

Исследование метрологических характеристик Государственного первичного эталона единицы звукового давления в воздушной среде в диапазоне частот $2—25 \cdot 10^3$ Гц ГЭТ 19—2010

А. В. КОНЬКОВ, С. В. КУЗНЕЦОВ, С. Ю. КОЛЕСОВ

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, г.п. Менделеево, Московская обл., Россия, e-mail: akustika@vniiftri.ru

Рассмотрена структура и исследованы основные метрологические характеристики Государственного первичного эталона единицы звукового давления в воздушной среде в диапазоне частот $2—25 \cdot 10^3$ Гц (ГЭТ 19—2010). Приведены данные международных ключевых сличений CCAUV.A—K5. Результаты измерений, проведённых во ВНИИФТРИ, согласуются с результатами ведущих национальных метрологических институтов и подтверждают достоверность заявленных метрологических характеристик ГЭТ 19—2010.

Ключевые слова: государственный первичный эталон, метрологические характеристики, ключевые сличения.

The structure and basic metrological characteristics of the State primary measurement standard of the sound pressure unit in air at frequency range $2—25 \cdot 10^3$ Hz (GET 19—2010) are considered. The Key Comparison CCAUV.A—K5 data is given. The results of VNIIFTRI measurements are in agreement with the results of the leading national metrological institutions confirming the accuracy of the declared metrological characteristics of GET 19—2010.

Key words: primary national measurement standard, metrological characteristics, key comparisons.

Основной измеряемой величиной в акустике является звуковое давление. Звуковое давление измеряют с помощью микрофона, в котором лёгкая подвижная мембрана колеблется под воздействием звукового давления, и эти колебания преобразуются в электрическое напряжение. Коэффициент преобразования (чувствительность) микрофона контролируют экспериментально с использованием измерительных установок, передающих единицу звукового давления микрофонам при градуировке. В настоящее время наиболее точным методом градуировки микрофонов в диапазоне звуковых частот является метод взаимности по давлению в камерах малого объёма (КМО). Для этого метода разработаны и изготовлены специальные эталонные лабораторные микрофоны и камеры связи [1]. Метод стандартизован Международной электротехнической комиссией (МЭК) [2], в стандарте которой определены как геометрические размеры камер связи и микрофонов, так и стандартные справочные данные параметров окружающего воздуха, их зависимости от температуры, влажности, атмосферного давления и частоты возбуждаемого в камерах связи акустического давления. Данная информация необходима для получения наибольшей точности измерений.

В 1994 г. утверждён Государственный первичный эталон единицы звукового давления в воздушной среде в диапазоне частот $63—1 \cdot 10^4$ Гц (ГЭТ 19—94). В 1999 г. в Париже было подписано Соглашение о взаимном признании национальных эталонов и сертификатов калибровки и измерений, выдаваемых национальными метрологическими институтами [3]. Начало работам по реализации Соглашения положили ключевые сличения (КС) национальных эталонов в области воздушной акустики, организованные Консультативным

Комитетом по акустике, ультразвуку и вибрации (CCAUV) под эгидой Международного бюро мер и весов (МБМВ). В основу КС была положена градуировка лабораторных эталонных конденсаторных микрофонов типа 4160 (дюймовые) и 4180 (полудюймовые). Градуировку данных микрофонов, являющихся возимыми эталонами сравнения, проводили на национальных эталонных установках, реализующих первичный метод взаимности по давлению в соответствии с [2]. В 1999—2001 гг. были проведены первые КС CCAUV.A—K1 в диапазоне частот $63—8 \cdot 10^3$ Гц (микрофоны 4160). В 2003 г. состоялись КС CCAUV.A—K3 (микрофоны 4180) в диапазоне частот $31,5—31,5 \cdot 10^3$ Гц, а в 2004—2005 гг. КС CCAUV.A—K2 в низкочастотном диапазоне $2—250$ Гц. В результате сличений были выявлены расхождения на краях диапазонов (до 0,2 дБ), где в первую очередь большое влияние оказывают внешние условия. В результате возникает необходимость внесения определяемых расчётным методом поправок на волновое движение, охлаждающее влияние стенок камеры связи, параметры мембраны микрофонов вблизи резонансной частоты. Всё это потребовало совершенствования ГЭТ 19—94 с целью воспроизведения единицы звукового давления по методу взаимности. Для этого надо было изготовить сапфировые камеры разной длины и приобрести микрофонные капсулы без внутренней резьбы в предметном объёме, разработать и внедрить установку для поддержания атмосферного давления, равного опорному значению 101,325 кПа (760 мм рт. ст.). Совершенствованию эталона способствовала новая редакция стандарта [2], основанного на теоретических работах [4, 5].

В целях сокращения сроков совершенствования ГЭТ 19—94 было решено закупить установку типа 9699 фирмы «Брюль

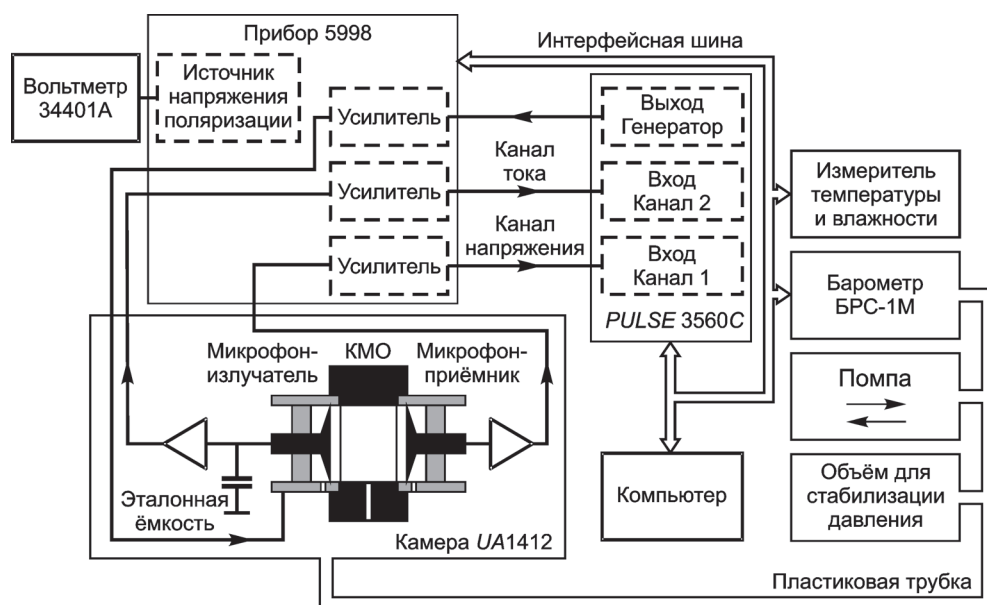


Рис. 1. Структурная схема измерительной цепи для воспроизведения единицы звукового давления по методу взаимности

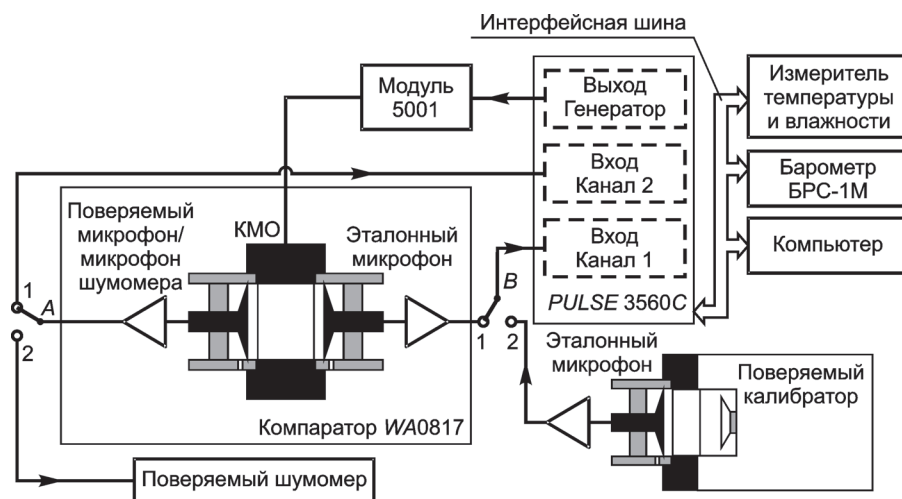


Рис. 2. Структурная схема измерительной цепи для передачи единицы звукового давления методом сличения с помощью компаратора и методом косвенных измерений

и Кьер» для градуировки микрофонов методом взаимности. Также были проведены работы по созданию и поддержанию в помещении, выделенном под эталон, температуры воздуха $(23,0 \pm 0,5)^\circ\text{C}$ и относительной влажности $(50 \pm 10)\%$. Данные условия являются опорными в акустических стандартах МЭК.

В 2010 г. утверждён Государственный первичный эталон единицы звукового давления в воздушной среде в диапазоне частот $2-25 \cdot 10^3$ Гц (ГЭТ 19—2010).

Состав ГЭТ 19—2010. Эталон состоит из средств измерений (СИ), функционально образующих измерительные цепи для воспроизведения (рис. 1) и передачи единицы звукового давления (рис. 2), комплекта эталонных микрофонов, устройства для определения глубины передней полости эталонных микрофонов и устройства для поддержания опорно-

го статического давления в измерительной камере. Эталонные микрофоны применяют для хранения единицы звукового давления, а также в качестве эталонов сравнения при проведении международных и региональных ключевых сличений.

Принцип работы ГЭТ 19—2010.

Воспроизведение единицы звукового давления. Воспроизведение единицы осуществляется по методу взаимности с использованием трёх микрофонов (преобразователей): вспомогательного, обратимого и градуируемого [2]. Из теоремы взаимности следует, что если один из преобразователей является линейным, пассивным и обратимым (взаимным), то для него отношение чувствительности в режиме приёма к чувствительности в режиме излучения равно постоянной величине H , называемой параметром взаимности. Параметр H зависит от свойств акустической среды и не зависит от типа и конструкции преобразователя. Для камеры малого объёма параметр H определяется следующей формулой:

$$H = \omega V / (\gamma p_a),$$

где ω — угловая частота; V — объём камеры; γ — отношение удельных теплоёмкостей воздуха в камере; p_a — атмосферное давление.

Воспроизведение единицы происходит в три этапа.

Этап 1. Вспомогательный преобразователь, возбуждаемый током $I_b^{(1)}$, создаёт в месте расположения градуируемого преобразователя звуковое давление, вызывающее на его выходе напряжение $U_r^{(1)}$.

Этап 2. Вспомогательный преобразователь, возбуждаемый током $I_b^{(2)}$, создаёт в месте расположения обратимого преобразователя звуковое давление, вызывающее на его выходе напряжение $U_o^{(2)}$.

Этап 3. Обратимый преобразователь, возбуждаемый током $I_o^{(3)}$, создаёт в месте расположения градуируемого преобразователя звуковое давление, вызывающее на его выходе напряжение $U_r^{(3)}$.

Воспроизводимое звуковое давление p_r , действующее на градуируемый преобразователь, определяется как

$$p_r = \sqrt{(U_o^{(2)} U_r^{(3)} / U_r^{(1)}) (I_o^{(3)} / H)} = p_a K. \quad (1)$$

Чувствительность по давлению M_r градуируемого преобразователя найдём по формуле

$$M_r = \sqrt{\left(U_r^{(1)} U_r^{(3)} / U_o^{(2)} \right) \left(H / I_o^{(3)} \right)} = K_1 U_r^{(3)} / p_r. \quad (2)$$

На практике ток $I_o^{(3)}$ измеряют через падение напряжения $U_o^{(3)}$ на эталонной ёмкости C_3 , соединённой последовательно с обратимым преобразователем. С учётом изложенного формулы (1), (2) запишем как

$$p_r = U_o^{(3)} \sqrt{p_a C_3 \gamma / V} \sqrt{\left(U_B^{(1)} / U_r^{(1)} \right) \left(U_o^{(2)} / U_B^{(2)} \right) \left(U_r^{(3)} / U_o^{(2)} \right)} =$$

$$= p_a U_o^{(3)} / \sqrt{V p_a (\gamma C_3)} \sqrt{\left(U_B^{(1)} / U_r^{(1)} \right) \left(U_o^{(2)} / U_B^{(2)} \right) \left(U_r^{(3)} / U_o^{(2)} \right)} = p_a K; \quad (3)$$

$$M_r = \sqrt{V / (p_a C_3 \gamma)} \sqrt{\left(U_r^{(1)} / U_B^{(1)} \right) \left(U_B^{(2)} / U_o^{(2)} \right) \left(U_r^{(3)} / U_o^{(2)} \right)} =$$

$$= U_r^{(3)} / p_a \sqrt{\left(U_r^{(1)} / U_B^{(1)} \right) \left(U_B^{(2)} / U_o^{(2)} \right) \left(U_r^{(3)} / U_o^{(2)} \right)} = K_1 U_r^{(3)} / p_r, \quad (4)$$

где K, K_1 — безразмерные коэффициенты.

В расчётные формулы (3), (4) вносят поправки на неадиабатичность процесса деформации газа из-за охлаждающего действия стенок камеры связи, на волновое распределение давления в камере и т. д. (всего 16 поправок, которые и обуславливают неисключённую систематическую погрешность (НСП) расчётов).

Окончательное значение чувствительности градуируемого преобразователя приводят к опорным внешним условиям, используя поправки на изменение чувствительности градуируемого преобразователя при изменении температуры и статического давления.

Хранение единицы звукового давления. Хранение единицы звукового давления осуществляется групповым эталонным сравнением, состоящим из капсулей лабораторных эталонных микрофонов 4160 и 4180 (по 6 шт. каждого типа), которые периодически (один раз в месяц) градуируют по методу взаимности на эталоне. Полученные результаты измерений сравнивают в конце года, и на основании этого делают вывод о нестабильности уровня чувствительности капсулей микрофонов и стабильности работы эталонной установки. Эти же капсули применяют при КС для подтверждения точностных характеристик эталона.

Передача единицы звукового давления рабочим эталонным микрофонам, акустическим калибраторам и шумомерам [6—8]. Передача единицы звукового давления осуществляется методом сличения с помощью компаратора звукового давления (для СИ, являющихся приёмниками звука) и методом косвенных измерений (для СИ, являющихся измерителями звукового давления и излучателями).

Передача единицы звукового давления методом сличения с помощью компаратора основана на одинаковом действии звукового давления на поверяемый и эталонный микрофоны (см. рис. 2, переключатели А, В находятся в положении 1).

Чувствительность M_n поверяемого микрофона определяется по формуле

$$M_n = M_3 U_n / U_3,$$

где M_3 — чувствительность эталонного микрофона; U_n, U_3 — напряжения на выходе поверяемого и эталонного микрофонов, соответственно.

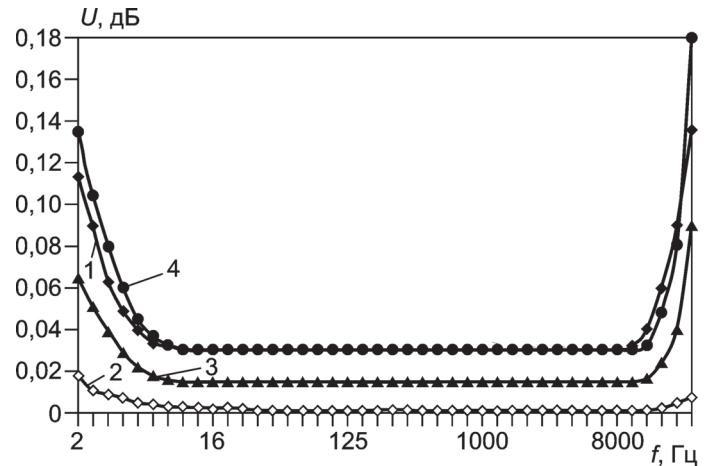


Рис. 3. Составляющие расширенной неопределённости: 1 — неисключённая систематическая погрешность; 2, 3 — стандартные неопределённости измерений по типам А, В, соответственно; 4 — расширенная неопределённость измерений ($P = 0,95$)

Передача единицы звукового давления методом косвенных измерений основана на том, что о действительном раз­ мере меры и измеряемой поверяемым СИ величины судят на основании прямых измерений величин, связанных с искомой величиной функциональной зависимостью (см. рис. 2, переключатель В находится в положении 2). Для СИ, являющихся излучателями звука, измеряют напряжение U_3 на выходе эталонного микрофона и рассчитывают звуковое давление p излучателя звука в соответствии с функциональной зависимостью

$$p = U_3 / M_3. \quad (5)$$

Для СИ, являющихся измерителями звукового давления (см. рис. 2, переключатель А находится в положении 2, переключатель В — в положении 1), определяют звуковое давление через чувствительность эталонного микрофона по формуле (5) и измеряют звуковое давление поверяемым прибором (измерителем звукового давления).

Метрологические характеристики ГЭТ 19—2010. Диапазон значений звукового давления, в котором воспроизводится единица, составляет 0,02—2 Па в диапазоне частот 2—25000 Гц. Составляющие расширенной неопределённости измерений U , итоговые результаты расчётов НСП воспроизведения единицы звукового давления показаны на рис. 3. Оценка НСП находится в пределах 0,03—0,14 дБ в зависимости от частоты при доверительной вероятности $P=0,99$. Оценка расширенной неопределённости измерений составляет 0,03—0,18 дБ в зависимости от частоты при коэффициенте охвата $k = 2$.

При передаче единицы звукового давления сличением с помощью компаратора для СИ, являющихся приёмниками звука (микрофоны, удовлетворяющие стандартам [1], [6]), среднее квадратическое отклонение (СКО) S_ϵ результата отдельного измерения при 10 независимых наблюдениях на частотах 250 и 1000 Гц не превышает 0,004 дБ; СКО S_{Σ} суммы случайной и неисключённой систематической составляющих погрешности метода и средств передачи единицы звукового давления не превышает 0,07 дБ. Для СИ, являющихся излучателями звука (калибраторы и пистонфоны, удов-

Результаты международных ключевых сличений

Страна	251,189 Гц				1000 Гц			
	Микрофон № 811012		Микрофон № 2652754		Микрофон № 811012		Микрофон № 2652754	
	D_i , дБ	U_i , дБ	D_i , дБ	U_i , дБ	D_i , дБ	U_i , дБ	D_i , дБ	U_i , дБ
Великобритания	-0,0118	0,0288	0,0018	0,0287	-0,0097	0,0289	0,0012	0,0288
Дания	-0,0028	0,0181	0,0073	0,0123	0,0003	0,0127	0,0127	0,0124
Польша	-0,0018	0,0288	-0,0260	0,0287	-0,0097	0,0289	-0,0266	0,0288
Китай	0,0082	0,0288	-0,0107	0,0288	0,0103	0,0289	-0,0113	0,0288
Бразилия	0,0072	0,0391	0,0050	0,0392	0,0023	0,0392	0,0013	0,0392
Мексика	-0,0078	0,0288	-0,0094	0,0290	-0,0097	0,0289	-0,0100	0,0290
Италия	0,0052	0,0288	-0,0023	0,0292	0,0003	0,0289	-0,0029	0,0291
ЮАР	0,0182	0,0391	0,0198	0,0395	0,0203	0,0392	0,0092	0,0394
Республика Корея	0,0082	0,0181	0,0023	0,0192	0,0103	0,0184	0,0017	0,0190
Канада	-0,0318	0,0391	-0,0252	0,0398	-0,0297	0,0392	-0,0259	0,0396
Россия	0,0032	0,0329	0,0144	0,0343	-0,0027	0,0331	-0,0063	0,0340
Япония	-0,0118	0,0391	0,0083	0,0108	0,0003	0,0392	0,0075	0,0404

летворяющие стандарту [7]), при передаче единицы звукового давления методом косвенных измерений S_e не превышает 0,004 дБ; $S_{e\Sigma}$ не превышает 0,09 дБ. Для СИ, являющихся измерителями звукового давления (шумомеры с характеристикой Lin по стандарту [8]), при передаче единицы звукового давления методом косвенных измерений S_e на частоте 1000 Гц не превышает 0,04 дБ; $S_{e\Sigma}$ не превышает 0,09 дБ.

В результате исследований установлено, что долговременная нестабильность в течение года не превышает 0,02 дБ/год.

Международные ключевые сличения CCAUV.A—K5. В 2011—2012 гг. состоялись КС CCAUV.A—K5 в диапазоне частот 2—1·10⁴ Гц (микрофоны 4160), в котором приняли участие 12 стран от всех региональных организаций [9]. В таблице представлены степень эквивалентности D_i и расширенная неопределённость U_i относительно средневзвешенного опорного значения уровня чувствительности двух микрофонов для всех стран, принимавших участие в КС, для опор-

ных частот 251; 189 и 1000 Гц. Отклонения измеренного уровня чувствительности микрофона 4160 № 811012 — эталона сравнения от средневзвешенного опорного уровня во всем диапазоне частот КС показаны на рис. 4 для пяти стран: Великобритании, Дании, Китая, России и Японии.

Результаты КС подтверждают достоверность заявленных ВНИИФТРИ метрологических характеристик ГЭТ 19—2010. Эталон не уступает уровню национальных эталонов промышленно развитых стран.

Литература

1. **IEC 61094-1:2000.** Electroacoustics — Measurement Microphones — Part 1: Specifications for laboratory standard microphones.
2. **IEC 61094-2:2009.** Electroacoustics — Measurement Microphones — Part 2: Primary method for pressure calibration of laboratory standard microphones by the reciprocity technique.
3. **МИ 3292—2010.** Рекомендация ГСИ. Порядок реализации метрологическими институтами Росстандарта Соглашения о взаимном признании национальных эталонов и сертификатов калибровки и измерений, выдаваемых национальными метрологическими институтами.
4. **Kosobrodov R., Kuznetsov S.** Acoustic Transfer Impedance of Plane-Wave Couplers // Acta Acustica united with Acustica. 2006. V. 92. P. 513—520.
5. **Kosobrodov R., Kuznetsov S.** Static pressure coefficients of laboratory standard microphones in the frequency range 2—250 Hz // 11th ICSV. St. Petersburg, Russia. 2004. P. 1441—1448.
6. **IEC 61094-4:1995.** Electroacoustics — Measurement Microphones — Part 4: Specifications for working standard microphones.
7. **IEC 60942:2003.** Electroacoustics — Sound calibrators.
8. **IEC 61672-1:2013.** Electroacoustics — Sound level meters — Part 1: Specifications.
9. **NPL REPORT AC 11.** Report on key comparison CCAUV.A-K5: Pressure calibration of laboratory standard microphones in the frequency range 2 Hz to 10 kHz.

Дата принятия: 21.07.2016.

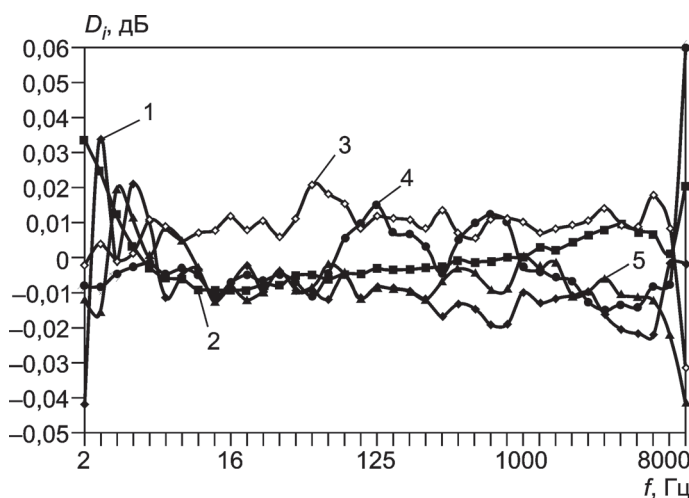


Рис. 4. Отклонения измеренного уровня чувствительности микрофона 4160 № 811012 от средневзвешенного опорного уровня по результатам следующих стран:

1 — Великобритания; 2 — Дания; 3 — Китай; 4 — Российская Федерация; 5 — Япония