

Передача единицы звукового давления гидрофонам с учётом условий их применения

А. Е. Исаев, С. Ф. Некрич, И. В. Черников

*Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений,
г. п. Менделеево, Московская обл., Российская Федерация, e-mail: isaev@vniiftri.ru, iii@vniiftri.ru*

Описана измерительная установка для воспроизведения единицы звукового давления в воде на частотах 1–500 Гц в диапазоне температур 0,5–35 °С при избыточных статических давлениях до 60 МПа. Цель создания установки – расширение функциональных возможностей Государственного первичного эталона единиц звукового давления и колебательной скорости в водной среде ГЭТ 55-2017. Показана целесообразность моделирования в ГЭТ 55-2017 рабочих условий применения гидрофона. Рассмотрены принципы функционирования и метрологические характеристики созданной установки. Приведены особенности измерительной процедуры калибровки гидрофона.

Ключевые слова: подводная акустика, калибровка гидрофона, камера высокого давления, акустическая гибкость.

Введение. Метрологическое обеспечение гидроакустических измерений является одним из основных направлений научно-технической деятельности ВНИИФТРИ как Государственного научного метрологического центра РФ. Поверочную схему в области измерений подводного звука возглавляет созданный и хранимый во ВНИИФТРИ Государственный первичный эталон единиц звукового давления и колебательной скорости в водной среде ГЭТ 55-2017. Для расширения функциональных возможностей ГЭТ 55-2017 с 2017 по 2019 гг. была разработана установка Э-6. Измерительная установка обеспечивает воспроизведение единицы звукового давления в воде на частотах 1–500 Гц в диапазоне температур 0,5–35 °С при избыточных статических давлениях до 60 МПа. Таким образом решена проблема низкочастотной калибровки гидрофонов, применяемых на больших глубинах.

Целесообразность моделирования в ГЭТ 55-2017 условий применения измерительного гидрофона. Традиционно первичный эталон воспроизводит единицу в условиях, обеспечивающих наивысшую точность. Калибровка средств измерений (СИ) с учётом влияющих факторов – задачи вторичного и рабочих эталонов. Однако в области гидроакустических измерений сложилась ситуация, когда несколько ступеней передачи единицы приводят к неоправданной потере точности калибровки измерительного гидрофона.

В настоящее время единственным методом исследования зависимости чувствительности гидрофонов от статического давления и температуры является абсолютный метод калибровки – метод взаимности. Таким образом, наиболее рациональное решение проблемы – дополнение ГЭТ 55-2017 установкой, позволяющей воспроизводить единицу в диапазоне статических давлений и температур, охватывающем диапазон реальных условий применения измерительного гидрофона.

Научная задача государственных первичных эталонов – воспроизведение единицы с наивысшей точностью, техническая задача – обеспечение поверки существующего парка СИ. В последние десятилетия происходит бурное развитие гидроакустических технологий. Освоение огромных запасов природных богатств Арктики и обеспечение судоходства по Северному морскому пути требует калибровки гидрофонов при низких температурах. Активное участие нефтегазодобывающих компаний РФ в освоении месторождений в тропических широтах обуславливает необходимость калибровки при повышенных температурах. При охране прибрежных зон, защите гаваней, портов, надводных и придонных буровых станций от террористических угроз гидрофон находится в условиях малых глубин и статических давлений. Большая часть месторождений минеральных ископаемых (полиметаллические сульфидные руды, железо-марганцовые конкреции, кобальто-марганцевые корки) залегает в северо-западной части Тихого океана на глубинах 3600–5400 м. Без проведения активных исследований на таких глубинах Россия не сможет полноправно участвовать в формировании международной политики в использовании и квотировании добычи минеральных ресурсов открытого океана и не получит к ним необходимого доступа. Таким образом, измерительные гидрофоны работают при различных сочетаниях температур и давлений, и это необходимо учитывать при калибровке.

Чтобы обеспечить взаимодействие государств в области мониторинга подводного шума и сертификации по шуму судов коммерческого флота необходимо обеспечить взаимное признание результатов калибровок. Это потребовало, например, расширения диапазона частот калибровок гидрофонов в низкочастотную область. План ключевых сличений Международного комитета по мерам и весам (МКМВ) предусматривает сличение национальных

эталонов по результатам калибровок гидрофонов на низких частотах. Для обеспечения калибровок рабочих СИ на совещании Технического комитета ТК87 Международной электротехнической комиссии (МЭК), состоявшемся в рамках 83-го Генерального заседания МЭК в Шанхае в октябре 2019 г., принято решение о привлечении экспертов Рабочих групп Технических комитетов МЭК IEC/TC87/WG15 и Международной организации по стандартизации (ИСО) ISO/TC43/SC3 к разработке стандарта на низкочастотную калибровку цифровых гидрофонов и рекордеров подводного звука. Следующим шагом, обеспечивающим взаимное признание сертификатов калибровок, неизбежно будет сравнение результатов калибровок при избыточных статических давлениях и в диапазоне температур. Эталонные установки, способные воспроизводить единицу в широких диапазонах избыточных давлений и температур активно используются в таких странах, как США, Китай, Великобритания [1].

Установка Э-6. Проведённые исследования выявили существенную зависимость чувствительности пьезокерамических измерительных гидрофонов от температуры и гидростатического давления. При изменении температуры в диапазоне 0,5–35 °С чувствительность гидрофона может изменяться на 0,7–1,0 дБ, а с увеличением гидростатического давления от 0,5 до 50 МПа – до 3 дБ. Использование в

реальных условиях применения гидрофона значений чувствительности, полученных при малых статических давлениях и комнатной температуре, приводит к погрешности передачи единицы, соизмеримой с современными требованиями к погрешности гидроакустических измерений. Как следствие, погрешность натурных измерений оказывается недопустимо большой. Изменение чувствительности при совместном воздействии температуры и гидростатического давления не носит аддитивного характера, что не позволяет оценить общее изменение чувствительности от совокупного воздействия этих факторов как сумму вкладов каждого из них. Отечественный и зарубежный опыт указывает, что величины и взаимное сочетание гидростатического давления и температуры при калибровке гидрофона в лабораторных условиях должны воспроизводиться такими же, как при использовании гидрофона по назначению в натурных условиях [2].

Конструктивно установка Э-6 состоит из измерительного комплекса, камеры тепла и холода, стенда высокого давления. В состав стенда входят заполняемая водой измерительная камера и гидропресс. Внешний вид камеры тепла и холода 1 и стенда высокого давления представлен на рис. 1. Статическое давление в измерительной камере 3 создают поршневым гидропрессом 2, визуально контролируя

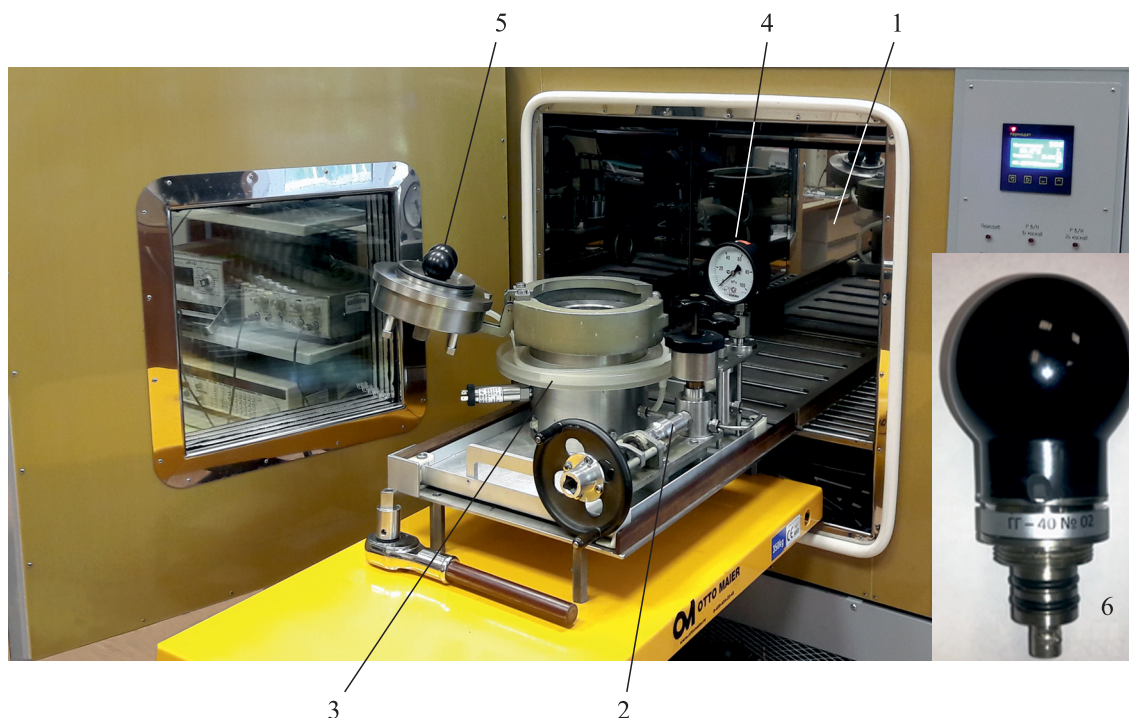


Рис. 1. Установка Э-6:

1 – камера тепла и холода, 2 – гидропресс, 3 – измерительная камера, 4 – манометр визуального контроля статического давления, 5 – крышка камеры с установленными в ней калибруемом гидрофоном и излучателем; 6 – калибруемый гидрофон

Fig. 1. Appearance of facility equipment:

1 – chamber of heat and cold; 2 – hydro press; 3 – small volume measuring coupler; 4 – static pressure gauge; 5 – calibrated hydrophone and projector mounted in the coupler cap; 6 – calibrated hydrophone

давление по манометру 4. Чтобы установить требуемую температуру воды в измерительной камере, стенд высокого давления помещают в камеру тепла и холода, которую включают в режим нагрева либо охлаждения. Температуру воды контролируют с помощью встроенного в корпус измерительной камеры датчика температуры. По достижении заданной температуры воды статическое давление в измерительной камере подстраивают до требуемого значения, контролируя его по встроенному в корпус камеры датчику давления. Информация о текущих значениях статического давления и температуры воды автоматически поступает с выходов датчиков в компьютер измерительной системы установки.

Метрологические характеристики установки Э-6.

В результате исследования метрологических характеристик установки Э-6 были выявлены основные источники погрешности. Оценки вкладов, вносимых этими источниками в погрешность, приведены в таблице.

Неисключённую систематическую погрешность (НСП) и среднее квадратическое отклонение (СКО) воспроизведения и передачи размера единицы звукового давления оценивали в соответствии с ГОСТ 8.381-2009.

Метрологические характеристики измерительной установки Э-6

Частотный диапазон воспроизведения и передачи размера единицы звукового давления.....	1–500 Гц
Диапазон воспроизводимых звуковых давлений в зависимости от частоты.....	10–150 Па
Диапазон изменения температуры	0,5–35 °С
Диапазон изменения статического давления	0,5–60 МПа
СКО результата измерений при воспроизведении единицы звукового давления	не более 2 %
НСП воспроизведения единицы звукового давления в диапазоне частот	не более 3 %
СКО результата измерений чувствительности гидрофона	не более 2 %
НСП результата измерений чувствительности гидрофона	не более 3 %

Результаты выполненных метрологических исследований дают основания для расширения диапазона установки Э-6 в сторону высоких частот до 1 кГц без существенного увеличения погрешности измерений. Для моделирования натурных условий измерений на частотах более 1 кГц требуется дополнить ГЭТ 55-2017 эталонной установкой, обеспечивающей воспроизведение и передачу по полю единицы звукового давления в диапазоне частот 1–200 кГц.

Процедура калибровки гидрофона. Для измерения чувствительности калибруемого гидрофона в установке Э-6 реализована модифицированная процедура метода взаимности в камере малого объёма, стандартизованного в МЭК 60565:2006 «Гидроакустика. Гидрофоны. Калибровка в частотном диапазоне от 0,01 Гц до 1 МГц». Преимущества этой процедуры – возможность определять акустическую гибкость системы и чувствительность гидрофона, выполняя

измерения только электрических величин. Звуковое давление в измерительной камере возбуждают с помощью излучателя либо обратимого преобразователя, установленных соответственно в крышке 5 и дне камеры 3 (см. рис. 1). Чувствительность гидрофона M_f вычисляют по формуле

$$M_f = \sqrt{JA}; \quad (1)$$

$$A = U_{и-г} U_{о.п-г} / (U_{и-о.п} I_{о.п}),$$

где J – параметр взаимности для камеры малого объёма; $U_{и-г}$, $U_{и-о.п}$ – напряжения на выходах гидрофона и обратимого преобразователя при возбуждении звукового давления излучателем; $U_{о.п-г}$ – напряжение на выходе гидрофона при возбуждении звукового давления обратимым преобразователем, $I_{о.п}$ – ток в цепи обратимого преобразователя.

При измерениях методом взаимности в камере малого объёма зависимость от частоты f параметр взаимности J выражается через акустическую гибкость C_a системы, состоящей из измерительной камеры и заполняющей камеру водной среды [4]:

$$J = 2\pi f C_a.$$

Гибкость C_a удобно представить суммой значений гибкости заполняющей камеру воды C_b и общей гибкости камеры C_k – её стенок, дна и крышки с установленными в них излучателем, обратимым преобразователем и калибруемым гидрофоном. Акустическую гибкость воды можно достаточно точно рассчитать по формуле

$$C_b = V / (\rho c^2),$$

где V , ρ – объём и плотность воды; c – скорость звука в воде.

В отличие от расчёта C_b , расчёт акустической гибкости камеры затруднён, поскольку требуемые для него исходные величины не поддаются точному измерению. Гибкость камеры определяют согласно процедуре [4], основанной на допущении, что чувствительность гидрофона сохраняется при изменении гибкости C_a системы, а сама гибкость не зависит от частоты.

Бюджет погрешности калибровки гидрофона на установке Э-6

Источник	Значение, %
Неточность определения акустической гибкости измерительной камеры	2,8
Неточность определения акустической гибкости воды в камере	0,6
Неравномерность звукового давления в измерительной камере	0,5
Измерение отношения напряжений	0,5
Нелинейность измерительного тракта установки	0,4
Отношение сигнал–шум	0,4

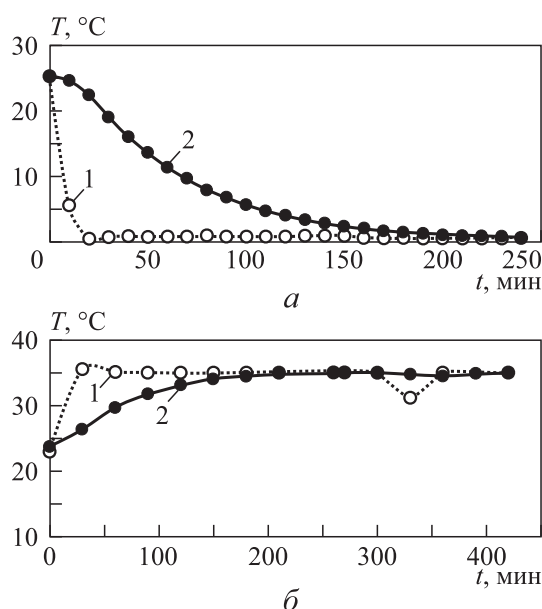


Рис. 2. Установление температуры воды (2) в измерительной камере и температуры камеры тепла и холода (1) при охлаждении (а) и нагреве (б)

Fig. 2. Setting the water temperature (2) in the measuring coupler and the temperature in the chamber of heat and cold (1) during cooling (a) and heating (b)

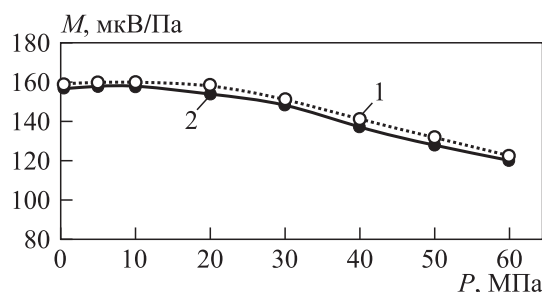


Рис. 3. Зависимость чувствительности глубоководных пьезокерамических обратимого преобразователя (1) и гидрофона (2) от статического давления

Fig. 3. The dependence of the sensitivity of deep-sea piezoceramic hydrophone (1) and a reversible transducer (2) on static pressure

Для системы с исходной гибкостью $(C_a)_1$ вычисляют параметр A_1 , выполнив измерения электрических величин U, I . Затем изменяют акустическую гибкость системы на известное значение, помещая в камеру жёсткое тело известного объёма ΔV . Повторяют измерение электрических величин и вычисляют параметр A_2 для системы с изменённой гибкостью $(C_a)_2$. Гибкость C_k определяют по формуле [4]:

$$C_k = A_2 \Delta C_B / (A_2 - A_1) - C_B,$$

где $\Delta C_B = \Delta V / (\rho c^2)$.

По найденному значению C_k определяют гибкость системы C_a и параметр взаимности, который подставляют в

формулу (1) для расчёта чувствительности калибруемого гидрофона.

Особенности выполнения калибровочных работ на установке Э-6. В отличие от низкочастотных камер, используемых при малых статических давлениях, микропузырьки воздуха, увлекаемые в измерительную камеру при её заполнении водой, установке преобразователей и калибруемого гидрофона, а также жёсткого тела, не оказывают влияния на результаты измерений. Причина этого – схлопывание микропузырьков при значительных статических давлениях. Установление заданного статического давления занимает не более нескольких минут, однако установление температуры требует значительно большего времени. На рис. 2 показаны процессы установления предельных низкой 0,5 °C и высокой 35 °C температур воды в измерительной камере установки Э-6. По приведённым зависимостям можно судить о времени, требуемом для подготовки к выполнению измерений. В отличие от камеры тепла и холода, в которой температура устанавливается достаточно быстро (кривая 1), установление заданной температуры воды в измерительной камере (кривая 2) может занимать до четырёх часов. Следует отметить, что камера тепла и холода работает в режиме старт–стоп, т. е. при включении–выключении нагревателя или охладителя. При этом температура колеблется около среднего значения, задаваемого оператором. Циклические изменения температуры воды в измерительной камере приводят к изменению давления, что нарушает условия измерительного эксперимента. Влияние изменений температуры в камере тепла и холода на результат калибровки «сглаживается» благодаря тепловой инерции измерительной камеры. Для оценки этого влияния при достижении в измерительной камере установившейся температуры 35 °C дверцу камеры тепла и холода открывали и оставляли открытой на 10, 20 и 30 минут, при этом температура в камере тепла и холода опускалась. Достаточность тепловой инерции оценивали по изменениям температур в камере тепла и холода и измерительной камере. Заметные изменения температуры воды в измерительной камере наблюдались при открывании дверцы на 30 минут. Температура в камере тепла и холода опускалась на 5 °C (см. рис. 2, а, провал кривой 1), изменение температуры воды в измерительной камере за это время не превысило 0,2 °C.

На рис. 3 представлены зависимости от статического давления чувствительности однотипных гидрофона и обратимого преобразователя с активными элементами в виде пьезокерамической радиально поляризованной сферы диаметром 40 мм и толщиной стенки 3 мм. С увеличением статического давления до 60 МПа изменение чувствительности глубоководного гидрофона может достигать 25–30 %.

Результаты калибровки обратимого преобразователя при различных сочетаниях температуры и давления дают возможность контролировать качество измерительного эксперимента, для чего их накапливают в базе данных.

Из представленных графиков также можно сделать вывод о том, что для однотипных гидрофонов зависимости

чувствительности от статического давления близки настолько, что возможно использовать эталонную установку для определения типовой калибровочной кривой, которая может быть использована, например, для введения поправок на статическое давление, как это принято для микрофонов.

Закключение. На первый взгляд техническая задача эталона – обеспечить калибровку (поверку) любого разрабатываемого СИ. Однако такой подход нерационален по ряду причин. С одной стороны, производ в конструировании гидроакустических СИ требует создания большого парка эталонов, которые должны быть прослеживаемы к эталонам, участвующим в ключевых сличениях. С другой стороны, стандартизация методик измерений накладывает свои требования на конструкцию самого СИ. То есть СИ должно обеспечивать возможность прослеживаемой калибровки, удовлетворяя при этом требованиям методик измерений, стандартизованных на международном уровне.

Создание эталонной установки приводит к тому, что на конструкцию СИ накладываются дополнительные ограничения, определяемые как конструкцией эталона, так и реализованными в нём методами воспроизведения единицы. В воздушной акустике это привело к созданию международных стандартов на эталонные и измерительные микрофоны, в которых оговорены как основные электроакустические, так и геометрические параметры микрофонов. В гидроакустике такая работа только предстоит. Например, рекордер подводного звука в настоящее время – «чёрный ящик», у которого доступ к гидрофону и его выходному сигналу крайне затруднён либо невозможен. Другой пример – цифровой гидрофон обязан обеспечивать измерения методом, применённым в эталоне, например, стробирование сигнала при использовании в эталоне тонально-импульсного метода.

Таким образом, вновь создаваемые для работы на больших глубинах гидрофоны должны конструироваться с учётом возможности их калибровки на эталонной установке Э-6. Гидрофоны рекордеров, глубоководных измерительных станций и других подобных устройств должны быть совместимы с измерительной камерой эталона по габаритным размерам, уплотнению и посадочным местам, а выходной сигнал гидрофона при калибровке должен быть доступен с учётом упомянутых выше требований.

Возможность заместить сигнал активного элемента гидрофона сигналом внешнего источника позволит значительно сократить загруженность эталона при калибровке рекордеров и подобных устройств, заменив, где это возможно, акустические измерения более точными и менее трудоёмкими электрическими измерениями.

Список литературы

1. Beamiss G. A., Hayman G., Robinson S. P., Thompson A. D., Improvements in the provision of standards for underwater acoustics at simulated ocean conditions. NPL REPORT DQL-AC 010. December 2004. [Электронный ресурс]. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/f77e/388694f90009b5e3c15295649f1e2b7ef4c5.pdf> (дата обращения: 04.12.2019).
2. Beamiss G. A., Robinson Stephen P., Hayman G., Esward T. J., *Acta Acustica united with Acustica*, 2002, vol. 88, pp. 799–802.
3. Боббер Р. Дж. Гидроакустические измерения; пер. с англ. под ред. А. Н. Голенкова. М.: Мир, 1974. 362 с.
4. Некрасов В. Н., Некрич С. Ф. Модифицированный метод взаимности для градуировки гидрофонов в камерах малого объёма // Измерительная техника. 1988. № 1. С. 43–45.

References

1. Beamiss G. A., Hayman G., Robinson S. P., Thompson A. D., Improvements in the provision of standards for underwater acoustics at simulated ocean conditions // NPL REPORT DQL-AC 010. December 2004, available at: <https://pdfs.semanticscholar.org/f77e/388694f90009b5e3c15295649f1e2b7ef4c5.pdf> a9 (accessed: 12/04/2019).
2. Beamiss G. A., Robinson Stephen P., Hayman G., Esward T. J., *Acta Acustica united with Acustica*, 2002, vol. 88, pp. 799–802.
3. Bobber R. J., *Underwater electroacoustic measurements*, Washington, U. S. Government Printing Office, 1970.
4. Nekrasov V. N., Nekrich S. F., *Measurement Techniques*, 1988, vol. 31, no. 1, pp. 77–81. DOI: 10.1007/BF00865770

Дата поступления: 25.10.2019.

Дата принятия: 25.11.2019.

Calibration of hydrophones taking into account the conditions of their use

Alexander E. Isaev, Sergey F. Nekrich, Ilya V. Chernikov

Russian metrological institute of technical physics and radio engineering measurements, Mendeleev, Moscow region, Russian Federation, e-mail: isaev@vniiftri.ru., iii@vniiftri.ru

A measuring facility for reproducing a unit of sound pressure at frequencies of 1–500 Hz in the temperature range of 0.5–35 °C with excessive static pressures up to 60 MPa is described. The measuring facility was created in order to expand the functionality of the State primary standard GET 55-2017. The expediency of simulated ocean conditions in GET 55-2017 under hydrophone calibration, the principles of operation and the metrological characteristics of the measuring facility are discussed. Features of the measuring procedure for calibrating the hydrophone are given.

Key words: underwater acoustics, hydrophone calibration, high-pressure coupler, acoustical compliance.