

УДК 006.91:534.6

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО ЭТАЛОНА ГЭТ 55-2017

С.Ф. Некрич

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская область
nekrich@vniiftri.ru

В статье приводятся сведения о развитии во ВНИИФТРИ гидроакустического эталона и его метрологические характеристики. Обсуждаются результаты сличений и перспективы дальнейшего развития эталона.

The article provides information on the development of the hydroacoustic standard in VNIIFTRI and its metrological characteristics. The results of comparisons and prospects for the further development of the standard are discussed.

Ключевые слова: гидроакустический эталон, метрологические характеристики, сличения, перспективы.

Key words: hydroacoustic standard, metrological characteristics, comparisons, prospects.

Введение

За последние 40 лет во ВНИИФТРИ был разработан ряд новых оригинальных методов градуировки гидрофонов: пьезокомпенсации, гидростатический и модифицированный метод взаимности в камерах малого объема [1–3]. Они были внедрены в Государственные специальные эталоны ГЭТ 55-74, ГЭТ 103-76 и ГЭТ 55-91. Основные исторические сведения о развитии эталона звукового давления в водной среде и результаты сличений с национальными эталонами ведущих стран мира до 2006 года приведены в [4].

В 2006–2008 гг. ВНИИФТРИ провёл работы по совершенствованию ГЭТ 55-91 — созданию ГЭТ 55-2008. В результате этой работы был расширен частотный диапазон эталона в части установки на гидростатическом методе в область низких частот с 10^{-2} до 10^{-3} Гц и добавлена установка Э-3 для воспроизведения и передачи размера единицы звукового давления при избыточном гидростатическом давлении. В Э-3 реализован модифицированный метод взаимности в камере малого объема при избыточном гидростатическом давлении от 0,5 до 50 МПа в диапазоне частот от 0,5 до $5 \cdot 10^2$ Гц. Установка Э-3 обеспечила проведение градуировок гидрофонов в диапазоне их рабочих гидростатических давлений, что существенно повысило точность при проведении глубоководных измерений.

Совершенствование методик измерения в условиях свободного поля

В период с 2009 по 2011 г. были продолжены работы по совершенствованию эталона, основное внимание было направлено на расширение возмож-

ностей градуировки по полю [5–6]: устранению ограничений тонально-импульсного метода, традиционно применяемого в эталонах.

Проведённая оптимизация излучения и приёма (в частности применение в эталоне техники когерентного накопления тональных импульсов) существенно уменьшила дополнительные искажения измерительного сигнала переходными процессами и случайную погрешность измерений. Новая измерительная процедура позволила уменьшить обусловленную рассеянием составляющую погрешности градуировки в 4–6 раз в сравнении со стандартной процедурой метода взаимности. Использование сигналов с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) позволило существенно расширить возможности эталона. Разработан новый способ градуировки гидрофонов по полю в бассейне с отражающими границами, заключающийся в оценивании передаточного импеданса пары излучатель—приёмник в свободном поле скольльзящим комплексным взвешенным усреднением (СКВУ) частотной зависимости, полученной при излучении продолжительных квадратурно дополненных ЛЧМ сигналов. Разработаны способы повышения точности измерений частотной зависимости передаточного импеданса пары излучатель—приёмник по полю за счёт привлечения дополнительной (априорной либо полученной в ходе измерительного эксперимента) информации о поведении искомой зависимости. Учёт в редактирующей функции комплексных частотной характеристики излучения и частотной зависимости тока излучателя позволил уменьшить частоту измерений по полю в бассейне с минимальным размером 6 м до 250 Гц.

Стало возможным воспроизведение и передача единицы звукового давления на любой заданной частоте, что обеспечило выполнение требований, предъявляемых к участникам международных сличений. В результате усовершенствования Государственного первичного эталона неисключённая систематическая погрешность воспроизведения и передачи единицы в диапазоне частот 0,2–1 МГц снижена с 6 до 4 %. 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 Э-4 и Э-5 на диапазон частот 1–1000 кГц, программное обеспечение и вычислительная техника, координатно-поворотные устройства [7].

Разработанный программно-аппаратный комплекс и технические решения позволили провести первые международные сличения низкочастотных (от 250 Гц) калибровок гидрофонов по полю (российско-китайские пилотные сличения 473/RU/09 и 531/RU/11). При сличениях применялись как метод СКВУ, так и тонально-импульсный метод.

Сходимость результатов калибровок гидрофонов (сличение 473/RU/09) оценена как очень хорошая, поскольку максимальное расхождение результатов не превышало 0,35 дБ, причём HAARI (Китай) выполнял калибровки

в бассейне с отражающей поверхностью и заглушенными стенками, вдвое превосходящем по габаритам бассейн ВНИИФТРИ [8].

Применение во ВНИИФТРИ априорного редактирования по току через излучатель (сличение 531/RU/11) существенно уменьшило расхождение результатов по полю и по давлению. Различие результатов НААРИ и ВНИИФТРИ не превысило 0,3 дБ в диапазоне частот от 250 Гц до 200 кГц [9].

Впоследствии государственный эталон принял участие в межлабораторных сличениях калибровок гидрофонов в частотном диапазоне от 3 до 500 кГц (561/RU/12).

Участники сличений: NIOT (Индия), WTD71 (Германия) и ВНИИФТРИ (Россия) выполняли калибровки в разные периоды и в разных климатических условиях.

Средняя температура воды при калибровках во ВНИИФТРИ и WTD 71 была около 17 °С, тогда как в NIOT средняя температура воды при измерениях составляла 29 °С. Разница температур в NIOT, WTD 71 и во ВНИИФТРИ составила 12 °С. По этой причине в данные чувствительности гидрофонов, полученные в NIOT, были внесены поправки. Значения корректирующих (по данным NPL Великобритании) поправок составляли от 0,5 до 1 дБ в зависимости от типа гидрофона и частоты. К результатам ВНИИФТРИ и WTD 71 температурные поправки не применяли.

Проведённые межлабораторные сличения показали согласованность результатов калибровок на частотах 6–500 кГц всех участников, подтвердили эквивалентность национальных эталонов, а также квалификацию и калибровочные возможности NIOT на уровне международно признанных метрологических лабораторий в области подводной акустики. Результаты, приведённые ВНИИФТРИ, практически совпали с опорными уровнями во всём диапазоне частот: максимальное расхождение не превышало 0,4 дБ [10].

Воспроизведение и передача единицы колебательной скорости

Для поддержания соответствия эталонной базы России в области гидроакустических измерений мировому уровню и в соответствии со «Стратегией обеспечения единства измерений в России до 2015 года» в 2013 году были начаты работы по созданию Государственного первичного эталона единицы колебательной скорости водной среды. Положительный опыт работ, проводимых во ВНИИФТРИ в течение последних двадцати лет в области разработки методов и аппаратуры для высокоточных гидроакустических измерений, позволил создать две эталонные установки ЭУ-1 и ЭУ-2, обеспечивающие воспроизведение и передачу единицы колебательной скорости водной среды в диапазоне частот от 5 до 10000 Гц.

Установка ЭУ-1 воспроизводит единицу колебательной скорости водной среды в диапазоне частот от 5 до 1000 Гц в поле стоячей волны камеры малого объёма, а установка ЭУ-2 — в поле бегущей волны в диапазоне частот от 1 до 10 кГц. В ЭУ-2 реализован метод СКВУ, включая алгоритмы предварительной обработки данных, а также излучение и когерентный приём квадратурно дополненных ЛЧМ сигналов [11, 12].

Основными элементами при воспроизведении единицы колебательной скорости в эталонных установках и передачи её подчинённым средствам измерений являются эталонные комбинированные приёмники колебательной скорости КГП1 и КГП10 (рабочий диапазон частот от 5 до 1000 Гц и от 1 до 10 кГц соответственно). Приёмники содержат канал приёма скалярной величины (звукового давления) и три канала приёма векторной величины (колебательной скорости). Три измерительных канала приёмников расположены по трём взаимно ортогональным осям X, Y и Z, которые образуют в пространстве правую систему декартовых координат. Форма характеристики направленности каждого из векторных каналов близка к косинусоидальной, причём величина выходного напряжения пропорциональна проекции на его ось колебательной скорости акустической волны, действующей на корпус приёмника. Совместная обработка информации, принимаемой одновременно по четырём каналам с учётом как амплитудных, так и разностно-фазовых соотношений между каналами, позволяет определять скалярные и векторные параметры акустического поля в точке приёма.

Государственный первичный эталон единиц звукового давления и колебательной скорости: состояние и перспективы дальнейшего совершенствования

В 2017 году был утверждён Государственный первичный эталон единиц звукового давления и колебательной скорости в водной среде ГЭТ 55-2017, в состав которого вошли семь эталонных установок [13, 14].

Значения СКО и НСП воспроизведения единиц звукового давления и колебательной скорости в водной среде установками из состава первичного эталона приведены ниже в таблице.

Таблица

Значения СКО и НСП воспроизведения эталоном единиц звукового давления и колебательной скорости в водной среде

Установка	Звуковое давление, Па	Колебательная скорость, м·с ⁻¹	Диапазон частот, Гц	СКО	НСП
Э-1	80...100	—	0,001...1,0	$0,2 \cdot 10^{-2}$ до 0,63 Гц;	$1,0 \cdot 10^{-2}$ до 0,63 Гц;

Продолжение таблицы

Установка	Звуковое давление, Па	Колебательная скорость, м·с ⁻¹	Диапазон частот, Гц	СКО	НСП
				$1,0 \cdot 10^{-2}$ до 1,0 Гц	$1,9 \cdot 10^{-2}$ до 1,0 Гц
Э-2	0,5...1000	—	0,5...2000	$0,5 \cdot 10^{-2}$	$2,0 \cdot 10^{-2}$ до 1000 Гц; $2,8 \cdot 10^{-2}$ до 2000 Гц
Э-3	20...50	—	0,5...500	$0,7 \cdot 10^{-2}$	$2,4 \cdot 10^{-2}$
Э-4	10...200	—	$1,0 \cdot 10^3 \dots 2,5 \cdot 10^5$	$0,5 \cdot 10^{-2}$	$3,0 \cdot 10^{-2}$
Э-5	50...250	—	$1,6 \cdot 10^5 \dots 1,0 \cdot 10^6$	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$4,0 \cdot 10^{-2}$
ЭУ-1	—	$1,0 \cdot 10^{-5} \dots 1,0 \cdot 10^{-4}$	$5,0 \dots 1,0 \cdot 10^3$	$2,0 \cdot 10^{-2}$	$5,0 \cdot 10^{-2}$
ЭУ-2	—	$1,0 \cdot 10^{-7} \dots 1,0 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^3 \dots 10 \cdot 10^3$	$2,0 \cdot 10^{-2}$	$5,0 \cdot 10^{-2}$

Утверждена и вводится в действие с 1 января 2019 года Государственная поверочная схема для средств измерений звукового давления и колебательной скорости в водной среде. Число основных потребителей единиц звукового давления и колебательной скорости в водной среде, воспроизводимых эталоном ГЭТ 55-2017, составляет около 30 предприятий и организаций.

По метрологическим характеристикам первичный эталон соответствует лучшим зарубежным аналогам при воспроизведении и передаче единицы звукового давления.

В настоящее время с Государственным первичным специальным эталоном связано три позиции калибровочных и измерительных возможностей, приведённых МБМВ. Методы, разработанные во ВНИИФТРИ: пьезоэлектрической компенсации, гидростатический, модифицированный метод взаимности в камере малого объёма и СКВУ, введены в международные рекомендации МЭК 60565-2006. Продолжаются исследования, направленные на использование сигналов со сложным спектром [15]: признано целесообразным на ключевых сличениях МКМВ ССАUV/W-K2 выполнить калибровку опорных гидрофонов во ВНИИФТРИ на шумовом сигнале в дополнение к калибровке тонально-импульсным методом (EURAMET TC-AUV 2016 г.).

С 2015 по 2018 г. были проведены пилотные сличения национальных эталонов колебательной скорости частиц водной среды в диапазоне частот от 5 Гц до 10 кГц (КООМЕТ 646/RU/14). Сличения 646/RU/14 являются первыми в мировой метрологической практике сличениями национальных эталонов векторных величин подводного звукового поля.

Для сличений использовали три трёхкомпонентных приёмника колебательной скорости частиц водной среды: VHS56 и VHS90, предоставленные

НААРИ, и КГП10, предоставленный ВНИИФТРИ. Для оценки измерительных и калибровочных возможностей Китая и России в области измерений векторных величин подводного звукового поля, помимо установок, реализующих калибровку методом сравнения с поле стоячей звуковой волны акустической камеры, впервые использовали установки для калибровки векторного приёмника по полю методом взаимности в условиях незаглушённого лабораторного бассейна. Калибровку каждого из трёх каналов X, Y, Z векторного приёмника VHS90 выполняли на частотах 1/3 октавного ряда в диапазоне от 5 до 4000 Гц. Калибровку каждого из трёх каналов X, Y, Z векторных приёмников VHS56 и КГП10 выполняли на частотах 1/3 октавного ряда в диапазоне от 500 до 10000 Гц (излучались продолжительные ЛЧМ сигналы и применялась постобработка по методу СКВУ для подавления влияния отражённых стенками бассейна звуковых волн) [16].

Степени эквивалентности для приёмника VHS56 представлены графиками на рис. 1–2.

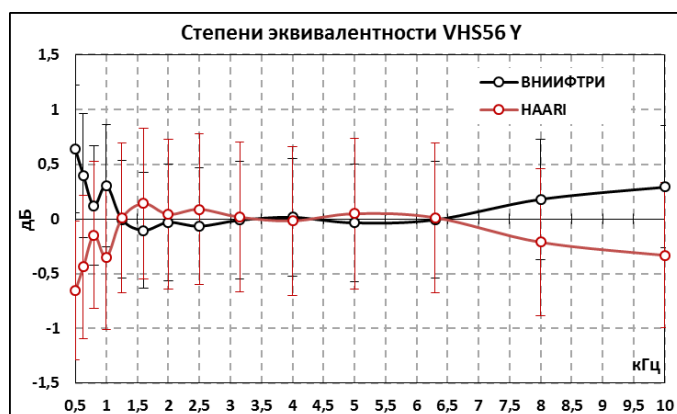


Рис. 1. Степени эквивалентности для приёмника VHS56 (канал Y)

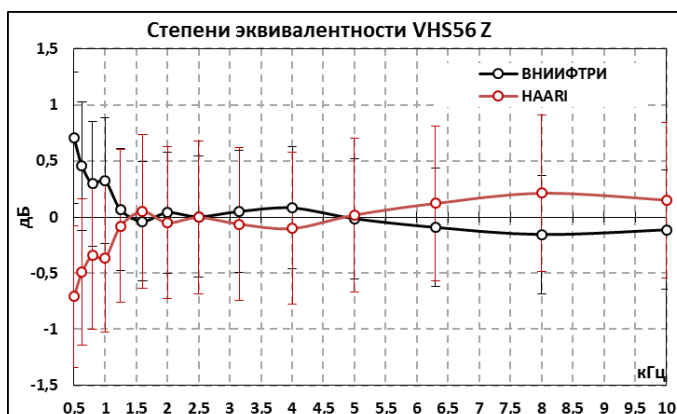


Рис. 2. Степени эквивалентности для приёмника VHS56 (канал Z)

Степени эквивалентности для приёмника КГП10 представлены графиками на рис. 3–4. Результаты обоих участников хорошо согласуются как для камеры, так и для бассейна.

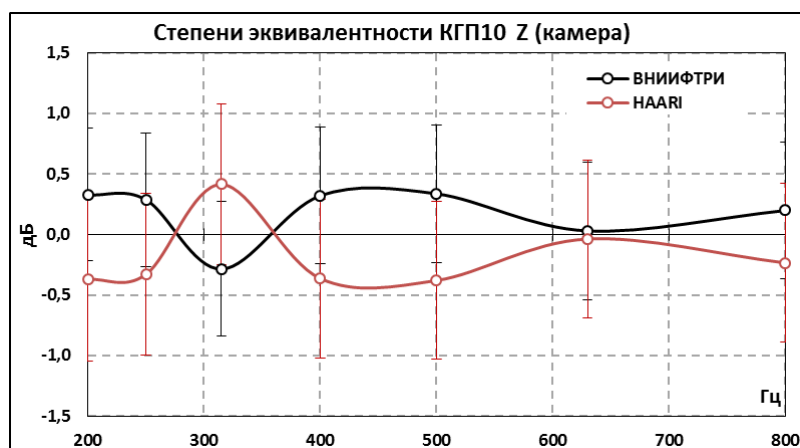


Рис. 3. Степени эквивалентности для приёмника КГП10 (канал Z)

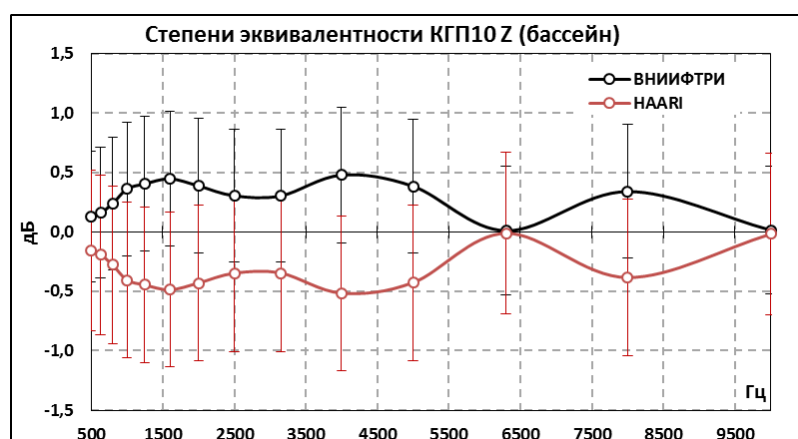


Рис. 4. Степени эквивалентности для приёмника КГП10 (канал Z)

Результаты калибровки HAARI и ВНИИФТРИ хорошо согласуются для всех трёх векторных приёмников, участвовавших в сличениях. Выявленные несоответствия на отдельных частотах не являются существенными в сравнении с заявленными HAARI и ВНИИФТРИ расширенными неопределённостями 0,9 и 0,8 дБ соответственно. Так, для приёмника VHS90 выявленное несоответствие на частоте 315 Гц (канал Z) не превосходит 0,02 дБ; для приёмника VHS56 на частоте 500 Гц для всех трёх каналов нарушения эквивалентности результатов не превосходят 0,1 дБ, а для приёмника КГП10 нарушений эквивалентности не выявлено ни в одной из 42 частотных точек.

За последние десятилетия в странах, лидирующих сегодня в области подводных акустических технологий, достигнут значительный прогресс как в измерениях, так и в метрологическом обеспечении таких измерений. Созданы Национальные гидроакустические метрологические центры, причём не только в США, Англии, Германии, Канаде и Франции, но и в Китае, Италии и Турции. Специализированные эталонные установки в США, Великобритании и Китае уже сегодня позволяют моделировать гидростатическое давление и температуру в широких диапазонах, значительно перекрывая возможности отечественного ГПЭ. Прорывные технологии в области гидролокации позволили запустить в производство гидролокационные системы, работающие на частотах выше 1 МГц, однако в России метрологическое обеспечение в этой области в настоящее время отсутствует.

Для исправления сложившейся ситуации необходимо расширить рабочие диапазоны ГПЭ: осуществлять измерения в условиях, близких к реальным условиям применения.

В этой связи начаты работы (завершение планируется в 2019 году) по расширению функциональных возможностей ГПЭ в части воспроизведения, хранения и передачи единицы звукового давления эталонным и рабочим средствам измерений:

- в диапазоне частот от 1 до 3 МГц;
- в диапазоне температур от 0,5 до 35 °С на частотах от 1 до 1000 Гц при избыточных статических давлениях до 60 МПа.

Литература

1. Голенков А.Н. Абсолютная градуировка приёмников инфразвукового давления в воздушно-водном резонаторе с гидростатическим возбуждением // Измерительная техника. 1965. № 5. С. 41–46.
2. Голенков А.Н., Павлов Л.Е. Абсолютная градуировка измерительных гидрофонов в диапазоне звуковых частот // Измерительная техника. 1965. № 5. С. 44–49.
3. Некрасов В.Н., Некрич С.Ф. Модифицированный метод взаимности для градуировки гидрофонов камерах малого объёма // Измерительная техника. 1988. № 1. С. 43–45.
4. Лихачев С.М., Голенков А.Н. Совершенствование эталона единицы звукового давления в водной среде // Измерительная техника. 2006. № 12. С. 49–52.
5. Исаев А.Е. Точная градуировка приёмников звукового давления в водной среде в условиях свободного поля. Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2008. 369 с.

6. Матвеев А.Н. Разработка и исследование методов градуировки гидроакустического приёмника при излучении сигналов с линейной частотной модуляцией: дис. канд. техн. наук. Менделеево, 2014. 105 с.
7. Исаев А.Е., Матвеев А.Н., Некрич Г.С., Некрич С.Ф., Сильвестров С.В., Черников И.В., Щелкунов А.И., Щерблюк Н.Г. Государственный первичный специальный эталон единицы звукового давления в водной среде ГЭТ 55-2011 // Измерительная техника. 2013. № 7. С. 3–6.
8. Еняков А.М., Исаев А.Е., Матвеев А.Н., Ван Юэбинг, Чэн И, Фэй Тэн Российско-китайские пилотные сличения результатов калибровок гидрофонов в диапазоне частот 250 Гц – 200 кГц // Измерительная техника. 2011. № 11. С. 66–69.
9. Isaev A.E., Yi Chen, Matveev A.N., Zihong Ping COOMET.AUV.W-S1 SUPPLEMENTARY COMPARISON OF FREE-FIELD HYDROPHONE CALIBRATIONS IN THE FREQUENCY RANGE 250 Hz TO 8 kHz // Metrologia. Technical Supplement. 2015. V. 52. 09001.
10. Маларкоди А., Лата Г., Атмананд М.А., Исаев А.Е., Матвеев А.Н., Щерблюк Н.Г., Манн Ф., Янсен С., Милкерт Д. Межлабораторные сличения эталонов в области гидроакустических измерений в частотном диапазоне 3–500 кГц // Измерительная техника. 2016. № 1. С. 69–72.
11. Исаев А.Е., Матвеев А.Н., Некрич Г.С., Поликарпов А.М. Комплексная градуировка приёмника градиента давления с использованием процедуры метода взаимности // Акуст. журн. 2014. Т. 60. Вып. 1. С. 48–55.
12. Исаев А.Е., Матвеев А.Н., Некрич Г.С., Поликарпов А.М. Градуировка приёмника градиента давления по полю в отражающем бассейне с применением ЛЧМ сигнала // Акуст. журн. 2013. Т. 59. № 6. С. 773–781.
13. Исаев А.Е., Матвеев А.Н., Некрич Г.С., Некрич С.Ф., Сильвестров С.В. Государственный первичный эталон единиц звукового давления и колебательной скорости в водной среде ГЭТ 55-2017 // Измерительная техника. 2017. № 8. С. 3–5.
14. Исаев А.Е., Матвеев А.Н., Некрич Г.С., Сильвестров С.В. Эталонные установки для воспроизведения и передачи единицы колебательной скорости водной среды в диапазоне частот от 5 Гц до 10000 Гц // Вестник метролога. 2017. № 1. С. 14–20.
15. Черников И.В. Разработка и исследование методов и средств градуировки гидроакустических приёмников по полю с использованием шумового сигнала: дис. канд. техн. наук. Менделеево, 2016. 103 с.
16. Исаев А.Е., Chen Yi. Технический Протокол 646/RU/14, «Пилотные сличения КООМЕТ калибровок по свободному полю приёмника колебательной скорости частиц водной среды в частотном диапазоне от 5 Гц до 4,0 кГц».