

Государственный первичный специальный эталон единицы звукового давления в водной среде

А. Е. ИСАЕВ, А. Н. МАТВЕЕВ, Г. С. НЕКРИЧ, С. Ф. НЕКРИЧ, С. В. СИЛЬВЕСТРОВ,
И. В. ЧЕРНИКОВ, А. И. ЩЕЛКУНОВ, Н. Г. ЩЕРБЛЮК

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Менделеево, Россия, e-mail: nekrich53@mail.ru

Приведены характеристики новых измерительных установок, введенных в состав государственного первичного специального эталона для воспроизведения и передачи единицы звукового давления в водной среде. Рассмотрены принципы действия установок, результаты исследований метрологических характеристик.

Ключевые слова: гидроакустические измерения, эталон, звуковое давление.

The characteristics of new measurement facilities entered into the composition of special state primary standard for reproduction and transfer of the sound pressure unit in water are presented. The operating principles of facilities and the results of metrological characteristics study are considered.

Key words: underwater acoustic measurements, standard, sound pressure.

В период с 2008 по 2011 гг. были продолжены работы по совершенствованию государственного первичного специального эталона единицы звукового давления в водной среде ГЭТ 55—2008 [1]. В результате были созданы современные автоматизированные эталонные установки: Э-4 для диапазона частот $1,0 \cdot 10^3$ — $2,5 \cdot 10^5$ Гц (взамен комплекса К-3) и Э-5 для диапазона частот $1,6 \cdot 10^5$ — $1,0 \cdot 10^6$ Гц (взамен комплекса К-4). Установки Э-4, Э-5 предназначены для воспроизведения единицы звукового давления в водной среде в свободном поле. Создание указанных установок позволило снизить погрешность и расширить частотный диапазон воспроизведения звукового давления в свободном поле в область низких частот, а также обеспечить больший диапазон частотного перекрытия эталонных установок.

Установки Э-4, Э-5 воспроизводят единицу звукового давления в условиях большого $10 \times 6 \times 6$ м и малого $1,5 \times 1 \times 1$ м незаглушенных гидроакустических бассейнов методом взаимности в свободном поле с использованием трех преобразователей. Для реализации условий свободного поля при измерениях применены метод временной селекции прямого сигнала излучателя и техника излучения и приема тональных импульсов [2].

Звуковое давление на расстоянии 1 м от обратимого преобразователя вычисляют по формуле

$$p = I_{\text{оп}} S_{\text{оп}},$$

где $I_{\text{оп}}$, $S_{\text{оп}}$ — соответственно сила электрического тока и чувствительность обратимого преобразователя.

Силу электрического тока $I_{\text{оп}}$ находят по падению напряжения U_R на резисторе R в цепи обратимого преобразователя. Чувствительность в режиме излучения определяют на основе теоремы взаимности:

$$S_{\text{оп}} = \left[\frac{\rho f R U_{\text{оп-г}} U_{\text{и-оп}} d_{\text{оп-г}} d_{\text{и-оп}}}{2 U_R U_{\text{и-г}} d_{\text{и-г}}} \right]^{1/2},$$

где ρ — плотность воды; f — частота; $d_{\text{оп-г}}$, $d_{\text{и-г}}$, $d_{\text{и-оп}}$ — расстояния между парами, образованными из трех преобразователей, соответственно обратимого преобразователя, гидрофона и излучателя; $U_{\text{оп-г}}$, $U_{\text{и-оп}}$, $U_{\text{и-г}}$ — напряжения на выходе измерительного тракта для каждой пары излучатель—приемник.

Особенность метода взаимности состоит в возможности наряду с чувствительностью обратимого преобразователя $S_{\text{оп}}$ также определять чувствительность гидрофона на прием

$$M_{\text{г}} = \left[\frac{2 R U_{\text{и-г}} U_{\text{оп-г}} d_{\text{и-г}} d_{\text{оп-г}}}{\rho f U_R U_{\text{и-оп}} d_{\text{и-оп}}} \right]^{1/2}.$$

При передаче единицы звукового давления учитывается чувствительность гидрофона, отградуированного на эталоне.

Исследования эталонных установок включали оценки неисключенной систематической погрешности (НСП) воспроизведения и передачи единицы звукового давления, среднего квадратического отклонения (СКО) при 12 независимых наблюдениях, неопределенностей результатов измерений на эталоне; сличения установок эталона на частотах перекрытия; международные сличения. При расчете НСП и СКО руководствовались рекомендациями [3—5].

Описание установок. Рабочий частотный диапазон установки Э-4 условно разбит на поддиапазоны 1—6,3; 5—63; 50—250 кГц. Комплект излучателей и обратимых преобразователей установки состоит из трех пар преобразователей. Бескорпусные преобразователи выполнены на основе пьезоэлектрических сфер диаметром 100; 20 и 5 мм. Внешний вид преобразователей представлен на рис. 1.

На координатном устройстве одновременно устанавливают до трех наборов излучателей и обратимых преобразователей, что дает возможность градуировать гидрофон во



Рис. 1. Измерительные преобразователи установки Э-4 с активными элементами разных диаметров: 100; 20 и 5 мм

всем его частотном диапазоне без дополнительных переустановок. Это позволяет избежать дополнительных погрешностей, связанных с юстировкой преобразователей по глубине и угловому положению; нарушением их смачивания; выравниванием температуры преобразователей с температурой воды; захватом пузырьков воздуха с загрязненной водной поверхности, значительными временными разрывами в процессе измерений, увеличивающими возможность изменения условий измерений.

Рабочий частотный диапазон установки Э-5 условно разбит на поддиапазоны 160—400 и 400—1000 кГц. Комплект излучателей и обратимых преобразователей установки состоит из двух пар преобразователей типов ГГ37, ГЦ1,5 и ГГ30, выполненных на основе пьезоэлектрических сфер и цилиндров диаметрами 5; 1,5 и 1 мм, соответственно (рис. 2).

Исходная формула для расчета звукового давления, воспроизводимого по методу взаимности в месте расположения гидрофона при работе обратимого преобразователя, имеет вид

$$p = U_{\text{оп-г}} K_0 \left[\frac{p f U_R U_{\text{и-оп}} d_{\text{и-оп}}}{2 R U_{\text{оп-г}} U_{\text{и-г}} d_{\text{оп-г}} d_{\text{и-г}}} \right]^{1/2},$$

где K_0 — коэффициент калибровки измерительного тракта по напряжению.

В качестве независимых источников погрешности воспроизведения единицы звукового давления в свободном поле в условиях незаглушенного гидроакустического бассейна рассматривали и оценивали следующие факторы: отклонение распределения звукового поля от закона $pr = \text{const}$; погрешности измерений коэффициентов усиления и калибровки измерительного тракта, выходного напряжения преобразо-



Рис. 2. Измерительные преобразователи установки Э-5 различных типов

вателя в режиме холостого хода, сопротивления в цепи обратимого преобразователя, расстояния между преобразователями; влияние интерференции на сигнал вследствие отражений и рассеяния волны креплениями гидрофона; искажение сигнала переходным процессом; электрический шум, включающий высокочастотную наводку; погрешности задания частоты и определения плотности воды; влияние направленности преобразователей; неисключенные остатки перекрестной помехи.

Составляющие погрешностей измерений на установках Э-4 и Э-5 приведены в табл. 1.

Таблица 1

Составляющие погрешностей измерений на установках Э-4 и Э-5

Источник погрешности	Значение погрешности, %	
	Э-4	Э-5
Определение плотности воды	0,1	0,1
Задание частоты генератора	0,01	0,01
Измерение напряжения	0,1—0,4	0,4—1,1
Измерение расстояния	0,5	0,5
Измерение сопротивления резистора	0,2—0,5	0,2—0,5
Влияние шума	0,1—0,4	0,1—0,2
Отклонение зависимости звукового давления от закона $pr = \text{const}$	1,0—2,0	1,0—3,0
Измерение отношения напряжений	0,2—0,6	0,2—0,6
Влияние перекрестной помехи	0,1—0,5	—
Влияние направленности преобразователей	0,2—0,6	0,6—0,9
НСП	2,6—3,0	2,6—4,0
СКО	0,5	1,0

Результаты международных сличений. Между ВНИИФТРИ и Ханчжоуским НИИ прикладной акустики (HAARI, Китай) были проведены пилотные сличения результатов калибровок гидрофонов в частотном диапазоне 250 Гц—200 кГц. Сличения зарегистрированы КООМЕТ как проект 473/RU/09.

В качестве эталонных гидрофонов сличений HAARI подготовил и предоставил два гидрофона B&K 8104 и TC 4033. Сходимость результатов калибровок обоих гидрофонов оценены очень высоко. Для гидрофона B&K 8104 при расширенной (коэффициент охвата $k = 2$) неопределенности измерений 0,6 дБ методом вибрирующего столба жидкости, рассчитанной в HAARI, и расширенной ($k = 2$) неопределенности калибровки по полю 0,7 дБ методом сличения с использованием техники СКВУ [6], оцененной во ВНИИФТРИ, максимальное расхождение результатов не превышает 0,4 дБ. Максимальное расхождение результатов для гидрофона TC 4033 (HAARI) не превышает 0,4 дБ при расширенной ($k = 2$) неопределенности измерений методом взаимности в свободном поле; 0,7 дБ на частотах ниже 100 кГц; 0,9 дБ на частотах в диапазоне 100—200 кГц и 0,6 дБ при расширенной неопределенности ($k = 2$) измерений методом взаимности во ВНИИФТРИ.

Результаты российско-китайских сличений в указанном диапазоне частот были доложены и одобрены на VII сессии

Таблица 2

Метрологические характеристики государственного первичного специального эталона единицы звукового давления ГЭТ 55—2011

Характеристика	Значение характеристики для установки				
	Э-1	Э-2	Э-3	Э-4	Э-5
Звуковое давление, Па	80—100	0,5—1000	20—50	10—200	50—250
Диапазон частот, Гц	0,001—1	0,5—2000	0,5—500	$1 \cdot 10^3$ — $2,5 \cdot 10^5$	$1,6 \cdot 10^5$ — $1 \cdot 10^6$
СКО	$0,2 \cdot 10^{-2}$ (до 0,63 Гц) $1,0 \cdot 10^{-2}$ (до 1,0 Гц)	$0,5 \cdot 10^{-2}$	$0,7 \cdot 10^{-2}$	$0,5 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$
НСП	$1,0 \cdot 10^{-2}$ (до 0,63 Гц) $1,9 \cdot 10^{-2}$ (до 1,0 Гц)	$2,0 \cdot 10^{-2}$ (до 1000 Гц) $2,8 \cdot 10^{-2}$ (до 2000 Гц)	$2,4 \cdot 10^{-2}$	$3,0 \cdot 10^{-2}$	$4,0 \cdot 10^{-2}$

Таблица 3

Неопределенность измерений на эталоне ГЭТ 55—2011

Неопределенность	Значение неопределенности для установок				
	Э-1	Э-2	Э-3	Э-4	Э-5
Стандартная по типу А, не более	$0,2 \cdot 10^{-2}$ (до 0,63 Гц) $1,0 \cdot 10^{-2}$ (до 1,0 Гц)	$0,5 \cdot 10^{-2}$	$0,7 \cdot 10^{-2}$	$0,5 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$
Стандартная по типу В, не более	$0,5 \cdot 10^{-2}$ (до 0,63 Гц) $0,8 \cdot 10^{-2}$ (до 1,0 Гц)	$0,8 \cdot 10^{-2}$ (до 1000 Гц) $1,1 \cdot 10^{-2}$ (до 2000 Гц)	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$1,7 \cdot 10^{-2}$
Суммарная, не более	$0,6 \cdot 10^{-2}$ (до 0,63 Гц) $1,3 \cdot 10^{-2}$ (до 1,0 Гц)	$0,9 \cdot 10^{-2}$ (до 1000 Гц) $1,2 \cdot 10^{-2}$ (до 2000 Гц)	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$1,9 \cdot 10^{-2}$
Расширенная при $k = 2$, не более	$1,1 \cdot 10^{-2}$ (до 0,63 Гц) $2,5 \cdot 10^{-2}$ (до 1,0 Гц)	$1,9 \cdot 10^{-2}$ (до 1000 Гц) $2,5 \cdot 10^{-2}$ (до 2000 Гц)	$2,4 \cdot 10^{-2}$	$2,7 \cdot 10^{-2}$	$3,8 \cdot 10^{-2}$

Консультативного Комитета по акустике, ультразвуку и вибрациям при МБМВ в октябре 2010 г. [7]

Результаты сличений установок эталона. Расхождения при сличении установок эталона, реализующих независимые методы измерений, в диапазоне частот перекрытия методов не выходили за пределы расчетных значений неопределенности измерений. Расхождение не превышало 2,5 % для установок Э-2, Э-4 и 3,0 % для установок Э-4, Э-5.

В рамках работ по совершенствованию эталона вместе со стандартом [8] и с учетом изменения метрологических характеристик эталона был разработан проект межгосударственной поверочной схемы для средств измерений звукового давления в водной среде, которая устанавливает порядок передачи единицы звукового давления в диапазоне частот 10^{-3} Гц — 1 МГц.

Метрологические характеристики государственного первичного специального эталона единицы звукового давления ГЭТ 55—2011, утвержденного Росстандартом 12 мая 2012 г., приведены в табл. 2. Неопределенности измерений на эталоне указаны в табл. 3. Расширен нижний частотный диапазон передачи единицы звукового давления в свободном поле с 3,15 до 1 кГц. Полностью переработаны и заменены электронные блоки и узлы установок для диапазона частот 1 кГц — 1 МГц, программное обеспечение и вычислительная техника, координатно-поворотные устройства. По метрологическим характеристикам эталон соответствует лучшим зарубежным аналогам.

Перспективы дальнейшего совершенствования первичного эталона. Анализ результатов международных сличений и тенденций развития рабочих средств измерений

выявил основные направления развития гидроакустических эталонов:

измерение комплексных частотных характеристик на непрерывной сетке частот;

использование сигналов со сложным спектром;

измерение частотной характеристики в полосе частот (1/3 октавы и др.);

измерение частотной характеристики крупногабаритных измерительных гидроакустических модулей в лабораторных гидроакустических бассейнах и высокоточных гидрофонов в условиях, имитирующих глубины до 1500 м, в диапазоне температур 2—30 °С;

исследование влияния конструкций гидроакустических модулей и элементов крепления на чувствительность измерительных гидрофонов;

измерение чувствительности и характеристик направленности протяженных гидроакустических антенн и цепочек гидрофонов;

реконструкция диаграммы направленности и чувствительности крупногабаритных приемных и излучающих систем по измерениям в ближней и переходной зонах.

Л и т е р а т у р а

1. **Исаев А. Е. и др.** Модернизированный государственный первичный специальный эталон единицы звукового давления в водной среде // Измерительная техника. 2010. № 5. С. 5—8; **Isaev A. E. et al.** Modernized national primary special standard for the unit of acoustic pressure in water media // Measurement Techniques. 2010. V. 53. N 5. P. 465—470.

2. Исаев А. Е. Точная градуировка приемников звукового давления в водной среде в условиях свободного поля. Менделеево: Изд-во ВНИИФТРИ, 2008.

3. ГОСТ 8.207—76. ГСИ. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения.

4. ГОСТ 8.381—2009. ГСИ. Эталоны. Способы выражения точности.

5. РМГ 43—2001. ГСИ. Применение «Руководства по выражению неопределенности измерения».

6. Еняков А. М. и др. Российско-китайские пилотные сличения результатов калибровок гидрофонов в диапазоне частот 250 Гц — 200 кГц// Измерительная техника. 2011. № 11. С. 66—69.

7. Wang Yuebing e. a. Report on the COOMET pilot Comparison 473/RU/09: Calibration of hydrophones in the frequency range from 250 Hz TO 200 kHz//CCAUV/08-10.2010.

8. ГОСТ Р 8.727—2010. ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений звукового давления в водной среде в диапазоне частот $1 \cdot 10^{-2}$ — $1 \cdot 10^6$ Гц.

Дата принятия 08.04.2013 г.

534.221:53.089.68:620.179.16

Государственный первичный эталон единиц скоростей распространения продольных, сдвиговых и поверхностных ультразвуковых волн в твердых средах

П. В. БАЗЫЛЕВ, А. В. ИЗOTOV, А. И. КОНДРАТЬЕВ, В. А. ЛУГОВОЙ,
К. Н. ОКИШЕВ

Дальневосточный филиал Всероссийского научно-исследовательского института физико-технических и радиотехнических измерений, Хабаровск, Россия,
e-mail: bazylev@dfvniiftri.ru, lugovoy@dst.khv.ru

Рассмотрены результаты совершенствования национального эталона единицы скорости распространения продольных ультразвуковых волн в твердых средах. Описаны методы измерений и эталонные меры скорости. Приведены состав нового эталона и его метрологические характеристики.

Ключевые слова: государственный первичный эталон, ультразвуковые волны, лазерно-интерференционный метод, воспроизведение и передача единицы.

The results of improvement of national standard of longitudinal ultrasonic waves velocity in solids are considered. The measurement methods and the velocity standard measures are described. The metrological characteristics and the standard composition are given.

Key words: national primary standard, ultrasonic waves, laser interference method, unit reproduction and transfer.

В соответствии с научно-технической программой «Эталоны России» и планом мероприятий по внедрению государственного первичного эталона единицы скорости распространения продольных ультразвуковых волн в твердых средах ГЭТ 189—2010 [1] в Дальневосточном филиале ВНИИФТРИ в период 2010—2012 гг. проведены работы по совершенствованию эталона, заключающиеся в разработке и введению в его состав двух новых эталонных установок для измерений скоростей распространения сдвиговых и поверхностных ультразвуковых (УЗ) волн в твердых средах. Таким образом, новый государственный первичный эталон (ГПЭ) ГЭТ 189—2012 обеспечивает единство измерений скоростей распространения основных типов акустических волн в твердых средах. Эталон возглавляет государственную поверочную схему для средств измерений (СИ) скорости распространения УЗ-волн в твердых средах, устанавливающую порядок передачи воспроизводимых единиц рабочим эталонам и СИ.

Потребность в измерениях параметров распространения УЗ-волн в твердых средах определяется задачами как фундаментальных, так и прикладных исследований. В фундаментальных исследованиях через параметры распространения УЗ-волн в твердых средах рассчитываются упругие постоянные и модули упругости — важнейшие характеристики твердого тела [2]. Эти параметры требуются также для определения физико-механических характеристик, прочностных свойств твердых сред и имеют важнейшее значение при создании новых материалов, отработке технологий их получения и внедрении в технические разработки и производство. Однако, прежде всего, потребность в измерениях скорости распространения УЗ-волн связана с необходимостью обеспечения единства измерений в области неразрушающего контроля качества материалов и изделий с использованием акустических методов и СИ.

Анализ отечественной и зарубежной литературы в данной области измерений показывает, что наиболее перспек-