

Межлабораторные сличения эталонов в области гидроакустических измерений в частотном диапазоне 3—500 кГц

А. МАЛАРКОДИ¹, Г. ЛАТА¹, М. А. АТМАНАНД¹, А. Е. ИСАЕВ², А. Н. МАТВЕЕВ²,
Н. Г. ЩЕРБЛЮК², Ф. МАНН³, С. ЯНСЕН³, Д. МИЛКЕРТ³

¹ Национальный институт океанских технологий, Палликаранай, Ченнай, Индия

² Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Менделеево, Россия, e-mail: isaev@vniiftri.ru

³ Отделение подводной акустики и морской геофизики Научно-технического центра Бундесвера, Экернфёрд, Германия

Описаны методика и результаты международных межлабораторных сличений эталонов в области гидроакустических измерений. Сличения организованы и проведены Национальным институтом океанских технологий Индии при участии эталонов Германии и России. Приведены данные об эталонных установках участников сличений и реализуемых методах измерений, обсуждено влияние температуры воды на результаты сличений при выполнении калибровок.

Ключевые слова: международные сличения, калибровка гидрофона в свободном поле, опорный гидрофон, чувствительность к температуре, метод взаимности, уровни эквивалентности.

The procedure and results of interlaboratory comparison of national standards in the field of underwater sound measurements are described. The comparison was organized by National Institute of Ocean Technology, India, with participation of national standards of Russia and Germany. The description of standard calibration installations and methods used by participants for calibration are presented and the influence of water temperature variation on calibration is discussed.

Key words: international comparison, free-field hydrophone calibration, reference hydrophone, temperature sensitivity, reciprocity calibration, degrees of equivalence.

В соответствии со стандартом [1] межлабораторные сличения эталонов в области гидроакустических измерений в частотном диапазоне 3—500 кГц инициированы и проведены Национальным институтом океанских технологий (NIOT) при поддержке Министерства земледелия при Правительстве Индии. В сличениях участвовали ВНИИФТРИ (Россия) и WTD 71 — научно-исследовательское отделение подводной акустики и морской геофизики Научно-технического центра Бундесвера (Германия). Функции пилотной лаборатории сличений выполняла лаборатория эталонов для акустических испытаний (ATF) NIOT.

Основные задачи сличений: установление согласованности результатов калибровок гидрофонов; проверка обоснованности заявленных неопределённостей и достоверности представленных участниками бюджетов неопределённостей; подтверждение степеней эквивалентности национальных эталонов и компетентности метрологических лабораторий. Частотный диапазон межлабораторных сличений практически повторяет частотный диапазон первых ключевых сличений калибровок гидрофонов, проведённых 12 лет назад под эгидой Консультативного комитета по акустике, ультразвуку и вибрации Международного комитета мер и весов (МКМВ). Вследствие этого межлабораторные сличения стали подготовкой участвовавших в них национальных эталонов и лабораторий к очередным ключевым сличениям.

На правах пилотной лаборатории NIOT подготовил и согласовал с участниками технический протокол межлабораторных сличений, предоставил комплект опорных гидрофонов, отобранных по результатам исследований стабильно-

сти их метрологических характеристик. В качестве опорных гидрофонов использовали гидрофоны B&K 8104 и Reson TC 4034, характеристики которых приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики гидрофонов

Гидрофон	Частотный диапазон, кГц	Номинальная чувствительность, дБ	Длина кабеля, м
B&K 8104	3—100	−206	10
Reson TC 4034	100—500	−219	10

Каждый участник выполнял калибровки в согласованные и установленные сроки. Сличения проводили по круговой схеме. Опорные гидрофоны, предварительно откалиброванные в ATF NIOT, были направлены в WTD 71, который, выполнив калибровки, передал их во ВНИИФТРИ. По завершении калибровок ВНИИФТРИ возвратил опорные гидрофоны в NIOT, где они были вновь откалиброваны, чтобы убедиться, что транспортировка и выполненные калибровки не повлияли на их характеристики. Каждый из опорных гидрофонов необходимо было откалибровать в определённом частотном диапазоне (см. табл. 1) на 35 дискретных частотах, установленных техническим протоколом. Все участники выполняли калибровки абсолютным методом, для чего применяли стандартизованную процедуру калибровки гидрофона методом взаимности в свободном поле сферической волны с тремя преобразователями [2]. Чувствительность опор-

ного гидрофона представляли в децибелах относительно 1 В/мкПа.

НИОТ калибровал гидрофоны в лабораторном бассейне с бетонными стенами и дном. Глубина бассейна 7 м, размеры дна и поверхности воды 14,2×7,2 м и 16×9 м, соответственно. ВНИИФТРИ использовал два различающихся по размерам и конструкции бассейна. В незаглушенном бассейне со стенами и дном из бетона размером 10×6×6 м калибровали гидрофон B&K 8104 в частотном диапазоне 3—100 кГц. Для калибровок гидрофона Reson TC 4034 в частотном диапазоне 100—500 кГц использовали малый бассейн размером 1,6×1,2×0,7 м со стенками и дном из оргстекла. WTD 71 выполнял калибровки в озере на глубине 10 м и использовал специальную систему позиционирования и фиксации гидрофона в виде вертикальной П-образной рамы из полых стальных труб.

При подготовке к калибровкам большое внимание уделяли обеспечению измерений напряжения холостого хода гидрофона, очистке и смачиванию поверхностей активных элементов, корпусов и держателей гидрофонов, замачиванию гидрофонов, если они продолжительное время находились на воздухе, а также выдерживанию гидрофонов в условиях, идентичных условиям измерений (глубина погружения и температура).

Калибровка методом взаимности. Калибровка данным методом предполагает, что один из трёх преобразователей — обратимый [2]. Преобразователи попарно устанавливали под водой на известных расстояниях друг от друга как можно дальше от поверхностей, ограничивающих водную среду (поверхность озера, стенки и дно лабораторного бассейна). В каждой паре один из преобразователей использовали как излучатель, а другой как приёмник, образуя три различные комбинации излучатель—приёмник. Для каждой комбинации оценивали электрический передаточный импеданс (ПИ) в

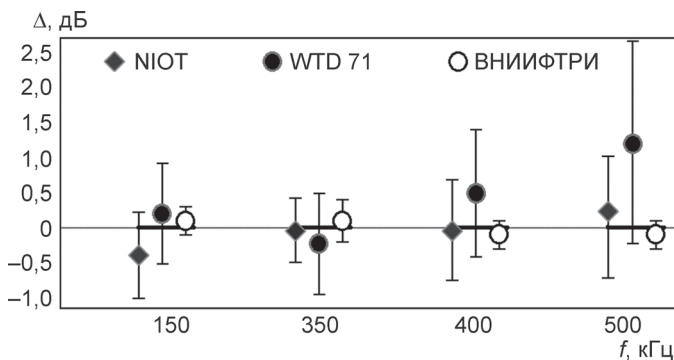
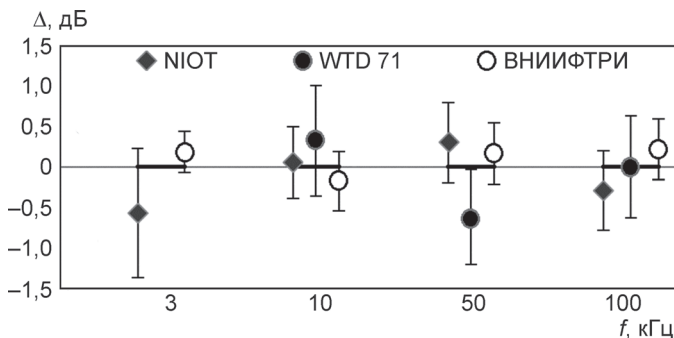
свободном поле как отношение выходного напряжения приёмника в свободном звуковом поле к силе тока в цепи излучателя. По полученным значениям ПИ рассчитывали чувствительность калибруемого гидрофона в свободном поле.

Для измерений выходного напряжения приёмника в НИОТ и WTD 71 применяли тонально-импульсный метод излучения и приёма. Условия свободного поля обеспечивали временной селекцией тонального импульса. Амплитуду выходного напряжения оценивали с помощью алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ). При градуировке каждого из опорных гидрофонов значения ПИ пар излучатель—приёмник определяли для каждой из 35 частот. Во ВНИИФТРИ при калибровках в большом бассейне излучатель возбуждали продолжительными квадратурно дополненными линейно-частотно-модулированными сигналами [3], регистрировали частотные зависимости выходного напряжения приёмника и силы тока через излучатель, по которым рассчитывали комплексные частотные зависимости ПИ пары излучатель—приёмник в реверберационном поле. Частотную зависимость ПИ пары излучатель — приёмник в свободном поле получали обработкой по методу скользящего комплексного взвешенного усреднения (СКВУ) соответствующей частотной зависимости в реверберационном поле [3]. При калибровках в малом бассейне применяли технику временной селекции и излучатель возбуждали квадратурно дополненными тональными импульсами [4].

Неопределённости результатов калибровок участники сличений рассчитывали в соответствии с руководством [5]. Для каждой частоты чувствительность гидрофона определяли по результатам не менее четырёх калибровок. По окончании калибровок каждый участник представил бюджет неопределённости, в котором перечислил значимые источники неопределённости и привёл оценки их значений. Общие для всех участников источники: неопределённость по типу А, которая характеризует повторяемость результатов калибровок; погрешности измерений расстояний между преобразователями; погрешности измерений напряжения и силы электрического тока, частоты, плотности воды; погрешности коррекции электрической нагрузки; влияния электрического шума, включая высокочастотные помехи, и направленности преобразователей; нарушение критериев сферичности волны и взаимности обратимого преобразователя; неравномерность частотной характеристики гидрофонов; погрешность коэффициентов усиления тракта.

WTD 71 не предоставил данные калибровок гидрофона B&K 8104 на частотах 3—6 кГц, поэтому при подведении результатов сличений в этом частотном диапазоне учитывали только данные НИОТ и ВНИИФТРИ.

Зависимость чувствительности опорного гидрофона от температуры является одним из значимых факторов, способным повлиять на сопоставимость результатов калибровок и стать причиной несоответствий степеней эквивалентности эталонов. Участники сличений выполняли калибровки в разные временные периоды и в существенно различающихся климатических условиях. В НИОТ калибровали гидрофон Reson TC 4034 при температуре воды 31 °С, что значительно выше температуры воды при калибровках во ВНИИФТРИ (17—18 °С) и WTD 71 (13—14 °С). Температура воды при градуировке гидрофона B&K 8104 в НИОТ была соответственно на 11—12 °С и 15—16 °С выше, чем во ВНИИФТРИ и WTD 71. Такое увеличение температуры мо-



Уровни эквивалентности лабораторий для частот 3; 10; 50; 100; 150; 350; 400; 500 кГц

Таблица 2

Результаты калибровок гидрофона В&К 8104

f , кГц	M_N , дБ	U_N , дБ	M_W , дБ	U_W , дБ	M_V , дБ	U_V , дБ	$M_{оп}$, дБ	$U_{оп}$, дБ	Δ_N , дБ	$U_{\Delta N}$, дБ	Δ_W , дБ	$U_{\Delta W}$, дБ	Δ_V , дБ	$U_{\Delta V}$, дБ
3	-206,6	0,9	—	—	-205,8	0,5	-206,0	0,4	-0,6	0,8	—	—	0,2	0,3
5	-206,5	1,0	—	—	-206,0	0,5	-206,1	0,4	-0,4	0,9	—	—	0,1	0,2
10	-206,5	0,6	-206,2	0,8	-206,7	0,5	-206,5	0,3	0,1	0,4	0,3	0,7	-0,2	0,4
15	-206,4	0,8	-206,5	0,7	-206,7	0,5	-206,6	0,4	0,2	0,7	0,1	0,6	-0,1	0,4
20	-207,0	0,7	-207,1	0,5	-207,1	0,5	-207,1	0,3	0,1	0,6	0,0	0,4	0,0	0,4
30	-207,0	0,6	-207,9	0,7	-207,1	0,5	-207,3	0,3	0,3	0,5	-0,6	0,6	0,2	0,4
50	-205,2	0,5	-204,7	0,8	-204,4	0,5	-204,8	0,3	-0,4	0,4	0,1	0,8	0,4	0,4
70	-205,3	0,6	-205,0	0,7	-204,8	0,5	-205,0	0,3	-0,3	0,5	0,0	0,6	0,2	0,4
90	-207,9	0,7	-208,4	0,8	-208,0	0,5	-208,1	0,4	0,2	0,6	-0,3	0,7	0,1	0,4
100	-210,2	0,8	-210,7	0,7	-210,4	0,5	-210,4	0,4	0,2	0,7	-0,3	0,6	0,0	0,3

Таблица 3

Результаты калибровок гидрофона Reson TC 4034

f , кГц	M_N , дБ	U_N , дБ	M_W , дБ	U_W , дБ	M_V , дБ	U_V , дБ	$M_{оп}$, дБ	$U_{оп}$, дБ	Δ_N , дБ	$U_{\Delta N}$, дБ	Δ_W , дБ	$U_{\Delta W}$, дБ	Δ_V , дБ	$U_{\Delta V}$, дБ
100	-218,6	0,6	-218,8	1,0	-218,8	0,4	-218,8	0,3	0,2	0,5	0,0	1,0	-0,1	0,2
150	-219,3	0,7	-218,7	0,8	-218,8	0,4	-218,9	0,3	-0,4	0,6	0,2	0,7	0,1	0,2
200	-219,4	0,7	-219,0	0,7	-219,3	0,4	-219,2	0,3	-0,2	0,6	0,3	0,6	0,0	0,3
250	-220,5	0,8	-219,1	0,8	-220,0	0,4	-220,0	0,3	-0,5	0,7	0,9	0,8	0,0	0,2
300	-219,5	0,8	-218,2	0,8	-218,6	0,4	-218,7	0,3	-0,8	0,7	0,5	0,7	0,1	0,2
350	-214,0	0,6	-214,2	0,8	-213,9	0,4	-214,0	0,3	0,0	0,5	-0,2	0,7	0,1	0,3
400	-220,0	0,8	-219,5	1,0	-220,1	0,4	-220,0	0,3	0,0	0,7	0,5	0,9	-0,1	0,2
450	-226,9	0,6	-225,4	1,1	-226,4	0,4	-226,5	0,3	-0,4	0,5	1,1	1,1	0,1	0,3
500	-229,7	1,1	-228,6	1,5	-230,0	0,4	-229,9	0,4	0,2	1,1	1,3	1,5	-0,1	0,2

жет приводить к уменьшению чувствительности гидрофонов типа В&К 8104 на 0,5 дБ, что соизмеримо с заявленными участниками неопределённостями результатов калибровок. Значительное изменение чувствительности опорного гидрофона существенно увеличивает разброс результатов калибровок и приводит к неправильной оценке точности национального эталона.

В результате участниками сличений принято решение о целесообразности введения в результаты калибровок NIOT поправок на температуру. Это позволяет исключить из рассмотрения составляющую неопределённости, обусловленную свойствами опорного гидрофона, который не является частью сличаемых измерительных установок. При расчёте поправок в качестве опорной температуры воды использовали значение 18 °С. К результатам ВНИИФТРИ и WTD 71 поправки на температуру не применяли. Полученные в NIOT значения чувствительности гидрофона В&К 8104 были скорректированы следующим образом: на частотах до 16 кГц включительно введена поправка 0,48 дБ, полученная в соответствии с рекомендациями в [6] из расчёта 0,04 дБ при изменении температуры воды на 1 °С на частотах, меньших одной трети частоты первого резонанса гидрофона; в области резонанса гидрофона на частотах 25—75 кГц для поправки использовали данные, приведённые на сайте Националь-

ной физической лаборатории Великобритании [7]. На частотах 320—360 кГц в области собственных резонансов гидрофона Reson TC 4034 данные NIOT также были скорректированы на -0,7 дБ.

Расчёт степеней эквивалентности. Опорные значения сличений $M_{оп}$ для обоих опорных гидрофонов на каждой частоте оценивали в соответствии с рекомендациями [8—10] как взвешенное среднее результатов калибровок, представленных участниками:

$$M_{оп} = \sum \frac{M_i}{u_i^2} / \sum \frac{1}{u_i^2},$$

где M_i , u_i — соответственно результат калибровки и его стандартная неопределённость, заявленные i -м участником, $i=N, W, V$ — индекс участника сличений (N — NIOT, W — WTD 71, V — ВНИИФТРИ).

В соответствии с [8—10] степень эквивалентности каждого эталона характеризовали количественно отклонением от опорного значения сличений и границами интервала отклонения при доверительной вероятности $P = 0,95$.

Среднее квадратическое отклонение (СКО) опорного значения $u_{оп}$ определяли по формуле

$$u_{оп} = \left(\sum 1/u_i^2 \right)^{-1/2}.$$

Степень эквивалентности каждого национального эталона вычисляли как

$$\Delta_i = M_i - M_{\text{оп}}$$

Значения границ интервала отклонения при $P=0,95$ рассчитывали по формуле

$$U_{\Delta_i} = 2\sqrt{u_i^2 - u_{\text{оп}}^2}.$$

Результаты сличений. Степени эквивалентности эталонов на частотах 3; 10; 50; 100; 150; 350; 400; 500 кГц представлены на рисунке. В табл. 2, 3 приведены значения $M_{\text{оп}}$, $u_{\text{оп}}$, при расчёте которых в диапазоне частот 3—6 кГц использовали только данные NIOT и ВНИИФТРИ, а на других частотах учитывали результаты всех участников сличений. В табл. 2, 3 приняты следующие обозначения: M_N , M_W , M_V — чувствительности, выраженные в децибелах относительно 1 В/мкПа и полученные в NIOT, WTD 71 и ВНИИФТРИ, соответственно; U_N , U_W , U_V — расширенные неопределённости результатов калибровок; $M_{\text{оп}}$, $u_{\text{оп}}$ — опорные значения и их СКО, соответственно; Δ_N , Δ_W , Δ_V — степени эквивалентности; U_{Δ_N} , U_{Δ_W} , U_{Δ_V} — границы интервалов отклонений при $P=0,95$.

Основным фактором, влияющим на разброс результатов калибровок, можно считать разные условия измерений. Такие источники, как, например, влияние переустановки преобразователей, коррекция электрической нагрузки и электрического шума, учтены в бюджетах неопределённостей. Однако различие в способах крепления гидрофонов могут вносить дополнительную неопределённость в результаты измерений. Наибольший разброс наблюдается на частотах выше 400 кГц в результатах NIOT и WTD 71. На высоких частотах гидрофон утрачивает свойство ненаправленности и неточность его ориентирования на излучатель вносит дополнительный вклад в неопределённость калибровки.

Закключение. При подведении итогов сличений признано целесообразным дополнительно исследовать зависимость чувствительности гидрофонов от температуры с целью более детального выяснения причин, повлиявших на расхождение результатов. В ситуации, когда возможность обеспечить одинаковые климатические условия при калибровках по разным причинам отсутствует, в качестве опорных предпочтительно использовать гидрофоны, имеющие пре-

небрежимо малую температурную зависимость чувствительности в прогнозируемом диапазоне изменения температуры.

Проведенные 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.

Л и т е р а т у р а

1. **ISO/IEC 17025:2005.** Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий.
2. **IEC 60565 (2006).** Подводная акустика. Гидрофоны. Калибровка в частотном диапазоне от 0,01 Гц до 1 МГц.
3. **Исаев А. Е., Матвеев А. Н.** Градуировка гидрофонов по полю при непрерывном излучении в реверберирующем бассейне // Акустический журнал. 2009. Т. 55. № 6. С. 727—736.
4. **Исаев А. Е.** Уменьшение влияния переходного процесса при градуировке гидрофонов по полю на низких частотах с использованием квадратурно-дополненных гармонических сигналов // Измерительная техника. 2010. № 4. С. 20—24.
5. **ГОСТ Р 54500.3—2011.** Неопределённость измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределённости измерения.
6. **Hydrophones** Types 8103, 8104, 8105, 8106: Technical Documentation // Brüel & Kjær, 1992.
7. **Robinson S. P.** Final report for key comparison CCAUV.W-K1: Calibration of hydrophones in the frequency range from 1 kHz to 500 kHz / NPL Report DQL-AC 009 // NPL, 2004. [Электрон. версия] http://publications.npl.co.uk/npl_web/pdf/dql_ac9.pdf (дата обращения 27.05.2015)
8. **Robinson S. P.** An international key comparison of free-field hydrophone calibrations in the frequency range 1 to 500 kHz // J. Acoust. Soc. Am. 2006. V. 120. P. 1366—1373.
9. **Chen Y., Isaev A. E. et al.** The COOMET Pilot Comparison 473/RU-a/09: Comparison of hydrophone calibrations in the frequency range 250 Hz to 200 kHz // Metrologia Tech. Suppl. 2011. V. 48. 09004. P. 1—12.
10. **Cox M. G.** The evaluation of key comparison data // Metrologia. 2002. V. 39. P. 589—595.

Дата принятия 27.07.2015 г.