному току микрофона-излучателя.

Примечание 1 — Единица измерения: ом (Ом).

Примечание 2 — Этот импеданс определяют для конструкции с заземленным экраном, приведенной в 7.2 МЭК 61094-1.

3.4 **акустический передаточный импеданс** (acoustic transfer impedance): Для системы из двух акустически связанных микрофонов — это отношение звукового давления, действующего на мембрану микрофона-приемника, к объемной скорости, воспроизводимой микрофоном-излучателем, в режиме короткого замыкания.

Примечание — Единица измерения: паскаль-секунда на кубический метр (Па · с/м^3).

3.5 **камера связи** (coupler): Устройство, в котором при установленных микрофонах образуется полость определенной формы и размеров и которое служит в качестве элемента акустической связи между микрофонами.

4 Опорные внешние условия

Опорные внешние условия:

- температура:.....23,0 °С;
- статическое давление:.....101,325 кПа;
- относительная влажность:.....50 %.

5 Принципы градуировки по давлению методом взаимности

5.1 Общие принципы

5.1.1 Общие сведения

Градуировка микрофонов методом взаимности может быть выполнена либо с помощью трех микрофонов, два из которых должны быть обратимыми, либо с помощью вспомогательного источника звука и двух микрофонов, один из которых должен быть обратимым.

Примечание — Если один из микрофонов необратим, то он может быть использован только в качестве приемника звука.

5.1.2 Общие принципы при использовании трех микрофонов

Предполагают, что два микрофона акустически соединены через камеру связи. Используя один из них в качестве источника звука, а другой — в качестве приемника, измеряют электрический передаточный импеданс. Если акустический передаточный импеданс такой системы известен, то может быть найдено произведение чувствительностей по давлению двух связанных микрофонов. Используя парные комбинации микрофонов (1), (2) и (3), получают три таких независимых произведения, из которых может быть выведено уравнение для чувствительности по давлению каждого их трех микрофонов.

5.1.3 Общие принципы при использовании двух микрофонов и вспомогательного источника звука

Во-первых, предполагают, что два микрофона акустически соединены между собой с помощью камеры связи. Определяют произведение значений чувствительности по давлению этих микрофонов (5.1.2). Во-вторых, предполагают, что на оба микрофона воздействует одинаковое звуковое дав-

ление от вспомогательного источника звука. Тогда отношение двух выходных напряжений будет равно отношению чувствительностей по давлению этих микрофонов. Таким образом, из произведения и отношения чувствительностей по давлению двух микрофонов может быть определена чувствительность по давлению каждого из двух микрофонов.

Примечание — С целью получить отношение чувствительностей по давлению, допускается использовать метод непосредственного сравнения, а вспомогательным источником звука может быть третий микрофон, механические и акустические характеристики которого отличаются от характеристик градуируемых микрофонов.

5.2 Основные уравнения

Лабораторные эталонные и подобные им микрофоны допускается рассматривать как обратимые, и поэтому система из двух уравнений для этих микрофонов может быть записана в виде

$$\begin{aligned} \underline{z}_{11}\,\underline{i} + \underline{z}_{12}\,\underline{q} &= \underline{U}; \\ \underline{z}_{21}\,\underline{i} + \underline{z}_{22}\,\underline{q} &= \underline{p}, \end{aligned} \qquad (1)$$

где $\underline{p}$ — звуковое давление, равномерно распределенное по мембране микрофона, в паскалях (Па);

$\underline{U}$ — напряжение на электрических контактах микрофона в вольтах (В);

$\underline{q}$ — объемная скорость акустической части (мембраны) микрофона в кубических метрах в секунду ($м^3/с$);

$\underline{i}$ — сила тока, протекающего через электрические контакты микрофона, в амперах (А);

$\underline{z}_{11} = \underline{Z}_e$ — электрический импеданс микрофона при заторможенной мембране в омах (Ом);

$\underline{z}_{22} = \underline{Z}_a$ — акустический импеданс микрофона при ненагруженных электрических контактах в паскаль-секундах на кубический метр ($Па \cdot с \cdot м^{-3}$);

$\underline{z}_{12} = \underline{z}_{21} = \underline{M}_p \cdot \underline{Z}_a$ — передаточный импеданс в обратном и прямом направлениях в вольт-секундах на кубический метр ($В \cdot с \cdot м^{-3}$);

$\underline{M}_p$ — чувствительность микрофона по давлению в вольтах на паскаль ($В \cdot Па^{-1}$).

Примечание — Подчеркнутыми символами обозначены комплексные величины.

Уравнения (1) могут быть переписаны в виде

$$\begin{aligned} \underline{Z}_e\,\underline{i} + \underline{M}_p\,\underline{Z}_a\,\underline{q} &= \underline{U}; \\ \underline{M}_p\,\underline{Z}_a\,\underline{i} + \underline{Z}_a\,\underline{q} &= \underline{p}, \end{aligned} \qquad (1а)$$

которые и представляют собой уравнения взаимности для микрофона.

Предполагают, что микрофоны (1) и (2), имеющие чувствительности по давлению $\underline{M}_{p,1}$ и $\underline{M}_{p,2}$, акустически соединены с помощью камеры связи. Из уравнений (1а) следует, что ток $\underline{i}$, протекающий через электрические контакты микрофона (1), вызовет объемную скорость при коротком замыкании ($\underline{p} = 0$ на мембране) $\underline{M}_{p,1} \cdot \underline{i}_1$ и создаст звуковое давление $\underline{p}_2 = \underline{Z}_{a,12} \cdot \underline{M}_{p,1} \cdot \underline{i}_1$ на акустическом входе микрофона (2), где $\underline{Z}_{a,12}$ — акустический передаточный импеданс системы.

Напряжение холостого хода на микрофоне (2) при этом будет

$$\underline{U}_2 = \underline{M}_{p,2}\,\underline{p}_2 = \underline{M}_{p,1}\,\underline{M}_{p,2}\,\underline{Z}_{a,12}\,\underline{i}_1.$$

Следовательно, произведение чувствительностей по давлению будет

$$\underline{M}_{p,1}\,\underline{M}_{p,2} = (1/\underline{Z}_{a,12})\,(\underline{U}_2/\underline{i}_1). \qquad (2)$$

5.3 Метод замещения напряжения

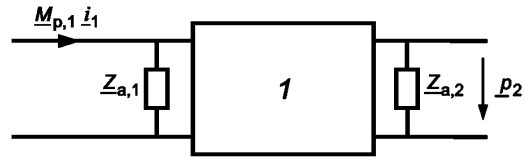
Метод замещения напряжения применяют для определения напряжения холостого хода электрически нагруженного микрофона.

Предполагают, что к микрофону с определенным напряжением холостого хода и внутренним импедансом подключен импеданс нагрузки. Для измерения напряжения холостого хода к микрофону последовательно подключают малый (по сравнению с импедансом нагрузки) импеданс, через который подают с генератора калибровочное напряжение.

Предполагают, что звуковое давление и калибровочное напряжение одной и той же частоты подают попеременно. Калибровочное напряжение регулируют до тех пор, пока оно не даст такое же падение напряжения на импедансе нагрузки, что и при воздействии звукового давления на микрофон. В этом случае напряжение холостого хода будет равно по значению калибровочному напряжению.

5.4 Определение акустического передаточного импеданса

Акустический передаточный импеданс $\underline{Z}_{a,12} = \underline{p}_2 / (\underline{M}_{p,1} \cdot \underline{i}_1)$ может быть определен из эквивалентной схемы рисунка 1, где $\underline{Z}_{a,1}$ и $\underline{Z}_{a,2}$ — акустические импедансы микрофонов (1) и (2) соответственно.



1 — камера связи

Рисунок 1 — Эквивалентная схема для определения акустического передаточного импеданса $\underline{Z}_{a,12}$

В некоторых случаях $\underline{Z}_{a,12}$ может быть определен теоретически. Предполагают, что звуковое давление будет одинаковым в любой точке внутри камеры связи (это будет соблюдено, если физические размеры камеры связи малы по сравнению с длиной волны). Только в этом случае газ, заключенный в камере связи, характеризуют как чистую податливость *(гибкость)*, и из эквивалентной схемы рисунка 2 (в предположении адиабатического характера сжатия и расширения газа) $\underline{Z}_{a,12}$ выражают через $\underline{Z}'_{a,12}$:

$$\frac{1}{\underline{Z}'_{a,12}} = \frac{1}{\underline{Z}_{a,V}} + \frac{1}{\underline{Z}_{a,1}} + \frac{1}{\underline{Z}_{a,2}} = j\omega\left(\frac{V}{\kappa p_s} + \frac{\underline{V}_{e,1}}{\kappa_r p_{s,r}} + \frac{\underline{V}_{e,2}}{\kappa_r p_{s,r}}\right), \quad (3)$$

где V — общий геометрический объем камеры связи в кубических метрах ($м^3$);

$\underline{V}_{e,1}$ — эквивалентный объем микрофона (1) в кубических метрах ($м^3$);

$\underline{V}_{e,2}$ — эквивалентный объем микрофона (2) в кубических метрах ($м^3$);

$\underline{Z}_{a,V} = \kappa p_s / (j\omega V)$ — акустический импеданс газа, заключенного в камере связи, в паскаль-секундах на кубический метр (Па · с/$м^3$);

$j^2 =$ — 1 (мнимая единица);

ω — угловая частота в радианах в секунду (рад/с);

p_s — статическое давление в паскалях (Па);

$p_{s,r}$ — статическое давление при опорных условиях в паскалях, (Па);

κ — отношение удельных теплоемкостей при условиях измерения;

κ_r равно κ при опорных внешних условиях.

Значения κ и κ_r для влажного воздуха могут быть определены из уравнений, приведенных в приложении F.

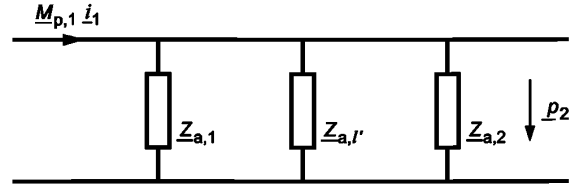


Рисунок 2 — Эквивалентная схема для определения $\underline{Z}'_{a,12}$, когда размеры камеры связи малы по сравнению с длиной волны

На более высоких частотах, при которых размеры камеры связи недостаточно малы по сравнению с длиной волны, определение $\underline{Z}_{a,12}$ усложняется. Однако, если форма камеры цилиндрическая и ее диаметр такой же, как у мембран микрофонов, то на частотах, где предполагается распространение плоских волн, всю систему допускается рассматривать как однородную линию передачи (см. рисунок 3). В этом случае $\underline{Z}_{a,12}$ выражается через $\underline{Z}'_{a,12}$ (в предположении адиабатического характера сжатия и расширения газа):

$$\frac{1}{\underline{Z}'_{a,12}} = \frac{1}{\underline{Z}_{a,0}}\left[\left(\frac{\underline{Z}_{a,0}}{\underline{Z}_{a,1}}+\frac{\underline{Z}_{a,0}}{\underline{Z}_{a,2}}\right)\cosh(\underline{\gamma} l_0)+\left(1+\frac{\underline{Z}_{a,0}}{\underline{Z}_{a,1}}\cdot\frac{\underline{Z}_{a,0}}{\underline{Z}_{a,0}}\right)\sinh(\underline{\gamma} l_0)\right], \quad (4)$$

где $\underline{Z}_{a,0}$ — акустический импеданс для плоской волны в камере связи. Если потерями в камере связи можно пренебречь, то $\underline{Z}_{a,0} = \rho c/S_0$;

ρ — плотность газа в камере связи в килограммах на кубический метр (кг/м^3);

c — скорость звука, свободно распространяющегося в газе, в метрах в секунду (м/с);

S_0 — поперечное сечение камеры связи в квадратных метрах (м^2);

l_0 — длина камеры связи, т. е. расстояние между двумя мембранами в метрах (м);

$\gamma = \alpha + j \cdot \beta$ — комплексный коэффициент распространения в метрах в минус первой степени, (м$^{-1}$).

Значения ρ и c для влажного воздуха могут быть определены из уравнений, приведенных в приложении F.

Реальная часть $\underline{\gamma}$ определяет потери на вязкое трение и теплопроводность на цилиндрической поверхности, а мнимая часть представляет собой угловое волновое число. При незначительных потерях γ в уравнении (4) упрощают, положив α равной нулю и β равной ω/c. Необходимо учесть любой воздушный объем, связанный с микрофонами, даже находящийся вне цилиндра, образованного камерой связи и обеими мембранами (см. 7.3.3.1).

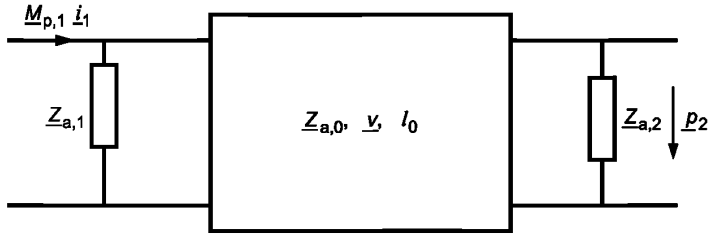


Рисунок 3 — Эквивалентная схема для определения $\underline{Z}'_{a,12}$, когда в камере связи предполагается распространение плоской волны

5.5 Поправка на теплопроводность

При определении $\underline{Z}'_{a,12}$ в 5.4 предположены адиабатические условия в камере связи. Однако в действительности теплопроводность стенок камеры связи вызывает отклонение от чисто адиабатических условий, особенно для небольших камер связи и низких частот.

В диапазоне низких частот, когда звуковое давление будет одинаковым в любой точке внутри камеры связи и, в предположении, постоянства температуры стенок камеры, потери на теплопроводность могут быть рассчитаны и выражены в виде комплексного поправочного коэффициента $\underline{\Delta}_H$ к геометрическому объему V в уравнении (3). Уравнения для расчета поправочного коэффициента $\underline{\Delta}_H$ приведены в приложении А.

В диапазоне высоких частот внутри камеры связи будет волновое движение и звуковое давление не будет одним и тем же в любой точке камеры. Для прямых круговых цилиндрических камер связи, где справедлива теория линейной передачи (см. 5.4), совместное влияние потерь на теплопроводность и вязкое трение может быть определено для плосковолнового распространения в камере с помощью комплексного коэффициента распространения и акустического импеданса. Дополнительную теплопроводность торцов камеры связи (мембран микрофонов) учитывают, включив дополнительные компонен-

ты в акустические импедансы микрофонов. Уравнения для расчета комплексного коэффициента распространения и акустического импеданса при плосковолновом распространении акустической волны приведены в приложении А.

5.6 Поправка на капиллярность трубки

Как правило, в камере связи монтируют капиллярные трубки для выравнивания статического давления внутри и снаружи камеры. Две такие капиллярные трубки позволяют ввести в камеру другой газ вместо воздуха.

Акустический импеданс на входе открытой капиллярной трубки $\underline{Z}_{a,C}$ определяют по формуле

$$\underline{Z}_{a,C} = \underline{Z}_{a,t} \tanh(\gamma\, l_C), \tag{5}$$

где $\underline{Z}_{a,t}$ — комплексный акустически волновой импеданс бесконечной трубки в паскаль-секундах на кубический метр (Па · с/м^3);

l_C — длина трубки в метрах (м).

Шунтирующее действие капиллярных трубок учитывают, вводя комплексный поправочный коэффициент $\underline{\Delta}_C$ к акустическим передаточным импедансам, определенным по формулам (3) и (4):

$$\underline{\Delta}_C = 1 + n\frac{\underline{Z}''_{a,12}}{\underline{Z}_{a,C}}, \tag{6}$$

где n — число одинаковых капиллярных трубок;

$\underline{Z}''_{a,12}$ — акустический передаточный импеданс $\underline{Z}'_{a,12}$ с поправкой на теплопроводность согласно 5.5.

Значения акустического импеданса на входе $\underline{Z}_{a,C}$ для открытой капиллярной трубки приведены в приложении В.

5.7 Окончательные уравнения для чувствительности по давлению

5.7.1 Метод с использованием трех микрофонов

Обозначают электрический передаточный импеданс $\underline{u}_2/\underline{i}_1$ через $\underline{Z}_{e,12}$ и вводят аналогичные обозначения для оставшихся пар микрофонов.

Приняв во внимание поправки, указанные в 5.5 и 5.6, получают окончательное уравнение для модуля чувствительности микрофона (1) по давлению:

$$|\underline{M}_{p,1}| = \left\{\left|\frac{\underline{Z}_{e,12}\underline{Z}_{e,31}}{\underline{Z}_{e,23}}\right| \cdot \left|\frac{\underline{Z}''_{a,23}}{\underline{Z}''_{a,12}\,\underline{Z}''_{a,31}}\right| \cdot \left|\frac{\underline{\Delta}_{C,12}\underline{\Delta}_{C,31}}{\underline{\Delta}_{C,23}}\right|\right\}^{1/2}. \tag{7}$$

Аналогичные уравнения справедливы и для микрофонов (2) и (3).

Подобным образом определяют и фазовую чувствительность микрофонов через фазовый угол каждого члена уравнения (7).

Примечание — Если комплексную величину выражают через модуль и фазу, то информация о фазе должна относиться ко всему диапазону фазы, т. е. 0—2π рад или 0—360°.

5.7.2 Метод с использованием двух микрофонов и вспомогательного источника звука

Если используют только два микрофона и вспомогательный источник звука, то окончательное уравнение для модуля чувствительности по давлению будет иметь вид

$$|\underline{M}_{p,1}| = \left\{\left|\frac{\underline{M}_{p,1}}{\underline{M}_{p,2}} \cdot \frac{\underline{Z}_{e,12}}{\underline{Z}''_{a,12}} \cdot \underline{\Delta}_C\right|\right\}^{1/2}, \tag{8}$$

где отношение двух чувствительностей по давлению измеряют методом сравнения с помощью вспомогательного источника, см. 5.1.3.

6 Факторы, влияющие на чувствительность по давлению

6.1 Общие сведения

Чувствительность конденсаторного микрофона по давлению зависит от напряжения поляризации и от внешних условий.

Принцип работы конденсаторного микрофона с поляризацией основан на предположении, что электрический заряд на микрофоне остается постоянным на всех частотах. Это условие определяется постоянной времени заряда микрофона, равной произведению емкости микрофона на сопротивление поляризации, и не выполняется на очень низких частотах. Несмотря на то, что чувствительность микрофона по холостому ходу определяют правильно с использованием метода замещения, действительное напряжение с выхода присоединенного к микрофону предусилителя в области низких частот будет меньше из-за указанной постоянной времени.

Более того, при определении чувствительности предполагают, что при измерениях должны быть соблюдены некоторые требования. Для получения достаточно малых составляющих общей неопределенности при проведении градуировки эти требования, перечисленные ниже, необходимо строго контролировать.

6.2 Напряжение поляризации

Чувствительность конденсаторного микрофона приблизительно пропорциональна напряжению поляризации, и поэтому в протоколе градуировки должно быть указано действительное значение напряжения поляризации. Рекомендованное МЭК 61094-1 напряжение поляризации равно 200,0 В.

6.3 Стандартная конфигурация заземленного экрана

В соответствии с 3.3 МЭК 61094-1 напряжение холостого хода должно быть измерено на электрических контактах микрофона методом замещения напряжения, описанным в 5.3. Требования к конфигурации заземленного экрана для лабораторных эталонных микрофонов указаны в МЭК 61094-1.

Аналогичная конструкция заземленного экрана должна быть использована при градуировке как для микрофона-приемника, так и для микрофона-излучателя, а экран должен быть подключен к потенциалу земли. При использовании другой конструкции результаты градуировки должны быть приведены к стандартной конструкции заземленного экрана.

Если изготовитель указывает максимальное механическое усилие, которое может быть приложено к центральному электрическому контакту микрофона, то этот предел не должен быть превышен.

6.4 Распределение давления по мембране

При определении чувствительности по давлению предполагают, что звуковое давление равномерно распределено по мембране. Выходное напряжение микрофона при неравномерном распределении давления по поверхности мембраны будет отличаться от выходного напряжения микрофона при равномерном распределении давления, имеющем то же самое среднее значение, поскольку, как правило, микрофон более чувствителен к звуковому давлению в центре мембраны. Эта разница будет другой для микрофонов с неравномерным натяжением мембраны.

В цилиндрических камерах, описанных в приложении С, волновое движение будет как продольным, так и радиальным (как симметричным, так и асимметричным). Радиальное волновое движение будет причиной неравномерного распределения давления по мембране. Оно возникнет, если излучатель будет отличаться от идеального поршневого источника, плотно соприкасающегося с поверхностью камеры связи, или если геометрическая форма соединения микрофон — камера связи не представляет собой прямой круговой цилиндр. Кроме того, асимметричное радиальное волновое движение возникает из-за несовершенства геометрической формы системы неподвижный электрод — мембрана микрофона-излучателя или из-за натяжения мембраны и ее однородности.

Рекомендуется, чтобы при градуировке неравномерность распределения звукового давления по мембране не превышала ± 0,1 дБ. Однако это условие трудно контролировать из-за геометрического несовершенства реального микрофона и камер связи. Несмотря на то, что радиального волнового движения невозможно избежать из-за отличия распределения по скорости микрофона-излучателя от идеального поршня, камеры связи, диаметр которых равен диаметру мембраны микрофона, будут менее всего подвержены радиальному волновому движению и менее всего чувствительны к несовершенству геометрической формы полости, чем камеры с диаметром, бóльшим диаметра мембраны.

Однако если необходима высокая точность при градуировке на высоких частотах, то для получения более правильной чувствительности микрофона желательно использовать несколько камер связи различных размеров и ввести теоретически обоснованные поправки на радиальное волновое движение.

6.5 Влияние внешних условий

6.5.1 Статическое давление

Акустическое сопротивление и масса газа между мембраной и неподвижным электродом, податливость полости за мембраной (далее — податливость) и, следовательно, чувствительность по давлению зависят от статического давления. Эту зависимость, которая представляет собой функцию частоты, можно определить для микрофона путем его градуировки методом взаимности при различных статических давлениях.

Приложение D содержит информацию о влиянии статического давления на чувствительность по давлению лабораторных эталонных конденсаторных микрофонов.

6.5.2 Температура

Акустическое сопротивление и масса газа между мембраной и неподвижным электродом и, следовательно, чувствительность по давлению зависят от температуры. Кроме того, геометрические размеры микрофона зависят от температуры, а чувствительность микрофона зависит от механического натяжения мембраны и от расстояния между мембраной и неподвижным электродом. Общее влияние этих изменений зависит от частоты. Эта объединенная зависимость для микрофона может быть определена путем градуировки методом взаимности при различных температурах.

Приложение D содержит информацию о влиянии температуры на чувствительность по давлению лабораторных эталонных конденсаторных микрофонов.

Примечание — Если микрофон подвергнуть большим изменениям температуры, то это может привести к изменению его чувствительности на постоянную величину.

6.5.3 Влажность

Несмотря на то, что термодинамическое состояние воздуха в полости за мембраной микрофона незначительно зависит от влажности, ее влияние на чувствительность лабораторных эталонных микрофонов в отсутствие конденсации не прослеживается.

Примечание — Определенные условия могут повлиять на стабильность напряжения поляризации и заряд на неподвижном электроде и таким образом повлиять на чувствительность микрофона. Например, поверхностное сопротивление изоляции материала между неподвижным электродом и корпусом микрофона может ухудшиться под влиянием большой влажности, особенно если материал загрязнен (7.3.3.3). Поверхностное сопротивление имеет заметное влияние на чувствительность микрофона на низких частотах, особенно на фазовую чувствительность.

6.5.4 Переход к опорным внешним условиям

В протоколе градуировки чувствительность микрофона по давлению должна быть приведена к опорным внешним условиям, при наличии достоверных поправочных данных.

В протоколе должны быть указаны условия, при которых была проведена градуировка.

Примечание — При градуировке температура микрофона может отличаться от температуры окружающего воздуха.

7 Составляющие неопределенности градуировки

7.1 Общие сведения

В дополнение к факторам, влияющим на чувствительность по давлению (см. раздел 6), ниже указаны составляющие общей неопределенности, такие как погрешность метода, инструментальная погрешность и тщательность проведения градуировки. Факторы, известным образом влияющие на результаты градуировки, должны быть измерены или рассчитаны с максимально возможной точностью для того, чтобы уменьшить их влияние на общую неопределенность.

7.2 Электрический передаточный импеданс

Для измерения электрического передаточного импеданса с необходимой точностью используют различные методы, но ни одному из них не отдают предпочтение. Ток, проходящий через излучатель,

как правило, устанавливают, измеряя напряжение через калиброванный импеданс, включенный последовательно с микрофоном-излучателем. Для того чтобы правильно измерить ток, к микрофону-излучателю должна быть присоединена стандартная конфигурация заземленного экрана (6.3). Калибровка последовательно включенного импеданса должна быть проведена с той же емкостью кабеля или другого нагрузочного импеданса, как и при измерении напряжения через калиброванный импеданс. Это позволяет определить электрический передаточный импеданс через отношение напряжений и калиброванный импеданс.

Напряжение, подаваемое на микрофон-излучатель, должно быть таким, чтобы влияние гармоник от этого генератора или от микрофона-излучателя на неопределенность в измерении чувствительности по давлению было мало по сравнению со случайной неопределенностью измерений. Шумы или другие помехи (такие, как перекрестные помехи) акустического или другого происхождения не должны чрезмерно влиять на чувствительность по давлению.

Примечание 1 — Для улучшения отношения сигнал/шум рекомендуется использовать аппаратуру для частотного анализа.

Примечание 2 — Перекрестные помехи допускается измерять, заменив микрофон-приемник макетом микрофона с теми же наружными геометрическими размерами и такой же электрической емкостью и определив разность в результатах измерений электрического передаточного импеданса. Камера связи и микрофоны должны быть расположены так же, как при градуировке. Перекрестные помехи допускается определять и при градуировке, установив напряжение поляризации равным нулю. В обоих методах рекомендуется использовать аппаратуру для частотного анализа.

7.3 Акустический передаточный импеданс

7.3.1 Общие сведения

На акустический передаточный импеданс влияют несколько факторов, но основным источником неопределенности при его измерении, особенно для маленьких камер связи, являются параметры микрофона.

7.3.2 Характеристики камеры связи

7.3.2.1 Размеры камеры связи

Форма и размеры полости камеры связи должны удовлетворять требованиям 6.4. Пока наибольшие размеры камеры связи малы по сравнению с длиной звуковой волны в газе, звуковое давление в разных частях камеры будет постоянным и не будет зависеть от ее формы. На высоких частотах и для больших камер связи это требование может быть удовлетворено при заполнении полости гелием или водородом.

Неопределенность в измерении размеров камеры связи влияет на акустический передаточный импеданс неоднозначно в зависимости от частоты. На акустический импеданс влияют также поправки на теплопроводность и капиллярные трубки. Примеры используемых камер связи приведены в приложении С.

Примечание 1 — Цилиндрические камеры связи, используемые в диапазоне частот, где размеры камеры не малы по сравнению с длиной волны, должны быть изготовлены с особой тщательностью, чтобы предотвратить возбуждение асимметричных звуковых полей.

Примечание 2 — Влияние асимметричного распределения звукового поля на микрофон обнаруживают, изменяя взаимное положение камеры связи и микрофонов, например, поворачивая каждый микрофон вокруг своей оси ступенями на некоторый угол. Если в данном случае электрический передаточный импеданс изменяется, то это влияние следует учесть при оценке неопределенности.

Примечание 3 — Если камера связи заполнена не воздухом, а другим газом, то необходимо предотвратить утечку этого газа в полость за мембраной путем герметизации контактирующих поверхностей тонким слоем вакуумной смазки. При диффузии газа через мембрану градуировку микрофона данным способом проводить не следует, так как чувствительность микрофона становится непрогнозируемой.

7.3.2.2 Потери на теплопроводность и вязкость

Поправки на потери из-за теплопроводности и вязкости должны быть рассчитаны из уравнений, приведенных в приложении А для цилиндрических камер связи с размерами, указанными в приложении С. При расчетах под полным объемом камеры связи понимают сумму геометрических объемов полости камеры связи и передних объемов присоединенных к ней микрофонов. Аналогично под полной поверхностью камеры связи понимают сумму поверхностей собственно полости камеры связи и полостей передних объемов присоединенных к ней микрофонов.

7.3.2.3 Капиллярная трубка

Если используют капиллярные трубки, то акустический импеданс должен быть рассчитан из уравнений, приведенных в приложении В. Для уменьшения влияния размера трубки на рассчитываемую неопределенность рекомендуется использовать длинные узкие капиллярные трубки. Поправочный коэффициент для капиллярных трубок рассчитывают из уравнения (6) в 5.6.

7.3.2.4 Физические величины

Акустический передаточный импеданс зависит от физических величин, описывающих свойства газа в камере связи. Эти величины зависят от внешних условий, таких как статическое давление, температура и влажность. Значения этих величин и их зависимость от внешних условий для влажного воздуха указаны в приложении F.

Суммарную неопределенность этих величин определяют как совокупность неопределенностей, полученных из уравнений приложения F, и неопределенностей измерений параметров, характеризующих внешние условия.

7.3.3 Параметры микрофона

7.3.3.1 Передняя полость

Лабораторные эталонные микрофоны перед мембраной имеют углубление. Объем этой передней полости представляет собой часть общего геометрического объема V камеры связи в уравнении (3). Глубины этих передних полостей также влияют на длину l_0 камеры связи в уравнении (4). Из-за допусков при изготовлении объем и глубину передней полости следует определять индивидуально для каждого микрофона перед его градуировкой в плосковолновых камерах связи (приложение Е). Легко определить, что измеренный объем передней полости будет отличаться от объема, рассчитанного на основании поперечного сечения S_0 камеры связи и глубины передней полости. Это связано с тем, что диаметр передней полости может немного отличаться от диаметра камеры связи, а передняя полость микрофона имеет на внутренней стенке резьбу, которая не позволяет точно определить диаметр полости, и кроме того, вблизи края мембраны микрофона может быть дополнительное кольцеобразное воздушное пространство, образующее полость. При использовании уравнения (4) дополнительный объем полости, определяемый как разность между действительным передним объемом и объемом, рассчитанным из поперечного сечения S_0 камеры связи и глубины передней полости, следует рассматривать как дополнительный импеданс нагрузки, поскольку $\underline{Z}_{a,1}$ и $\underline{Z}_{a,2}$ и импеданс дополнительного объема образуют параллельное соединение импедансов.

Примечание 1 — Дополнительный объем в некоторых случаях может быть отрицательным.

Примечание 2 — Если в передней полости имеется внутренняя резьба, то увеличение внутренней поверхности из-за ее наличия повысит потери на теплопроводность и вызовет изменение акустического передаточного импеданса. Если при расчете акустического передаточного импеданса этим эффектом пренебрегают, то соответствующие компоненты неопределенности должны быть соответственно увеличены.

7.3.3.2 Акустический импеданс

Акустический импеданс микрофона зависит от частоты и определяется натяжением мембраны, слоем воздуха, заключенным в полости позади мембраны, и геометрией неподвижного электрода. В первом приближении акустический импеданс может быть выражен, применительно к эквивалентной схеме, в виде последовательно соединенных податливости, массы и сопротивления. Альтернативно эта эквивалентная схема может быть описана через податливость, частоту резонанса и коэффициент потерь. Податливость на низкой частоте нередко выражают в виде реальной части эквивалентного объема (6.2.2 МЭК 61094-1).

Из-за влияния теплопроводности в полости позади мембраны на очень низких частотах возможно увеличение эквивалентного объема микрофона до 5 % для микрофонов типа LS1.

Акустический импеданс $\underline{Z}_a$ каждого микрофона составляет основную часть акустического передаточного импеданса $\underline{Z}_{a,12}$ системы и определяет погрешность при оценке влияния $\underline{Z}_a$ на точность градуировки в целом и, особенно на высоких частотах.

Методы определения акустического импеданса описаны в приложении Е.

Примечание — Точность, с которой должны быть измерены параметры микрофона для получения необходимой общей точности, зависит от применяемой камеры и частоты.

7.3.3.3 Напряжение поляризации

При определении напряжения поляризации необходимо принять меры для его измерения непосредственно на контактах микрофона. Это особенно важно, если напряжение поляризации подается от

высокоимпедансного источника, поскольку микрофон имеет конечное значение сопротивления изоляции. С другой стороны, имеются обоснованные способы измерения напряжения поляризации в удалении от микрофона на источнике напряжения, если достоверно известно, что сопротивление изоляции микрофона достаточно высоко, или на низкоомном выходе источника.

7.4 Несовершенство теории

Практический вывод теоремы взаимности и акустического передаточного импеданса основан на некоторых идеализированных предположениях о микрофонах, звуковом поле в камерах связи, перемещении мембраны микрофона и геометрии камер связи, как элементов акустической связи между микрофонами. Ниже приведены примеры, когда эти предположения не выполняются:

- небольшие дефекты в пленке мембраны микрофона-излучателя могут привести к искажению симметричного волнового движения, которое нельзя учесть используемой для расчетов формулой;
- микрофоны могут быть неидентичными. Это воздействие может быть сведено к минимальному при использовании микрофонов только одной модели;
- используемые поправки на волновое движение основаны на идеализации смещения мембраны микрофона или получены эмпирическим путем;
- дополнительный объем передней полости микрофона (7.3.3.1) может быть определен точно;
- представление акустического импеданса микрофона в виде системы сосредоточенных параметров является приближением к истинному импедансу;
- потери на вязкость на поверхности полости камеры связи получены по приближенной теории. Кроме того, не учтено увеличение потерь на вязкость из-за внутренней резьбы в передней камере микрофона и шероховатости поверхности. Все это оказывает влияние на акустический импеданс в диапазоне высоких частот.

7.5 Неопределенность уровня чувствительности по давлению

Неопределенность уровня чувствительности по давлению должна быть определена в соответствии с ИСО/МЭК Руководством 98-3. При оформлении результатов градуировки должна быть дана расширенная неопределенность измерения в зависимости от частоты при коэффициенте охвата $k = 2$.

Из-за сложности окончательного выражения чувствительности по давлению [уравнение (7)] анализ неопределенности акустического передаточного импеданса, как правило, выполняют многократно, повторяя вычисления при изменении каждой из составляющих в соответствии со связанными с ними неопределенностями. Отличие от результата, полученного для неизменных составляющих, используют для определения стандартной неопределенности, связанной с различными составляющими.

В таблице 1 приведен перечень составляющих, влияющих на неопределенность градуировки. Но не все из этих составляющих могут иметь отношение к конкретной установке для градуировки микрофонов, поскольку для измерения электрического передаточного импеданса, для определения параметров микрофонов и параметров камеры связи используют различные методы.

Составляющие неопределенности, приведенные в таблице 1, как правило, зависят от частоты и должны быть представлены как стандартные неопределенности. Составляющие неопределенности должны быть выражены в линейной форме, но логарифмическая форма также возможна из-за малости этих значений, и полученная окончательная расширенная неопределенность измерения будет, по существу, той же самой.

Таблица 1 — Составляющие неопределенности

Измеряемая величина	Пункт стандарта
Электрический передаточный импеданс	
Последовательно соединенный импеданс	7.2
Отношение напряжений	7.2
Перекрестные искажения (помехи)	7.2
Собственные и внешние шумы	7.2
Искажения	7.2

Окончание таблицы 1

Измеряемая величина	Пункт стандарта
Частота	7.2
Экран заземления микрофона-приемника	6.3
Экран заземления микрофона-излучателя	6.3; 7.2
Параметры камеры связи	
Длина камеры связи	7.3.2.1
Диаметр камеры связи	7.3.2.1
Объем камеры связи	7.3.2.1; 7.3.2.2
Площадь поверхности камеры связи	7.3.2.1; 7.3.2.2
Объединенная камера связи	
Размеры капиллярной трубки	7.3.2.3
Статическое давление	7.3.2.4
Температура	7.3.2.4
Относительная влажность	7.3.2.4
Параметры микрофона	
Глубина передней полости	7.3.3.1
Объем передней полости	7.3.3.1
Эквивалентный объем	7.3.3.2
Резонансная частота	7.3.3.2
Коэффициент потерь	7.3.3.2
Податливость мембраны	7.3.3.2
Масса мембраны	7.3.3.2
Сопротивление мембраны	7.3.3.2
Дополнительная теплопроводность из-за резьбы в передней полости	7.3.3.1
Напряжение поляризации	6.5.3; 7.3.3.3
Несовершенство теории	
Теория теплопроводности	Приложение А
Расчет дополнительного объема	7.3.3.1; 7.4
Потери на вязкость	7.4
Радиальное волновое движение	6.4; 7.3.2.1; 7.4
Обработка результатов	
Погрешность округления	
Повторяемость измерений	
Поправки на статическое давление	6.5; приложение D
Температурные поправки	6.5; приложение D

Приложение А
(обязательное)

Потери на теплопроводность и вязкое трение в замкнутой полости

А.1 Общие сведения

В замкнутой полости камеры связи теплопроводность между воздухом и стенками вызывает постепенный переход от адиабатических условий к изотермическим. Характеристика этого перехода зависит от частоты градуировки и от размеров камеры. Кроме того, скорость колебания звуковых частиц вдоль внутренней поверхности камеры связи приведет к потерям на вязкое трение. Соответственно будет изменяться и звуковое давление, создаваемое микрофоном-излучателем, т. е. будет изменяться постоянное объемное смещение источника. Для определения получаемого звукового давления предложены два решения:

- низкочастотное решение, основанное только на теплопроводности и применимое для плосковолновых камер и для камер большого объема в частотном диапазоне, где допускается пренебречь волновым движением;
- широкополосное решение, учитывающее потери на теплопроводность и вязкое трение в широком диапазоне частот, применимое только для плосковолновых камер.

Плосковолновые камеры и камеры большого объема описаны в приложении С.

А.2 Низкочастотное решение

В области низких частот звуковое давление может быть рассмотрено как одно и то же для всех точек камеры связи и влияние теплопроводности может быть рассмотрено как кажущееся увеличение объема камеры связи при введении комплексного поправочного коэффициента $\underline{\Delta}_H$ к геометрическому объему V в уравнении (3).

Поправочный коэффициент рассчитывают по формуле

$$\underline{\Delta}_H = \frac{\kappa}{1+(\kappa-1)\underline{E}_v}, \qquad (A.1)$$

где $\underline{E}_v$ — комплексная функция преобразования температуры, определяемая в виде отношения усредненного по пространству синусоидального изменения температуры, вызванного звуковым давлением, к синусоидальному изменению температуры, которое было бы при совершенно теплонепроводящих стенках камеры связи. В работе [А.1] значения $\underline{E}_v$ табулированы и приведены в зависимости от параметров R и X,

где R — отношение длины к диаметру камеры связи;

$$X = fl^2/(\kappa\alpha_t);$$

f — частота в герцах (Гц);

l — отношение объема камеры к ее поверхности в метрах (м);

α_t — коэффициент температуропроводности газа в квадратных метрах в секунду ($м^2/с$).

В таблице А.1 приведены значения $\underline{E}_v$ для нескольких значений R и X с округлением до 0,000 01.

Для цилиндрических камер связи, описанных в приложении С, приводимая ниже аппроксимация для комплексной величины $\underline{E}_v$ дает результаты с погрешностью менее 0,01 дБ для частот выше 20 Гц.

$$\underline{E}_v = 1 - \underline{S} + D_1 \cdot \underline{S}^2 + \frac{3}{4}\sqrt{\pi} \cdot D_2 \cdot \underline{S}^3, \qquad (A.2)$$

где

$$\underline{S} = \sqrt{-j\frac{1}{2\pi X}} = \frac{1-j}{2\sqrt{\pi X}}, \quad D_1 = \frac{\pi R^2 + 8R}{\pi(2R+1)^2}, \quad D_2 = \frac{R^3 - 6R^2}{3\sqrt{\pi}(2R+1)^3}.$$

Модули, рассчитанные по формуле (А.2), имеют погрешность до 0,01 % для $0{,}125 < R < 8$ и для $X > 5$. Первые два члена уравнения (А.2) могут быть использованы для камер связи, отличающихся по форме от прямого кругового цилиндра. При градуировке в камерах связи, описанных в приложении С, в диапазоне частот ниже 20 Гц должно быть использовано решение, представленное в [А.1], для всего диапазона частот или должны быть увеличены соответствующие составляющие неопределенности.

Таблица А.1 — Значения $\underline{E}_v$

Действительная часть $\underline{E}_v$			X	Мнимая часть $\underline{E}_v$		
R = 0,2	R = 0,5	R = 1		R = 0,2	R = 0,5	R = 1
0,72127	0,71996	0,72003	1,0	0,24038	0,22323	0,22146
0,80092	0,80122	0,80128	2,0	0,17722	0,16986	0,16885
0,83727	0,83751	0,83754	3,0	0,14818	0,14304	0,14236
0,85907	0,85920	0,85922	4,0	0,13003	0,12614	0,12563
0,87393	0,87402	0,87403	5,0	0,11732	0,11421	0,11380
0,89343	0,89348	0,89349	7,0	0,10030	0,09807	0,09777
0,91082	0,91086	0,91086	10,0	0,08477	0,08321	0,08300
0,93693	0,93694	0,93694	20,0	0,06086	0,06007	0,05997
0,94850	0,94851	0,94851	30,0	0,05002	0,04950	0,04942
0,95540	0,95541	0,95541	40,0	0,04349	0,04310	0,04304
0,96358	0,96359	0,96359	60,0	0,03568	0,03541	0,03538
0,96846	0,96846	0,96846	80,0	0,03098	0,03078	0,03076
0,97179	0,97179	0,97179	100,0	0,02776	0,02761	0,02758
0,98005	0,98005	0,98005	200,0	0,01972	0,01964	0,01963
0,98590	0,98590	0,98590	400,0	0,01399	0,01395	0,01395
0,99003	0,99003	0,99003	800,0	0,00992	0,00990	0,00989

А.3 Широкополосное решение

В области высоких частот кроме тепловых потерь присутствуют потери на вязкое трение и его воздействие вызывает кажущееся уменьшение эффективного поперечного сечения камеры связи из-за приграничного слоя вблизи поверхности и кажущееся увеличение длины камеры связи из-за уменьшения скорости звука. В области низких частот и для камер, описанных в приложении С, эти два эффекта компенсируют друг друга, но воздействие теплопроводности остается. Общее влияние потерь на теплопроводность и вязкое трение на распространение звука в цилиндрических трубах рассмотрено в [А.2] на основе теории Кирхгофа. Комплексные выражения для коэффициента распространения и акустического импеданса камеры связи получены из уравнения (4)

$$\underline{\gamma} = j\frac{\omega}{c}\left(1+\frac{1-j}{\sqrt{2}}\frac{1}{a}\left(\sqrt{\frac{\eta}{\omega\rho}}+(\kappa-1)\sqrt{\frac{\alpha_t}{\omega}}\right)\right); \tag{А.3}$$

$$\underline{Z}_{a,0} = \frac{\rho c}{S_0}\left(1+\frac{1-j}{\sqrt{2}}\frac{1}{a}\left(\sqrt{\frac{\eta}{\omega\rho}}-(\kappa-1)\sqrt{\frac{\alpha_t}{\omega}}\right)\right), \tag{А.4}$$

где η — вязкость газа в паскалях за секунду (Па · с);

a — радиус камеры связи в метрах (м).

Значения c, η, ρ и α_t для влажного воздуха могут быть получены из уравнений в приложении F.

Кроме вышеуказанных потерь на боковой поверхности цилиндра камеры связи существуют потери на теплопроводность на поверхностях оснований цилиндра, образованных микрофонами. Эти потери могут быть выражены с помощью адмиттанса $1/\underline{Z}_{a,h}$, добавляемого к каждому адмиттансу микрофона в уравнении (4), в соответствии с [А.3]

$$\frac{1}{\underline{Z}_{a,h}} = \frac{S_0}{\rho c}\frac{1+j}{\sqrt{2}}(\kappa-1)\frac{1}{c}\sqrt{\alpha_t\omega}. \tag{А.5}$$

Если микрофон имеет внутреннюю резьбу в передней полости, то дополнительные потери на теплопроводность из-за поверхности резьбы могут быть учтены, если добавить площадь поверхности резьбы к площади поперечного сечения S_0 в уравнении (А.5), в соответствии с [А.4]. Уравнения (А.3)—(А.4) справедливы для частотного диапазона $\omega\rho a^2 > 100\eta$. Это соответствует частотам более 3 Гц и 12 Гц для плосковолновых камер, приведенных в таблице С.1 для микрофонов LS1P и LS2aP, соответственно.

А.5 Библиография

[А.1] GERBER, H. *Acoustic properties of fluid-filled chambers at infrasonic frequencies in the absence of convection,* Journal of Acoustical Society of America 36, 1964, pp. 1427—1434

[А.2] ZWIKKER, C and KOSTEN, C.W. *Sound Absorbing Materials*, 1949. Elsevier, Amsterdam. Chapter 11, § 4

[А.3] MORSE, P.M. and INGARD, K.U. *Theoretical Acoustics*, 1968. McGraw-Hill, New York. Chapters 6.4 and 9.2

[А.4] FREDERIKSEN, E. *Reduction of Heat Conduction Error in Microphone Pressure Reciprocity Calibration*. Brüel & Kjxr Technical Review, 1 2001. pp. 14—23

Приложение В
(обязательное)

Акустический импеданс капиллярной трубки

В.1 Общие сведения

Акустический импеданс $\underline{Z}_{a,C}$ на входе открытой капиллярной трубки определяют, исходя из теории длинных линий (5.6), по уравнению

$$\underline{Z}_{a,C} = \underline{Z}_{a,t}\ th\ (\underline{\gamma} l c). \tag{В.1}$$

Между $\underline{Z}_{a,t}$ и γ имеется соотношение [В.1]

$$\underline{\gamma} \underline{Z}_{a,t} = j \frac{\omega \rho}{\pi a_t^2} \left(1 - \frac{2J_1(\underline{k} a_t)}{\underline{k} a_t J_0(\underline{k} a_t)}\right)^{-1}; \tag{В.2}$$

$$\frac{\underline{\gamma}}{\underline{Z}_{a,t}} = j\omega \frac{\pi a_t^2}{\rho c^2} \left(1 + \frac{2(\kappa - 1)}{B \underline{k} a_t} \frac{J_1(B \underline{k} a_t)}{J_0(B \underline{k} a_t)}\right), \tag{В.3}$$

где $J_0(\ )$, $J_1(\ )$ — цилиндрические функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядков от комплексного переменного;

a_t — радиус трубки в метрах (м);

$\underline{k} = (-j\omega/\eta)^{1/2}$ — комплексное волновое число в метрах в минус первой степени ($м^{-1}$);

$$B = (\eta/\rho\alpha_t)^{1/2};$$

η — вязкость газа в паскаль секундах (Па · с);

ρ — плотность газа в килограммах на кубический метр ($кг/м^3$);

α_t — температуропроводность газа в квадратных метрах в секунду ($м^2/с$).

Вышеприведенные уравнения должны быть использованы для расчета поправочного коэффициента $\underline{\Delta}_C$ в уравнении (6). Значения c, η, ρ и α_t для влажного воздуха могут быть вычислены из уравнений, приведенных в приложении F.

В альтернативном случае капиллярная трубка может быть заглушена по всей длине подходящей по размеру проволочкой после установки в камеру связи микрофонов. В этом случае поправочный коэффициент равен 1.

Уравнения (В.1), (В.2), (В.3) справедливы для идеальной цилиндрической трубки и зависят в 4-й степени от радиуса трубки. Однако в действительности форма внутренних частей трубки не соответствует форме кругового цилиндра и необходима градуировка трубки по потоку для того, чтобы определить ее эффективный радиус.

В таблицах В.1 и В.2 приведены значения реальной и мнимой частей $\underline{Z}_{a,C}$ при опорных внешних условиях для обычно используемых размеров трубки и частоты соответственно. Эти таблицы должны быть использованы с целью проверить вычислительную программу для расчета значений из уравнений (В.1), (В.2), (В.3). При градуировке в уравнениях (В.1), (В.2), (В.3) должны быть использованы действительные значения температуры, статического давления и относительной влажности.

Таблица В.1 — Реальная часть $\underline{Z}_{a,C}$, ГПа · с/м^3

Размеры трубки в миллиметрах

l_C = 50			Частота, Гц	l_C = 100		
a = 0,1667	a = 0,20	a = 0,25		a = 0,1667	a = 0,20	a = 0,25
3,015	1,454	0,596	20	6,034	2,911	1,193
3,016	1,455	0,596	25	6,037	2,913	1,194
3,017	1,455	0,596	31,5	6,043	2,917	1,196
3,019	1,456	0,597	40	6,052	2,923	1,299
3,021	1,458	0,598	50	6,066	2,931	1,203

Окончание таблицы В.1

l_C = 50			Частота, Гц	l_C = 100		
a = 0,1667	*a* = 0,20	*a* = 0,25		*a* = 0,1667	*a* = 0,20	*a* = 0,25
3,026	1,460	0,599	63	6,088	2,946	1,210
3,033	1,464	0,601	80	6,124	2,970	1,222
3,043	1,470	0,604	100	6,178	3,006	1,240
3,060	1,480	0,609	125	6,264	3,063	1,270
3,090	1,496	0,618	160	6,416	3,168	1,323
3,134	1,521	0,632	200	6,638	3,326	1,406
3,204	1,561	0,653	250	6,985	3,589	1,547
3,322	1,628	0,688	315	7,540	4,061	1,815
3,531	1,747	0,749	400	8,355	4,940	2,378
3,868	1,940	0,848	500	9,074	6,287	3,532
4,501	2,310	1,033	630	8,677	7,339	5,629
5,805	3,109	1,433	800	6,378	5,313	4,380
8,331	4,884	2,374	1 000	4,354	3,006	1,928
12,122	9,001	5,376	1 250	3,546	2,127	1,147
9,201	7,936	6,752	1 600	4,171	2,408	1,195
4,332	3,027	1,956	2 000	6,325	4,404	2,523
2,698	1,638	0,894	2 500	4,986	3,723	2,774
2,808	1,579	0,783	3 150	4,412	2,660	1,392
5,917	3,529	1,745	4000	5,245	4,024	3,079
5,959	4,838	3,917	5 000	5,058	3,258	1,767
3,307	1,940	1,012	6 300	4,580	2,921	1,673
6,581	5,380	4,133	8 000	4,696	3,034	1,751
4,180	2,461	1,257	10 000	4,977	3,360	1,949
3,909	2,545	1,546	12 500	4,765	3,335	2,277
4,047	2,594	1,540	16 000	4,757	3,267	2,142
4,531	2,809	1,516	20 000	4,847	3,322	2,021
Примечание — Значения, приведенные в настоящей таблице, верны только при опорных внешних условиях (см. раздел 4 и таблицу F.2).						

Примечание — Значения, приведенные в настоящей таблице, верны только при опорных внешних условиях (см. раздел 4 и таблицу F.2).

Таблица В.2 — Мнимая часть $\underline{Z}_{a,C}$, ГПа · с/м^3

Размеры трубки в миллиметрах

l_C = 50			Частота, Гц	l_C = 100		
a = 0,1667	*a* = 0,20	*a* = 0,25		*a* = 0,1667	*a* = 0,20	*a* = 0,25
0,097	0,074	0,049	20	0,096	0,114	0,090
0,122	0,092	0,061	25	0,120	0,143	0,112

Окончание таблицы В.2

l_C = 50			Частота, Гц	l_C = 100		
a = 0,1667	*a* = 0,20	*a* = 0,25		*a* = 0,1667	*a* = 0,20	*a* = 0,25
0,154	0,116	0,077	31,5	0,152	0,180	0,141
0,195	0,147	0,098	40	0,192	0,228	0,180
0,244	0,184	0,123	50	0,240	0,285	0,225
0,307	0,232	0,155	63	0,300	0,359	0,283
0,390	0,295	0,197	80	0,378	0,456	0,361
0,488	0,369	0,246	100	0,467	0,570	0,452
0,611	0,462	0,308	125	0,573	0,711	0,567
0,783	0,592	0,396	160	0,705	0,907	0,731
0,981	0,743	0,496	200	0,829	1,125	0,923
1,230	0,933	0,623	250	0,923	1,383	1,170
1,557	1,186	0,792	315	0,896	1,668	1,502
1,993	1,527	1,021	400	0,488	1,848	1,923
2,513	1,948	1,306	500	–0,676	1,418	2,203
3,192	2,533	1,711	630	–2,737	–0,771	0,932
3,992	3,354	2,325	800	–3,890	–3,149	–2,506
4,287	4,216	3,186	1 000	–3,030	–2,594	–2,129
1,347	3,171	3,733	1 250	–1,381	–1,156	–0,944
–5,328	–4,376	–3,270	1 600	0,430	0,455	0,280
–4,500	–3,769	–2,958	2 000	0,265	0,975	1,222
–1,998	–1,665	–1,281	2 500	–1,700	–1,549	–1,341
0,489	0,241	0,049	3 150	0,204	0,197	0,051
2,431	2,282	1,690	4 000	–1,070	–0,858	–0,516
–2,799	–2,427	–1,945	5 000	0,209	0,437	0,403
0,181	–0,041	–0,193	6 300	–0,071	–0,098	–0,222
–1,231	–0,589	0,227	8 000	–0,041	–0,029	–0,141
0,867	0,637	0,331	10 000	–0,053	0,152	0,209
–0,548	–0,705	–0,769	12 500	–0,281	–0,294	–0,276
–0,217	–0,406	–0,538	16 000	–0,175	–0,187	–0,226
0,426	0,341	0,134	20 000	–0,107	0,001	0,032

Примечание — Значения, приведенные в настоящей таблице, верны только при опорных внешних условиях (см. раздел 4 и таблицу F.2).

В.2 Библиография

[B.1] ZWIKKER, C. and KOSTEN, C.W. *Sound Absorbing Materials*, 1949. Elsevier, Amsterdam. Chapter II, § 2—3

Приложение С
(справочное)

Цилиндрические камеры связи, применяемые для градуировки микрофонов

С.1 Общие сведения

В камере связи, применяемой для градуировки методом взаимности, должно быть создано равномерное распределение звукового давления по мембране как микрофона-излучателя, так и микрофона-приемника. Особенно важно обеспечить равномерное распределение давления по мембране микрофона-приемника для того, чтобы получить чувствительность микрофона в соответствии с определением чувствительности по давлению (3.4 МЭК 61094-1). Из-за радиального волнового движения и асимметричности движения мембраны это идеальное условие может быть выполнено лишь приближенно. Для увеличения частотного диапазона камеры связи (это относится только к радиальному волновому движению) необходимо, чтобы радиальная резонансная частота была как можно выше, что допустимо при уменьшении диаметра камеры связи. Практически диаметр камеры связи не должен быть меньше диаметра мембраны микрофона.

Однако для имеющейся камеры частота резонанса может быть повышена при введении взамен воздуха внутрь камеры водорода или гелия (7.3.2). Теоретически это увеличение верхней граничной частоты камеры выражают коэффициентом, равным отношению скорости звука в водороде (гелии) к скорости звука в воздухе. Необходимо заметить, что скорость звука в мембране микрофонов не зависит от типа газа в камере связи и не меняется, как скорость звука от заключенного в камере газа.

Большое значение при градуировке методом взаимности в замкнутой камере связи имеет акустический передаточный импеданс $\underline{Z}_{a,12}$ всей системы (5.2 и 5.4), который должен быть известен с высокой точностью. На частотах, где длина звуковой волны больше по сравнению с размерами камеры связи, распределение звукового давления равномерно во всей камере и $\underline{Z}_{a,12} = \underline{Z}'_{a,12}$ зависит от эффективного объема камеры связи, т. е. геометрического объема камеры, включая объемы передней полости (далее — передний объем) и эквивалентные объемы микрофонов (3). На частотах, где длина звуковой волны сравнима с размерами камеры, будет существовать волновое движение и трудно получить теоретическое выражение для передаточного импеданса камеры связи в очень простой форме. Уравнение (4) выражает передаточный импеданс $\underline{Z}'_{a,12}$ цилиндрической камеры связи с диаметром равным диаметру мембран микрофонов при допущении только плоских волн в камере.

Были разработаны методы расчета передаточного импеданса для других случаев. Для них, однако, поправка на волновое движение должна быть определена эмпирически.

Практически используют два типа камер связи. Это плосковолновые камеры связи, диаметр которых равен диаметру мембран, и камеры большого объема, в которых объем камеры велик по сравнению с передними и эквивалентными объемами микрофонов.

С.2 Плосковолновые камеры

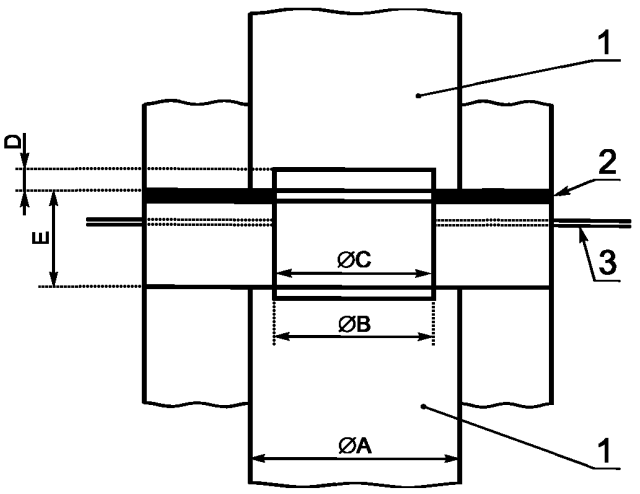
Диаметр полостей плосковолновых камер связи равен диаметру передних полостей микрофона. Длина камеры, т. е. расстояние между двумя мембранами, должна быть достаточно большой, чтобы обеспечить распространение плоской волны, но эта длина не должна быть больше четверти длины волны. Рекомендуется использовать камеры связи, имеющие отношение длины к диаметру от 0,5 до 0,75. Такие камеры позволяют проводить в воздухе градуировку лабораторных эталонных микрофонов типа LS1P до 10 кГц и типа LS2P до 20 кГц.

Для этих камер могут быть получены аналитические выражения для учета влияния симметричного радиального волнового движения при допущении, что функция, описывающая смещение мембраны микрофонов, соответствует идеализированным колебаниям мембраны [С.2—С.4] (рисунки находятся в разделе С.4).

В камерах связи, как правило, присутствует асимметричное радиальное волновое движение. Самые низкие моды этих асимметричных колебаний возникают в плосковолновых камерах около 10,6 и 21,2 кГц для микрофонов типов LS1 и LS2 соответственно.

Для расчета $\underline{Z}'_{a,12}$ необходимо использовать уравнение (4) и с высокой точностью определить все факторы, влияющие на $\underline{Z}_{a,12}$ (см. 7.3), в частности — акустический импеданс микрофонов.

Рекомендуемые размеры для плосковолновых камер приведены в таблице С.1 и показаны на рисунке С.1.



1 —микрофон; *2* — изолятор; *3* — капиллярные трубки

Рисунок С.1 — Эскиз плосковолновой камеры

Таблица С.1 — Номинальные размеры плосковолновых камер

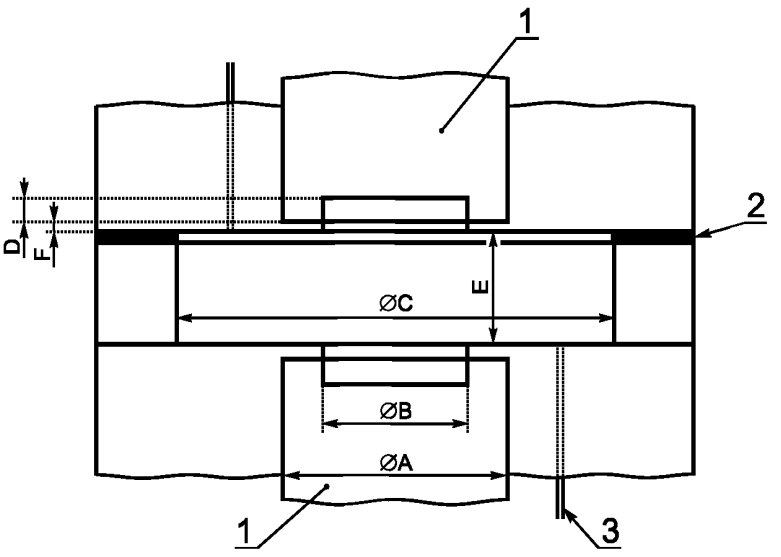
Размеры в миллиметрах

Обозначение размеров	Лабораторные эталонные микрофоны		
	Тип LS1P	Тип LS2aP	Тип LS2bP
Ø A	23,77	13,2	12,15
Ø B	18,6	9,3	9,8
Ø C	18,6	9,3	9,8
D	1,95	0,5	0,7
E	3,5—9,5	3—7	3,5—6

С.3 Камеры бóльшего объема

Камеры бóльшего объема имеют объем больше объема плосковолновых камер, и их размеры выбраны так, чтобы уменьшение давления на мембране из-за радиальных мод частично компенсировалось увеличением давления из-за продольной моды. Оптимальное отношение длины к диаметру — около 0,3, и оно зависит от глубины передних полостей микрофонов.

Такие камеры связи используют в воздухе для градуировки лабораторных эталонных микрофонов типа LS1P вплоть до 2,5 кГц и типа LS2P до 5 кГц при введении эмпирических поправок на волновое движение. Если необходима высокая точность, рекомендуется определять поправку на волновое движение для каждой индивидуально изготовленной камеры связи, поскольку волновая картина в камере в значительной степени зависит от ее размеров. Для расчета $Z'_{a,12}$ должно быть использовано выражение (3), для которого необходимо определить сумму переднего объема полости и эквивалентного объема микрофонов. Рекомендуемые размеры камер бóльшего объема приведены в таблице С.2 и показаны на рисунке С.2.



1 — микрофон; *2* — изолятор; *3* — капиллярные трубки

Рисунок С.2 — Эскиз камеры бóльшего объема

Таблица С.2 — Номинальные размеры и допуски для камер бóльшего объема

Размеры в миллиметрах

Обозначение размеров	Лабораторные эталонные микрофоны		
	Тип LS1P	Тип LS2aP	Тип LS2bP
Ø A	23,77	13,2	12,15
Ø B	18,6	9,3	9,8
Ø C	42,88 ± 0,03	18,30 ± 0,03	18,30 ± 0,03
D	1,95	0,5	0,7
E	12,55 ± 0,03	3,50 ± 0,03	3,50 ± 0,03
F	0,80 ± 0,03	0,40 ± 0,03	0,40 ± 0,03

В таблице С.3 приведены типовые поправки на волновое движение для камеры связи бóльшего объема, используемой совместно с микрофонами типа LS1P. Значения поправок должны быть прибавлены к значению уровня чувствительности по давлению, определенному для камеры связи, наполненной воздухом, или могут быть введены тогда, когда практические поправки для индивидуальной камеры с микрофонами не определяли. Эти же поправки могут быть использованы и при заполнении камеры водородом, если частотную шкалу умножить на коэффициент, равный отношению скорости звука в объеме с заданной концентрацией водорода к соответствующей скорости в воздухе.

Таблица С.3 — Поправки на волновое движение в воздухе, определенные экспериментально для камеры бóльшего объема, применяемой с микрофонами типа LS1P

Частота, Гц	Поправка, дБ
800 и ниже	0,000
1 000	–0,002
1 250	–0,013
1 600	–0,034
2 000	–0,060
2 500	–0,087

С.4 Библиография

[С.1] MIURA, H. and MATSUI, E. On the analysis of the wave motion in a coupler for the pressure calibration of laboratory standard microphones. J. Acoust. Soc. Japan 30, 1974, pp. 639—646

[С.2] RASMUSSEN, K. Radial wave-motion in cylindrical plane-wave couplers. Acta Acustica, 1, 1993, pp. 145—151

[С.3] GUIANVARC'H, C; DUROCHER, J. N.; BRUNEAU, A.; BRUNEAU, M. Improved Formulation of the Acoustic Transfer Admittance of Cylindrical Cavities. Acta Acustica united with Acustica, 92, 2006, pp. 345—354

[С.4] KOSOBRODOV, R. and KUZNETSOV, S. Acoustic Transfer Impedance of Plane-Wave Couplers, Acta Acustica united with Acustica, 92, 2006, pp. 513—520

Приложение D
(справочное)

Влияние окружающей среды на чувствительность микрофонов

D.1 Общие сведения

Настоящее приложение содержит сведения о влиянии статического давления и температуры на чувствительность микрофонов.

D.2 Основные соотношения

Чувствительность конденсаторного микрофона обратно пропорциональна акустическому импедансу микрофона. Упрощенно импеданс микрофона может быть представлен в виде импеданса мембраны (как правило, учитывают ее массу и гибкость), последовательно соединенного с импедансом воздуха в объеме за мембраной.

Импеданс воздуха в объеме за мембраной определяется тремя составляющими:

- тонким слоем воздуха между мембраной и неподвижным электродом, вносящим затухание и массу;
- слоем воздуха в сквозных отверстиях и канавках на неподвижном электроде, вносящим затухание и массу;
- воздухом в полости позади неподвижного электрода, действующим как податливость на низких частотах, а на высоких частотах вносящим дополнительные резонансы из-за волнового движения в полости.

Относительная масса этих трех составляющих определяется конструкцией микрофона. Считают, что плотность и вязкость воздуха линейно зависят от температуры и/или статического давления. Отсюда вытекает, что импеданс микрофона также зависит от статического давления и температуры. Коэффициенты статического давления и температуры для микрофонов определяют как отношение акустического импеданса при опорных условиях к акустическому импедансу при действительных статическом давлении и температуре соответственно.

D.3 Зависимость от статического давления

Масса и податливость заключенного в полости воздуха зависят от статического давления, тогда как сопротивление допускается считать независимым от статического давления. Коэффициент статического давления, как правило, зависит от частоты, как это показано на рисунке D.1. Для частот выше 0,5 f_0 (f_0 — резонансная частота микрофона) эти частотные изменения в значительной степени зависят от волнового движения в полости за неподвижным электродом. В общем, коэффициент статического давления зависит от конструкции деталей, определяющих форму неподвижного электрода и объема за ним (далее — задний объем), и их фактические значения могут значительно отличаться для двух микрофонов от разных производителей, несмотря на то, что микрофоны могут быть одного и того же типа, например LS1P. Поэтому коэффициенты статического давления, приведенные на рисунке D.1, не следует применять для любого микрофона.

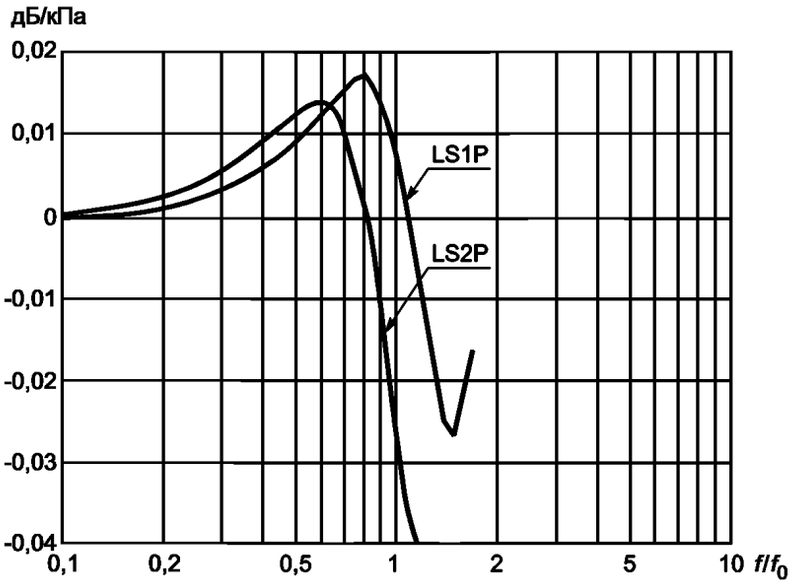


Рисунок D.1 — Зависимость коэффициентов статического давления микрофонов типов LS1P и LS2P от относительной частоты f/f_0

Значение коэффициента статического давления в области низких частот (как правило, на частоте 250 Гц) определяется соотношением между податливостями собственно мембраны и воздуха, заключенного за мембраной. Поскольку чувствительность по давлению в области низких частот определяется результирующей податливостью мембраны и слоя воздуха за мембраной, то коэффициент статического давления для индивидуальных образцов микрофона данного типа в значительной степени зависит от чувствительности микрофона на низкой частоте.

Значение коэффициента статического давления в области низких частот, как правило, находится в пределах от минус 0,01 до минус 0,02 дБ/кПа для микрофонов LS1P и от минус 0,003 до минус 0,008 дБ/кПа для микрофонов LS2P.

В области очень низких частот в полости за мембраной будет происходить изотермический процесс деформации газа, и поэтому податливость полости возрастет. Кроме того, повышается влияние отверстия для выравнивания давления. Этот эффект становится заметным на частотах ниже 2—5 Гц для микрофонов типов LS1 и LS2.

D.4 Зависимость от температуры

Как масса, так и сопротивление воздуха в замкнутой полости зависят от температуры, но податливость принято считать независимой от температуры. Типовая зависимость температурного коэффициента от частоты показана на рисунке D.2.

Изменения температуры воздействуют как на воздух в замкнутом объеме, так и на механические элементы микрофона. Изменение температуры вызывает изменение натяжения мембраны и, следовательно, изменяет ее податливость и расстояние между мембраной и неподвижным электродом. Это приведет к изменению чувствительности на постоянное значение и к небольшому изменению резонансной частоты.

Суммарный температурный коэффициент представляет собой результат линейной комбинации влияния как изменения импеданса замкнутого объема воздуха, так и изменения механического натяжения. Низкочастотное значение температурного коэффициента, как правило, находится в пределах ± 0,005 дБ/К для микрофонов типа как LS1P, так и LS2P. Температурный коэффициент, показанный на рисунке D.2, не следует применять для любого микрофона.

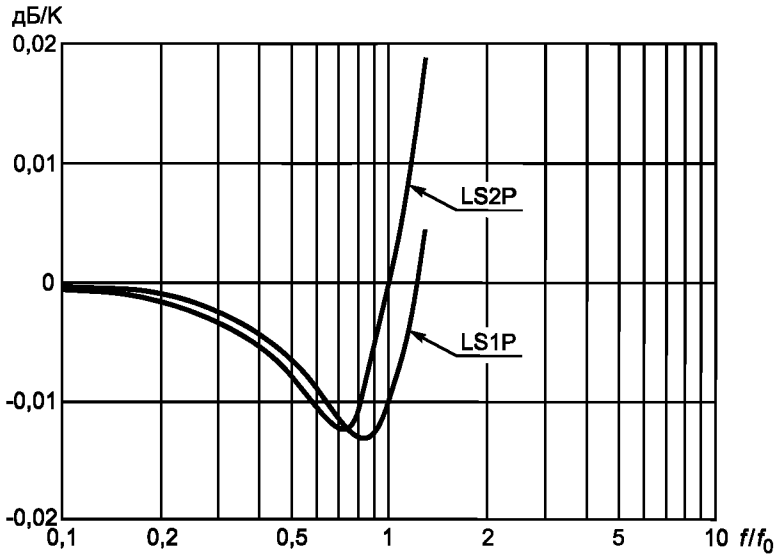


Рисунок D.2 — Общий вид зависимости температурного коэффициента от частоты для микрофонов типов LS1P и LS2P, вызванной изменением импеданса замкнутого объема воздуха

D.5 Библиография

[D.1] RASMUSSEN, K. The static pressure and temperature coefficients of laboratory standard microphones. Metrologia, 36, 1999, pp. 256—273

[D.2] KOSOBRODOV, R. and KUZNETSOV, S. Static pressure coefficients of laboratory standard microphones in the frequency range 2—250 Hz. 11th ICSV, 2004, St. Petersburg, Russia, pp. 1441—1448

Приложение Е
(справочное)

Методы определения параметров микрофона

Е.1 Общие сведения

Настоящее приложение содержит информацию о методах определения параметров микрофона, влияющих на акустический передаточный импеданс. К этим параметрам относятся глубина и объем передней полости и акустический импеданс микрофона.

Е.2 Глубина передней полости

Глубину передней полости определяют оптическими методами. Глубину определяют с помощью сканирующего интерферометра, например лазерного, по контуру вдоль диаметра мембраны и внешнего кольца. Такие измерения следует проводить, по крайней мере, для двух перпендикулярных друг к другу диаметров. Другой метод заключается в измерении с помощью микроскопа-глубиномера расстояния между точками на верхней части микрофонного кольца и точками на мембране. При этом необходимо выполнить несколько измерений, распределенных по мембране и по верху кольца.

Е.3 Объем передней полости и эквивалентный объем

Объем передней полости вместе с эквивалентным объемом микрофона определяют акустическими методами при опорных внешних условиях.

Испытуемый микрофон вставляют в одно из отверстий камеры связи с тремя входами. В два других отверстия вставляют два конденсаторных микрофона: первый — излучатель, второй — приемник. Измеряют электрический передаточный импеданс между этими двумя микрофонами, подсоединяя к камере связи поочередно испытуемый микрофон и некоторое число полостей с известным объемом, охватывающим действительный объем передней полости микрофона. Объем передней полости вместе с эквивалентным объемом микрофона определяют интерполяцией с измеренными передаточными импедансами.

Возможен вариант использования испытуемого микрофона в качестве микрофона-приемника. При измерении электрического передаточного импеданса необходимо обеспечить большое отношение сигнала к шуму. В этом случае используют либо различное число камер связи известного объема, либо изменение объема получают с помощью некоторого числа изготовленных для этой цели калиброванных колец, размещаемых между камерами связи и испытуемым микрофоном. Внутренние диаметры этих колец должны быть равны диаметру передней полости микрофона.

Необходимо учесть, что определяемый обоими методами объем включает в себя эквивалентный объем акустического импеданса мембраны (МЭК 61094-1).

Описанные выше методы могут быть использованы только на низких частотах, когда камеру связи рассматривают как чистую гибкость. При использовании второго метода необходимо компенсировать разность в поправках на теплопроводность и на капиллярные трубки при изменении объема камеры связи и по возможности рассмотреть влияние недостаточного отношения сигнала к шуму.

Е.4 Акустический импеданс микрофона

Акустический импеданс микрофона может быть выражен в виде комплексного импеданса или в виде комплексного эквивалентного объема (МЭК 61094-1). Допускают, что микрофон может быть представлен в виде четырехполюсника со сосредоточенными параметрами, описываемого уравнением взаимности (1а). Такое представление будет достаточно точным для определения $\underline{Z}_a$ (5.4) до частоты, приблизительно равной 1,3 частоты собственного резонанса микрофона.

Параметрами, описывающими акустический импеданс микрофона в эквивалентной электрической схеме, могут быть акустическая масса m_a, акустическая податливость c_a и акустическое сопротивление r_a или резонансная частота f_0, эквивалентный низкочастотный объем V_{eq} и декремент затухания мембраны d. Резонансная частота — это частота, при которой мнимая часть акустического импеданса $\underline{Z}_a$ равна нулю. Асимптотическое значение $\underline{Z}_a$ на низкой частоте определяют через податливость и эквивалентный объем. Действительную часть $\underline{Z}_a$ на резонансной частоте определяют через акустическое сопротивление и декремент затухания. Акустическую массу рассчитывают через резонансную частоту и акустическую податливость. Соотношения между этими параметрами следующие:

$$(2\pi f_0)^2 = (m_a \cdot c_a)^{-1};\ V_{eq} = c_a \gamma_{ref} p_{s,\,ref};\ d = r_a/(2\pi f_0 \cdot m_a) = r_a 2\pi f_0 \cdot c_a.$$

Акустический импеданс может быть определен косвенным методом, основанным на измерении электрической проводимости $\underline{Y}$ микрофона. При измерении электрической проводимости микрофон акустически нагружают на закрытый четвертьволновый отрезок трубы [$\underline{p} = 0$ в уравнении (1а)], а акустический импеданс микрофона затем рассчитывают из уравнения

$$\underline{Z}_a = \frac{\underline{Z}_{e,0} - \underline{Y}^{-1}}{\underline{M}_p^2}, \qquad (E.1)$$

где $\underline{Z}_{e,0}$ — электрический импеданс при заторможенной мембране, определяемый из результатов измерений, проведенных на достаточно высоких частотах (100—200 кГц), чтобы инерция мембраны эффективно препятствовала ее движению [$\underline{q}$ = 0 в уравнении (1а)].

Сосредоточенные параметры, представляющие акустический импеданс микрофона, могут быть также определены акустическими методами. При резонансе сдвиг фазы между звуковым давлением, действующим на мембрану, и напряжением холостого хода будет равен 90°. Эту частоту определяют, воздействуя на мембрану, нагруженную на закрытый четвертьволновый отрезок трубы, с помощью электростатического актюатора (электростатического возбудителя). При тех же условиях определяют декремент затухания как отношение чувствительности при резонансе к чувствительности на низкой частоте.

Третий метод основан на подгонке данных. Поскольку чувствительность микрофона не зависит от используемой для градуировки камеры связи, то градуировку проводят с помощью ряда плосковолновых камер, например четырех, имеющих разную длину [С.1 (приложение С)]. Для каждого микрофона сумму объемов передней полости и эквивалентного объема корректируют до тех пор, пока для всех камер не будет получена одна и та же чувствительность в диапазоне низких и средних частот. Этот метод описан в Е.3 (приложение Е). При разных длинах камер неверные значения трех сосредоточенных параметров, описывающих акустическое сопротивление микрофона, приводят к систематическим изменениям на высоких частотах. Влияние этих параметров на высоких частотах различно. Декремент затухания оказывает незначительное влияние на полученную чувствительность вблизи резонансной частоты, тогда как неверно определенная резонансная частота оказывает максимальное влияние. Неверное значение эквивалентного объема влияет главным образом на полученные характеристики чувствительности в диапазоне выше резонансной частоты. При определении комплексной чувствительности микрофона на резонансной частоте определяют чувствительность по фазе 90°.

Аналогичным образом может быть определен декремент затухания как отношение чувствительности при резонансе к асимптотическому значению чувствительности на низкой частоте. Однако при определении асимптотического значения чувствительности в области низких частот по низкочастотной характеристике необходимо пренебречь небольшим повышением чувствительности на низких частотах из-за теплопроводности в полости за мембраной микрофона. Для успешной подгонки данных важно, чтобы перед ее выполнением были введены поправки на радиальное волновое движение и были устранены другие систематические погрешности, такие как, например, перекрестные помехи.

Приложение F
(справочное)

Физические свойства влажного воздуха

F.1 Общие сведения

Некоторые физические величины, описывающие свойства газа в замкнутых камерах связи, входят в уравнения для расчета чувствительностей микрофонов [уравнения (3), (4) и приложения A, B]. Эти величины зависят от одной или нескольких переменных, описывающих внешние условия: статическое давление, температуру и влажность.

В литературе опубликовано множество результатов исследований, по которым могут быть найдены опорные значения величин для определенных внешних условий, например для стандартного по составу сухого воздуха при 0 °C и статическом давлении 101,325 кПа. Методика расчета свойств воздуха для заданных окружающих условий, описанная в настоящем приложении, основана на методах, рекомендованных международными органами, а также на последних результатах, описанных в литературе и получивших международное признание.

Уравнения, приведенные в настоящем приложении, основаны на следующих переменных, описывающих внешнюю среду:

t — температура в градусах Цельсия (°C);

p_s — статическое давление в паскалях (Па);

H — относительная влажность в процентах (%).

Рассчитываемые величины:

ρ — плотность воздуха в килограммах на кубический метр (кг · м$^{-3}$);

c — скорость звука для произвольной (расчетной) частоты в метрах в секунду (м · с$^{-1}$);

κ — отношение удельных теплоемкостей;

η — вязкость воздуха в паскаль-секундах (Па · с);

α_t — коэффициент температуропроводности воздуха в квадратных метрах в секунду (м^2 · с$^{-1}$).

Методика расчета предусматривает, что влажный воздух — не идеальный газ и что большинство величин описывают с помощью полиномов, для которых соответствующие постоянные коэффициенты приведены в таблице F.2. Для расчета вышеупомянутых величин используют некоторые дополнительные величины и постоянные:

$T = T_0 + t$, термодинамическая температура в градусах Кельвина (К);

$T_0 = 273{,}15$ К (0 °C);

$T_{20} = 293{,}15$ К (20 °C);

$p_{s,\,r} = 101\,325$ Па;

$p_{sv}(t)$ — давление насыщенного водяного пара в паскалях (Па);

c_0 — скорость звука на низкой частоте (в отсутствие дисперсии) в метрах в секунду (м · с$^{-1}$);

x_w — молярная доля паров воды в воздухе;

x_c — молярная доля углекислого газа в воздухе;

$f(p_s, t)$ — коэффициент расширения;

Z — коэффициент сжимаемости влажного воздуха;

k_a — удельная теплопроводность в джоулях на метр-секунду-кельвин в минус первой степени (Дж · м$^{-1}$ · с$^{-1}$ · К$^{-1}$);

C_p — удельная теплоемкость при постоянном давлении в джоулях на килограмм-кельвин в минус первой степени (Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$);

f_{rO} — частота релаксации кислорода в герцах (Гц);

f_{rN} — частота релаксации азота в герцах (Гц);

α_{vO} — коэффициент затухания для колебательной релаксации в кислороде в метрах в минус первой степени (м$^{-1}$);

α_{vN} — коэффициент затухания для колебательной релаксации в азоте в метрах в минус первой степени (м$^{-1}$).

Уравнения, используемые для расчета, справедливы для внешних условий в диапазоне:

- температура: от 15 °C до 27 °C;
- статическое давление: от 60 до 110 кПа;
- относительная влажность: от 10 % до 90 %.

Неопределенности значений, рассчитанных из уравнений, представляют собой стандартные неопределенности.

F.2 Плотность влажного воздуха

Плотность влажного воздуха вычисляют с помощью «уравнения CIPM-2007», согласно рекомендациям 97-го совещания CIPM [F.1].

$$\rho = [3{,}483\,740 + 1{,}4446(x_c - 0{,}000\,4)] \cdot 10^{-3}\,(1 - 0{,}378\,0\,x_w); \qquad \text{(F.1)}$$

где $Z = 1 - \frac{p_s}{T}\,[a_0 + a_{1t} + a_2 t^2 + (a_3 + a_4 t)x_w + (a_5 + a_6 t)x_w^2] + \frac{p_s^2}{T^2}\,(a_7 + a_8 x_w^2)$;

$$z_w = \frac{H}{100}\,\frac{p_{sv}(t)}{p_s} f(p_s, t);$$

$$p_{sv}(t) = \exp(a_0 T^2 + a_1 T + a_2 + a_3 T^{-1});$$

$$f(p_s, t) = a_0 + a_1 p_s + a_2 t^2.$$

Состав стандартного воздуха основан на молярной доле углекислого газа, составляющей 0,000 314. Общепринято, что в лабораторных условиях это значение более высокое, и в отсутствие непосредственных измерений молярной доли рекомендуется использовать значение $x_c = 0{,}000\,4$.

Относительную неопределенность расчета при использовании этого уравнения оценивают в $22 \cdot 10^{-6}$.

F.3 Скорость звука в воздухе

В отсутствие дисперсии скорость звука определяют как скорость звука на низкой частоте [F.2]:

$$c_0 = \alpha_0 + \alpha_1 t + \alpha_2 t^2 + (\alpha_3 + \alpha_4 t + \alpha_5 t^2) x_w + (\alpha_6 + \alpha_7 t + \alpha_8 t^2) p_s + (\alpha_9 + \alpha_{10} t + \alpha_{11} t^2) x_c + \alpha_{12} x_w^2 + \\ + \alpha_{13} p_s^2 + \alpha_{14} x_c^2 + \alpha_{15}\, x_w\, p_s\, x_c. \qquad \text{(F.2)}$$

Относительная неопределенность расчета скорости звука на низкой частоте составляет $3 \cdot 10^{-4}$.

Примечание — Скорость звука немного зависит от частоты из-за дисперсии в результате эффектов релаксации компонентов воздуха. В частотном диапазоне, соответствующем настоящему стандарту, влияние дисперсии на скорость меньше, чем относительная неопределенность расчета значения скорости звука на низкой частоте (F.2). Скорость звука на частоте измерения может быть получена из выражения в соответствии с (F.4)

$$\frac{1}{c} = \frac{1}{c_0} - \sum_n \frac{\alpha_{vn}}{2\pi f_{vn}},$$

где α_v и f_v — коэффициент затухания и частота релаксации;

n — обозначает компонент воздуха (азот или кислород). Значения этих величин приведены в [F.6].

Это уравнение может быть переписано в более приемлемой форме:

$$c = c_0 [1 + \sum \frac{c \cdot \alpha_{vn}}{2\pi f_{vn}}],$$

где произведение $c \cdot \alpha_{vn}$ не зависит от скорости звука c.

F.4 Отношение удельных теплоемкостей воздуха

Отношение удельных теплоемкостей определяют в соответствии с (F.2):

$$\kappa = \alpha_0 + \alpha_1 t + \alpha_2 t^2 + (\alpha_3 + \alpha_4 t + \alpha_5 t^2) x_w + (\alpha_6 + \alpha_7 t + \alpha_8 t^2) p_s + (\alpha_9 + \alpha_{10} t + \alpha_{11} t^2) x_c + \alpha_{12} x_w^2 + \alpha_{13} p_c^2 + \\ + \alpha_{14}\, x_c^2 + \alpha_{15}\, x_w\, p_s\, x_c. \qquad \text{(F.3)}$$

Относительная неопределенность расчета отношения удельных теплоемкостей составляет $3{,}2 \cdot 10^{-4}$.

F.5 Вязкость воздуха

Вязкость воздуха определяют в соответствии с [F.5]:

$$\eta = (\alpha_0 + \alpha_1 T + (\alpha_2 + \alpha_3 T)\, x_w + \alpha_4 T^2 + \alpha_5 x_w^2) \cdot 10^{-8}. \qquad \text{(F.41)}$$

F.6 Коэффициент температуропроводности воздуха

Коэффициент температуропроводности воздуха определяют выражением:

$$\alpha_t = \frac{k_a}{\rho C_p}, \qquad (F.5)$$

где $k_a = 4186{,}8\,[\alpha_0 + \alpha_1 T + \alpha_2 T^2 + (\alpha_3 + \alpha_4 T)\,x_w] \cdot 10^{-8}$;

$$C_p = 4186{,}8\,[\alpha_0 + \alpha_1 T + \alpha_2 T^2 + \alpha_3 T^3 + (\alpha_4 + \alpha_5 T + \alpha_6 T^2)\,x_w + (\alpha_7 + \alpha_8 T + \alpha_9 T^2)\,x_w^2\,].$$

F.7 Примеры

В таблице F.1 приведены значения величин, указанных в формулах F.1—F.5, для двух групп значений внешних условий. Значения в таблице применимы для тестовых программ, используемых для расчета этих величин, и поэтому результаты приведены с бóльшим числом значащих цифр, чем это необходимо в действительности. В таблице F.2 приведены коэффициенты, необходимые для расчета этих величин.

Таблица F.1 — Значения коэффициентов, указанных в F.1—F.5, для двух групп значений внешних условий

Внешние условия	Плотность воздуха ρ, кг· м$^{-3}$	Скорость звука c_0, м · с$^{-1}$	Отношение удельных теплоемкостей κ	Вязкость воздуха η, Па · с	Коэффициент температуропроводности воздуха α_t, м^2 · с$^{-1}$
t = 23 °C p_s = 101 325 Па H = 50 %	1,186 084 8	345,866 52	1,400 757 3	1,826 566 · 10^{-5}	2,115 317 · 10^{-5}
T = 20 °C p_s = 80 325 Па H = 65 %	0,944 158 9	344,382 67	1,400 026 6	1,811 295 · 10^{-5}	2,627 024 · 10^{-5}

Таблица F.2 — Коэффициенты, используемые в полиномах для расчета параметров влажного воздуха

Коэффициенты	Давление насыщенного водяного пара	Коэффициент расширения	Коэффициент сжимаемости	Скорость звука на низкой частоте	Отношение удельных теплоемкостей	Вязкость	Удельная теплопроводность	Удельная теплоемкость при постоянном давлении
Обозначение	p_{sv}	$f(p_S,t)$	Z	c_0	κ	η	k_a	C_p
α_0	$1{,}237\,884 \cdot 7 \cdot 10^{-5}$	1,000 62	$1{,}581\,23 \cdot 10^{-6}$	331,502 4	1,400 822	84,986	60,054	0,2510625
α_1	$-1{,}912\,131\,6 \cdot 10^{-2}$	$3{,}14 \cdot 10^{-8}$	$-2{,}933\,1 \cdot 10^{-8}$	0,603 055	$-1{,}75 \cdot 10^{-5}$	7,0	1,846	$-9{,}252\,5 \cdot 10^{-5}$
α_2	33,937 110 47	$5{,}6 \cdot 10^{-7}$	$1{,}104\,3 \cdot 10^{-10}$	–0,000 528	$-1{,}73 \cdot 10^{-7}$	113,157	$2{,}06 \cdot 10^{-6}$	$2{,}133\,4 \cdot 10^{-7}$
α_3	$-6{,}343\,164\,5 \cdot 10^{3}$		$5{,}707 \cdot 10^{-6}$	51,471 935	–0,087 362 9	–1	40	$-1{,}004\,3 \cdot 10^{-10}$
α_4			$-2{,}051 \cdot 10^{-8}$	0,149 5874	–0,000 166 5	$-3{,}750\,1 \cdot 10^{-3}$	$-1{,}775 \cdot 10^{-4}$	0,124 77
α_5			$1{,}989\,8 \cdot 10^{-4}$	–0,000 782	$-3{,}26 \cdot 10^{-6}$	–100,015		$-2{,}283 \cdot 10^{-5}$
α_6			$-2{,}376 \cdot 10^{-6}$	$-1{,}82 \cdot 10^{-7}$	$2{,}047 \cdot 10^{-8}$			$1{,}267 \cdot 10^{-7}$
α_7			$1{,}83 \cdot 10^{-11}$	$3{,}73 \cdot 10^{-8}$	$-1{,}26 \cdot 10^{-10}$			0,011 16
α_8			$-0{,}765 \cdot 10^{-8}$	$-2{,}93 \cdot 10^{-10}$	$5{,}939 \cdot 10^{-14}$			$4{,}61 \cdot 10^{-6}$
α_9				–85,209 31	–0,119 971 7			$1{,}74 \cdot 10^{-8}$
α_{10}				–0,228 525	–0,000 869 3			
α_{11}				$5{,}91 \cdot 10^{-5}$	$1{,}979 \cdot 10^{-6}$			
α_{12}				–2,835 149	–0,011 04			
α_{13}				$-2{,}15 \cdot 10^{-13}$	$-3{,}478 \cdot 10^{-16}$			
α_{14}				29,179 762	0,045 061 6			
α_{15}				0,000 486	$1{,}82 \cdot 10^{-6}$			

F.8 Библиография

[F.1] PICARD, A; DAVIS, R.S.; GLASER, A.M. and FUJII, K. *Revised formula for the density of moist air (CIPM-2007).* Metrologia 2008, 45, pp. 149—155

[F.2] CRAMER, O. *Variation of the specific heat ratio and the speed of sound with temperature, pressure, humidity and CO_2 concentration.* J. Acoust. Soc. Am., 93, 1993, pp. 2510—2516

[F.3] WONG, G. S. K. *Comment on Variation of the specific heat ratio and the speed of sound with temperature, pressure, humidity and CO_2 concentration. J. Acoust. Soc. Am., 93, 1993, pp. 2510—2516.* J. Acoust. Soc. Am., 97, pp. 3177—3179, 1995

[F.4] HOWELL, G.P. and MORFEY, C.L. *Frequency dependence of the speed of sound in air.* J. Acoust. Soc. Am., 82, 1987, pp. 375—377

[F.5] ZUCKERWAR, A.J. and MEREDITH, R.W. Low-frequency absorption of sound in air, J. Acoust. Soc. Am., 78, 1985, pp. 946—955

[F.6] ISO 9613-1:1993, *Acoustics-Attenuation of sound during propagation outdoors — Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere*

Приложение ДА
(справочное)

Сведения о соответствии ссылочных международных стандартов национальным стандартам

Таблица ДА.1

Обозначение ссылочного международного стандарта	Степень соответствия	Обозначение и наименование соответствующего национального стандарта
IEC 61094-1	—	*
ISO/IEC Guide 98-3		
* Соответствующий национальный стандарт отсутствует. До его принятия рекомендуется использовать перевод на русский язык данного международного стандарта.		

УДК 534.612.2.019:006.354 ОКС 17.140.50

Ключевые слова: эталонные микрофоны, метод взаимности, камера малого объема, акустический импеданс

Редактор *Н.Е. Рагузина*
Технический редактор *В.Н. Прусакова*
Корректор *Р.А. Ментова*
Компьютерная верстка *Е.А. Кондрашовой*

Сдано в набор 22.03.2019. Подписано в печать 13.05.2019. Формат 60×84⅛. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 4,18. Уч.-изд. л. 3,60.

Подготовлено на основе электронной версии, предоставленной разработчиком стандарта

Создано в единичном исполнении во ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ»
для комплектования Федерального информационного фонда стандартов,
117418 Москва, Нахимовский пр-т, д. 31, к. 2.

gost.e-ecolog.ru gost.e-ecolog.ru

gost.e-ecolog.ru