

**ПОДХОДЫ К АМПЛИТУДНО-ФАЗОВОЙ КАЛИБРОВКЕ
ГИДРОФОНА МЕТОДОМ ВЗАИМНОСТИ**

А.Е. Исаев, А.М. Поликарпов, Б.И. Хатамтаев

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл., Россия,

isaev@vniiiftri.ru,

a_polycarpov@vniiiftri.ru,

hatamtaev@vniiiftri.ru

Аннотация. Обсуждаются проблемы использования геометрического центра и номинального размера активного элемента при измерениях фазочастотной характеристики чувствительности гидрофона методом взаимности. По результатам экспериментальных исследований гидрофонов различных типов установлено, что смещение акустического центра гидрофона относительно его геометрического центра – распространённое явление, которое существенно влияет на точность измерений фазовой характеристики. Номинальный и измеренный акустически размеры активного элемента гидрофона могут значительно различаться. Показано, что для пересчёта амплитудно-частотной характеристики гидрофона в фазочастотную и наоборот предпочтительно определять положение акустического центра и размер активного элемента гидрофона акустическим способом.

Ключевые слова: амплитудно-фазовая калибровка гидрофона, акустический центр гидрофона, эквивалентный радиус активного элемента.

**APPROACHES TO THE AMPLITUDE-PHASE
CALIBRATION OF A HYDROPHONE BY THE
RECIPROCITY METHOD**

A.E. Isaev, A.M. Polikarpov, B.I. Khatamtaev

FSUE “VNIIFTRI”, Mendeleev, Moscow region, Russia,

isaev@vniiiftri.ru,

a_polycarpov@vniiiftri.ru,

hatamtaev@vniiiftri.ru

Abstract. The problems of using the geometric center and the nominal size of the active element in measuring the phase-frequency response of the hydrophone by the reciprocity method are discussed. According to the results of experimental studies of hydrophones of various types, it was found that the displacement of the acoustic center of a hydrophone relative to its geometric center is a common phenomenon that significantly affects the accuracy of measurements of the phase-frequency response. The nominal and acoustically measured dimensions of the hydrophone active element can differ significantly. It is shown that in order to recalculate the amplitude-frequency response of a hydrophone into a phase-frequency response and vice versa, it is preferable to determine the position of the acoustic center and the size of the active element of the hydrophone using the acoustic method.

Keywords: amplitude-phase hydrophone calibration, hydrophone acoustic center, active element equivalent radius.

«Ничто так не обманывает нас, как наше мнение».
Леонардо да Винчи

Введение

Время не стоит на месте, ставя перед метрологией гидроакустических измерений всё новые и новые проблемы. Одна из них — определение фазочастотной характеристики приёмника подводного звука, продиктована задачами контроля фазовых характеристик элементов гидроакустических антенн различного назначения [1, 2], необходимостью обеспечить идентичность фазочастотных характеристик измерительных каналов приёмников векторных гидроакустических величин [3], решения задач, связанных с восстановлением формы акустического сигнала по напряжению, зарегистрированному на выходе приёмника, для различных приложений, в том числе экология моря, медицинский ультразвук и др. [4–7].

Для оснащения нового специального многофункционального метрологического бассейна, создаваемого во ВНИИФТРИ, разрабатывается установка первичного эталона нового поколения для комплексной калибровки измерительных приёмников подводного звука. Особенность эталонной установки — будет обеспечена возможность получать частотные зависимости модуля (АЧХ) и аргумента (ФЧХ) комплексной чувствительности приёмника.

Измерения амплитуд и фаз электрических сигналов проблем не представляют. Соответственно, получив комплексные значения электрических передаточных импедансов, не составит труда вычислить комплексную чувствительность приёмника. Однако результат вычислений зависит от того, какой акустический смысл был вложен в исходные измерения. Например, к неприемлемо большим погрешностям определения аргумента чувствительности может приводить использование при вычислениях положения геометрического центра (ГЦ) активного элемента приёмника вместо его акустического центра (АЦ). Это один из распространённых на практике примеров подмены акустических понятий геометрическими. Оказалось, что подобные упрощения, приемлемые при измерениях модуля, недопустимы при измерениях аргумента чувствительности. Ситуация усугубляется в измерительных случаях, когда перестают работать акустические понятия, например замена гидрофона его АЦ. В расчёты при измерениях по методу взаимности входит расстояние между АЦ. Казалось бы, оно равно расстоянию, которое проходит звуковая волна при распространении от излучателя к приёмнику. Это расстояние можно получить, излучив короткий импульс и измерив временную задержку между моментами начала излучения и приёма. Однако начало приёма сигнала гидрофоном опережает по времени приход звуковой волны в точку расположения его АЦ. Измеренное расстояние будет расстоянием, пройденным фронтом звуковой волны, но не расстоянием, которое следует использовать при калибровке по полю методом взаимности. Метод взаимности использует понятие сферической волны, волновая поверхность которой — сфера радиуса r , а изменение звукового давления пропорционально $1/r$.

Для реальных излучателя и приёмника, которые не являются математическими точками, а имеют размер, фронт волны (граница поверхность, разделяющая возмущённую и невозмущённую среду) и волновая поверхность — не одно и то же. Добавив к расстоянию, пройденному фронтом, значения радиусов активных элементов излучателя и приёмника, получим расстояние, которое можно использовать в расчётах по методу взаимности. Это расстояние и принимают в качестве расстояния между АЦ [8]. Таким образом, вновь, упрощая акустическую модель, используют радиус — понятие геометрическое, и вновь совершают подмену, принимая одно в качестве другого.

Такие подмены приводят к тому, что при использовании процедуры амплитудно-фазовой калибровки гидрофона методом взаимности, стандартизованной в последней версии МЭК 60565, погрешность аргумента чувствительности предложено уменьшать, размещая преобразователи по схеме Люкера — Ван Бюрена [9]. Однако этот приём полностью проблему не решает. На практике применяют прецизионные 3D-системы для позиционирования калибруемого приемника по ГЦ его активного элемента [5]. ВНИИФТРИ разработал свои более точные и менее трудоёмкие приёмы: использование поправки на смещение АЦ при развороте приёмника при его калибровке [10], расчёт ФЧХ приёмника по его относительной АЧХ с использованием преобразования Гильберта [11]. Однако несмотря на принимаемые меры, измерения модуля и измерения аргумента чувствительности остаются далеко не равноточными. Стандартизованный в МЭК 60565 метод калибровки и его модификация с использованием прецизионной системы юстировки ГЦ по лучу лазера — это подмена АЦ на ГЦ со всеми вытекающими последствиями.

Акустический центр измерительного гидрофона

В [12] предложен способ определения положения АЦ измерительного гидрофона. Результаты исследований гидрофонов различных типов с использованием этого способа показали, что смещение АЦ гидрофона относительно его ГЦ — вполне характерное явление.

В таблице 1 смещения АЦ для гидрофонов ГИ-20, ГИ-21, ОП-1 (производитель ФГУП «ВНИИФТРИ») и TC4034 фирмы Reson представлены в плоскости, перпендикулярной оси гидрофона, величиной полярного радиуса Δ — расстояние до ГЦ, и углом α_0 — направление смещения относительно опорного направления гидрофона. Среднее смещение по всем типам гидрофонов составляет примерно 0,5 мм (около 20 % от средней толщины покрытия рассмотренных гидрофонов). Измеряя задержку фронта принятой гидрофоном звуковой волны, это смещение удалось определить с точностью 12–15 %.

Таблица 1

Тип гидрофона	Ø активного элемента, мм	Ø контура активного элемента, мм	Смещение Δ , мкм	Угол α_0 , °
ГИ 20	20	23	664 ± 71	99
ОП-1	40	44	252 ± 45	299
ГИ-20	20	27	710 ± 89	210
ГИ 21	10	13	452 ± 52	285
TC4034	6	11	288 ± 38	137

К источникам погрешности определения координат АЦ по задержке фронта звуковой волны относятся:

- погрешность измерения временных задержек импульсов излучателя, принятых гидрофоном при изменении угла падения звуковой волны;
- погрешность фиксации ГЦ гидрофона в опорном направлении излучателя;
- смещение ГЦ гидрофона в направлении, перпендикулярном опорному направлению излучателя;
- погрешность, обусловленная влиянием вибрации.

В эксперименте последовательно излучали и принимали гидрофоном косинусные и синусные тональные импульсы, из которых строили аналитические сигналы. Используя квадратурную обработку, получали огибающие — временные зависимости модуля и фазы аналитических сигналов [12]. Малые смещения оси вращения гидрофона обеспечивали прецизионной системой 3D-позиционирования, контролируя положение оси по лучу лазера с помощью фотокамеры и фотодетектора. Применение малошумящего усилителя по напряжению в сочетании с когерентным накоплением принятых гидрофоном сигналов позволило значительно увеличить отношение «сигнал / шум» осциллографа, которые использовали для дальнейшей обработки. Для повышения точности определяли не задержки во времени принятых гидрофоном импульсов излучателя, а зависимость изменения этой задержки от угла падения звуковой волны [12], используя характерный участок в начальной части фронта огибающих. Частота дискретизации сигнала аналого-цифровым преобразователем составляла 500 МГц, что даёт оценку границы погрешности измерения смещения не более 3 мкм. Минимальный шаг перемещения 3D-позиционирующей системы 12 мкм принимали в качестве оценки погрешности фиксации оси вращения гидрофона.

Разрешение матрицы фотокамеры, её удалённость от гидрофона и кратность увеличения объектива были подобраны такими, что размер одного пикселя изображения в опорном направлении излучателя соответствовал 22 мкм. Положения контура гидрофона до и после его поворота выравнивали с точностью в 1 пиксель изображения.

Смещение ГЦ в направлении перпендикулярном опорному направлению излучателя контролировали с помощью лазерного луча и фотодетектора. Было установлено, что погрешностью, вызванной этим смещением, можно пренебречь.

Погрешность положения оси вращения гидрофона была оценена не пре-восходящей 22 мкм. Суммарная систематическая погрешность результата измерения смещения АЦ гидрофона относительно ГЦ составила 25 мкм, СКО — от 10 до 15 %.

Эквивалентный радиус активного элемента

В [14] при калибровке ультразвуковых гидрофонов с использованием сфокусированного ультразвукового луча обратили внимание на различие геометрических (номинальных) и измеренных акустически размеров активных элементов гидрофонов. Влияние на результат калибровки пространственного усреднения звукового давления на активном элементе гидрофона оценивают количественно, используя как геометрические, так и измеренные эффективные размеры элемента. В результате исследования ряда гидрофонов было обнаружено, что разница между геометрическим и измеренным значением размера активного элемента гидрофона может оказаться настолько большой, что для таких оценок можно было использовать только измеренный размер.

Чтобы получить ФЧХ расчётным методом требуется знать радиус активного элемента приёмника. Но что понимать под радиусом, чтобы, добавив к минимально-фазовой части фазочастотной характеристики (МФЧХ) фазовый набег на этом радиусе, получить ФЧХ гидрофона [9, 14, 15]? Результаты экспериментов дают основание полагать, что геометрический и измеренный акустически размеры активного элемента могут различаться не только для ультразвуковых гидрофонов.

На рис. 1 и 2 приведены: рядами 1 — ФЧХ гидрофонов TC4033 и B&K8103, полученные с использованием стандартизованной измерительной процедуры комплексной калибровки по методу взаимности, дополненной введением поправки на смещение АЦ при развороте калибруемого гидрофона; рядами 2 — МФЧХ, полученные расчётным методом с использованием преобразования Гильберта относительной АЧХ гидрофона; рядами 3 — разности ФЧХ и МФЧХ, которые практически совпадают с аппроксимирующими их наклонными пунктирными прямыми. Согласно предложенной в [11] модели гидрофона ряды 3 — частотные зависимости звена опережения и представляют собой фазовый набег kr звуковой волны при её распространении на расстояние, равное радиусу активного элемента гидрофона r . Как и

следовало ожидать, аппроксимирующие прямые проходят через начало координат. Исходя из наклонов прямых радиусы активных элементов гидрофонов должны составлять 3,73 мм для гидрофона B&K8103 и 7,93 мм для гидрофона TC4033. Однако это не соответствует радиусам 4,75 и 12,5 мм, которые приводят производители в технических описаниях на гидрофоны (рис. 3). О размерах собственно активного элемента, скрытого непрозрачным влагонепроницаемым покрытием, либо толщине его покрытия в технических описаниях умалчивается.

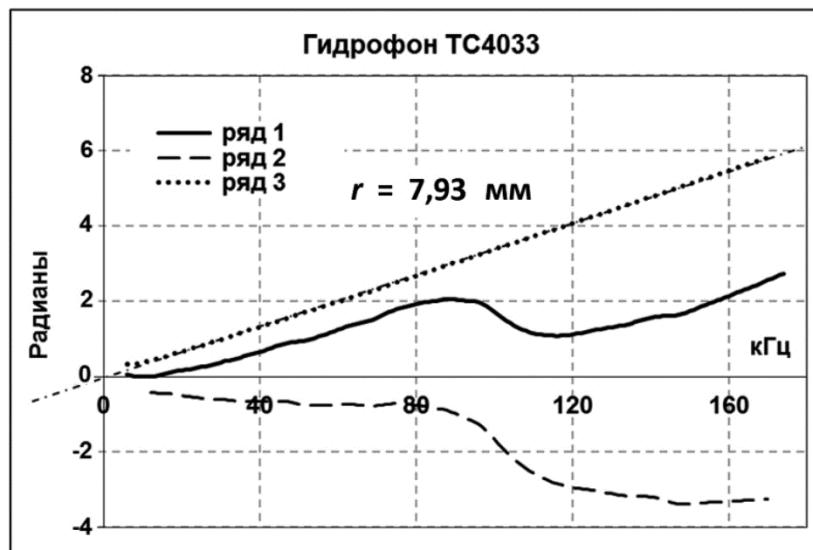


Рис. 1. Фазочастотные характеристики гидрофона TC4033

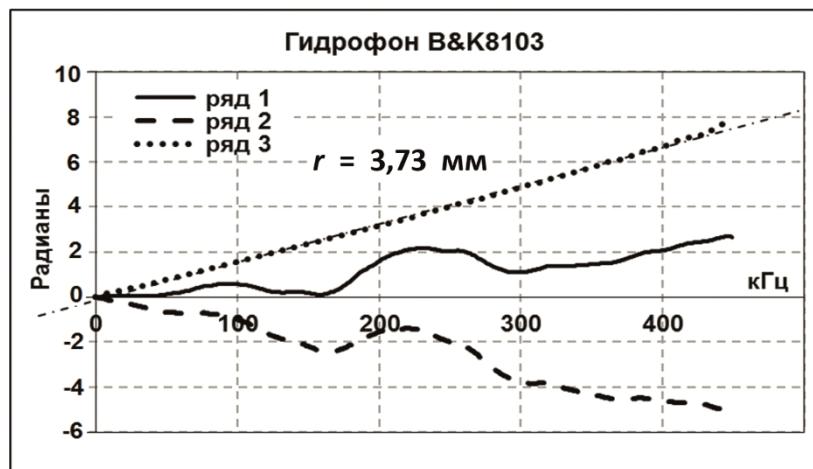


Рис. 2. Фазочастотные характеристики гидрофона B&K8103

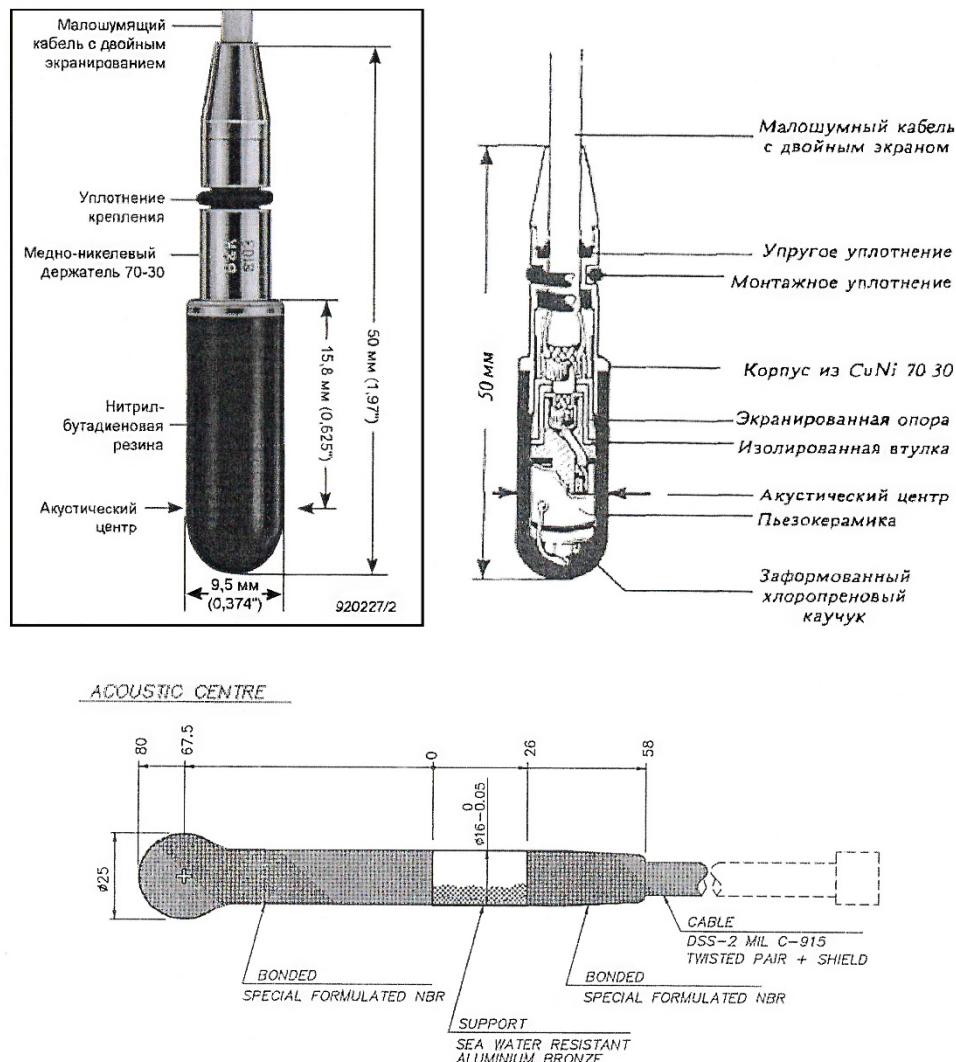


Рис. 3. Конструкция и характерные размеры гидрофонов B&K8103 (а) и TC4033 (б)

Гидрофон ГИ-20 имеет пьезокерамической активный элемент диаметром 20 мм, состоящий из двух полусфер либо цельной сферы. Толщина слоя влагонепроницаемого покрытия составляет 2 мм для цельной сферы и 4 мм для сборной. На рис. 4 приведены: ряд 1 — экспериментальная ФЧХ гидрофона ГИ-20; ряд 2 — МФЧХ, полученная расчётым методом по АЧХ; ряд 3 — разность ФЧХ и МФЧХ. Рядом 4 представлена зависимость kr , рассчитанная для указанного в документации значения радиуса пьезокерамической сферы $r = 10$ мм, которая существенно отличается от зависимости, представленной рядом 3, наклону которой соответствует значение радиуса 12,6 мм.

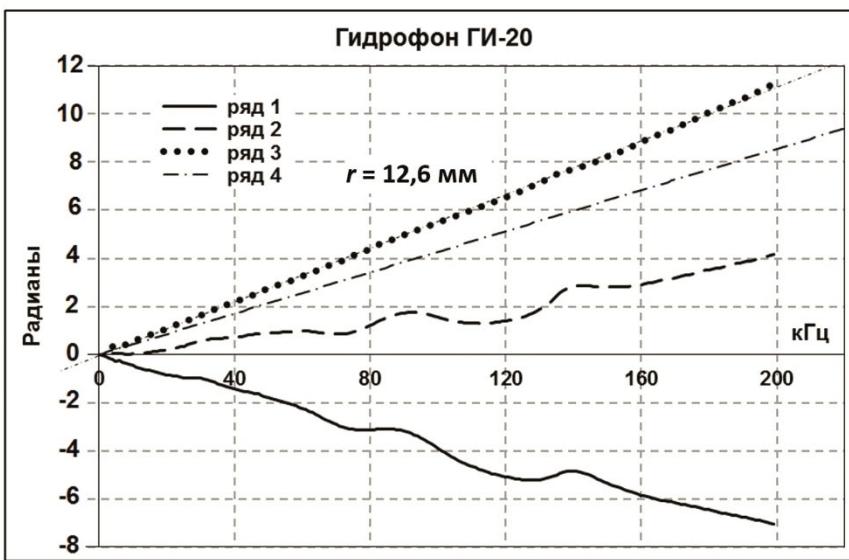


Рис. 4. Фазочастотные характеристики гидрофона ГИ-20

В числе причин, вызывающих это различие, можно назвать неравномерность толщины покрытия и стенок активного элемента, различную скорость распространения звука в материалах покрытия и активного элемента, отличие этих скоростей от скорости звука в среде, окружающей преобразователь, и т.п. При калибровке по фазе к точности числа, подставляемого в формулу измерений в качестве размера активного элемента, предъявляют повышенные требования, поэтому представляется целесообразным понимать этот размер не в геометрическом смысле, а как некий эквивалентный размер, который необходимо определять акустическим способом.

Предложенный в [12] способ определения эквивалентного радиуса активного элемента гидрофона основан на использовании временной задержки $\tilde{\tau}_{P-H}$ сигнала приёмника относительно начала излучения и координат АЦ излучателя P и приёмника H для определения расстояния r_{P-H} между ними. Время распространения звуковой волны на расстояние между точками расположения АЦ преобразователей $\tau_{P-H} = \frac{r_{P-H}}{c}$. Тогда разность $\Delta\tilde{\tau}_{P-H} = \tilde{\tau}_{P-H} - \tau_{P-H}$ — время пробега звуковой волны на расстояние, равное сумме расстояний \tilde{r}_P и \tilde{r}_H , под которыми понимают эквивалентные радиусы активных элементов излучателя и приёмника соответственно [12]. Для $\tilde{\tau}_P = \frac{\tilde{r}_P}{c}$ и $\tilde{\tau}_H = \frac{\tilde{r}_H}{c}$ — времён пробега звуковой волны расстояний \tilde{r}_P и \tilde{r}_H соответственно, выполняется равенство $\Delta\tilde{\tau}_{P-H} = \tilde{\tau}_P + \tilde{\tau}_H$.

Если для трёх пар «излучатель P — гидрофон H », «излучатель P — обратимый преобразователь T » и «обратимый преобразователь T — гидрофон H » определены $\Delta\tilde{\tau}_{P-H} = \tilde{\tau}_P + \tilde{\tau}_H$, $\Delta\tilde{\tau}_{P-T} = \tilde{\tau}_P + \tilde{\tau}_T$ и $\Delta\tilde{\tau}_{T-H} = \tilde{\tau}_T + \tilde{\tau}_H$, то этих данных достаточно, чтобы вычислить значения эквивалентных радиусов всех трёх преобразователей \tilde{r}_P , \tilde{r}_T и \tilde{r}_H :

$$\begin{aligned}\tilde{r}_P &= c\tilde{\tau}_P = \frac{c(\Delta\tilde{\tau}_{P-T} - \Delta\tilde{\tau}_{T-H} + \Delta\tilde{\tau}_{P-H})}{2}, \\ \tilde{r}_T &= c\tilde{\tau}_T = \frac{c(\Delta\tilde{\tau}_{T-H} - \Delta\tilde{\tau}_{P-H} + \Delta\tilde{\tau}_{P-T})}{2}, \\ \tilde{r}_H &= c\tilde{\tau}_H = \frac{c(\Delta\tilde{\tau}_{P-H} - \Delta\tilde{\tau}_{P-T} + \Delta\tilde{\tau}_{T-H})}{2}.\end{aligned}$$

Для участвовавшего в эксперименте гидрофона ГИ-20 значение эквивалентного радиуса составило 12,1 мм, что значительно лучше согласуется с результатами, представленными на рис. 4.

Заключение

Значительное СКО при определении положения АЦ, обусловленное вибрацией, присутствовавшей в условиях эксперимента, не позволяет рассматривать представленные результаты, как окончательное значение эквивалентного радиуса исследованного гидрофона. Полученные результаты обозначили проблему — необходимость определения положений АЦ и эквивалентных радиусов преобразователей, участвующих в измерениях ФЧХ методом взаимности. Измерения ФЧХ можно выполнить различными способами: классическим — измеряя модули и аргументы комплексных передаточных импедансов пар «излучатель — приёмник», либо используя модель гидрофона в виде минимально-фазовой системы и звена опережения. Не исключены и другие подходы. В любом случае обозначенная проблема должна быть решена. В воздушной акустике малый разброс значений позволяет использовать одни и те же дифракционные поправки для микрофонов одного типа. В настоящее время очевидно, что использовать для гидрофонов типовые координаты АЦ невозможно, а возможность использования типовых значений эквивалентных радиусов ещё предстоит установить. Для этого необходимо уменьшить СКО измерений и набирать статистику по различным типам гидрофонов.

Немедленный практический результат, подобно ситуации с микрофонами, появляется для гидрофонов, у которых возможно использование типовых значений эквивалентных радиусов — ФЧХ гидрофонов можно будет определять на установках для измерения АЧХ. Ещё одно практическое следствие — появляется новый параметр, характеризующий качество гидрофонов —

малый разброс эквивалентных радиусов отдельных экземпляров. Для таких гидрофонов упрощается процедура передачи размера единицы по поверочной схеме — им достаточно передать только подробную АЧХ. Другое новое требование — высокая точность совмещения АЦ и ГЦ, по крайней мере, для эталонных гидрофонов.

Близость АЦ и ГЦ и малый разброс эквивалентных радиусов — параметры задаваемые и проверяемые, что позволяет использовать их как в процессе совершенствования конструкции гидрофонов, так и технологии их изготовления. Само наличие этих параметров у гидрофонов отечественного производства повышает их конкурентоспособность.

Метрологический результат описанных экспериментов — возможность совершенствования первичного эталона, опираясь на два метода измерения ФЧХ с существенно независимыми источниками погрешностей. Возможность пересчёта АЧХ в ФЧХ и наоборот позволяет контролировать качество измерительного эксперимента, которое зависит не только от эталонной установки, но и от калибруемого гидрофона. Благодаря этой возможности, на сличениях КООМЕТ 786 RU/19 в ситуации, сложившейся из-за нестабильности опорного гидрофона, удалось подтвердить правильность применённых участниками методик измерений и стабильность работы эталонных установок.

Список литературы

1. Базулин Е.Г., Соколов Д.М. Восстановление ультразвуковых изображений отражателей по неполным данным методом распознавания со сжатием // Акустический журнал. — 2019. — Т. 65. — № 4. — С. 520–532.
2. Росницкий П.Б., Сапожников О.А., Гаврилов Л.Р., Хохлова В.А. Метод создания абсолютно плотных фазированных решёток для неинвазивной ультразвуковой хирургии с контролем степени нерегулярности расположения элементов // Акустический журнал. — 2020. — Т. 66. — № 4. — С. 366–376.
3. Кузнецов Г.Н., Пудовкин А.А., Субботкин А.О. Уравнения для расчёта амплитудно- и фазочастотных характеристик векторно-скалярного приёмника типа «триполь» с временной задержкой сигнала монополя // Акустический журнал. — 2021. — Т. 67. — № 4. — С. 440–449.
4. Cooling M.P., Humphrey V.F. A nonlinear propagation model-based phase calibration technique for membrane hydrophones // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. — 2008. — V. 55. — P. 84–93.
5. Hayman G., Robinson S.P. Phase calibration of hydrophones by the free-field reciprocity method in the frequency range 10 kHz to 400 kHz // NPL Report AC1. — 2007. — P. 1–23.
6. Umchid S., Gopinath R., Srinivasan K. et al. Development of calibration techniques for ultrasonic hydrophone probes in the frequency range from 1 to 100 MHz // Ultrasonics. — 2009. — 49. — P. 306–311.

7. Harris G.R. Time-delay spectrometry measurement of magnitude and phase of hydrophone response // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. — 2011. — V. 58 (11). — P. 2325–2333.
8. Исаев А.Е. Точная градуировка приемников звукового давления в водной среде в условиях свободного поля. — Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2008. — 369 с.
9. Luker L.D., Van Buren A.L. Phase calibration of hydrophones // J. Acoust. Soc. Am. — 1981. — V. 70. — P. 516–519.
10. Исаев А.Е., Матвеев А.Н., Поликарпов А.М., Щерблюк Н.Г. Измерение фазочастотной характеристики чувствительности гидрофона по полю методом взаимности // Измерительная техника. — 2013. — № 6. — С. 56–59.
11. Исаев А.Е., Хатамтаев Б.И. Определение фазочастотной характеристики гидрофона по амплитудно-частотной характеристике // Измерительная техника. — 2021. — № 7. — С. 48–53.
12. Исаев А.Е., Поликарпов А.М., Хатамтаев Б.И. Экспериментальное определение акустического центра измерительного гидрофона // Альманах современной метрологии. — 2022. — № 2 (30). — С. 56–71.
13. Yoshioka M. Difference between Nominal and Measured Active Element Sizes of Hydrophones // Japanese Journal of Applied Physics. — 2008. — V. 47. — No. 5S. — P. 3926–3928.
14. Исаев А.Е., Хатамтаев Б.И. Аналитическое представление комплексной частотной характеристики гидрофона // Измерительная техника. — 2021. — № 8. — С. 16–20.
15. Jacobsen F., Barrera-Figueroa S., Rasmussen K. A note on the concept of acoustic center // J. Acoust. Soc. Am. — 2004. — 115. — P. 1468–1473.

Статья поступила в редакцию: 12.08.2022 г.

Статья прошла рецензирование: 10.10.2022 г.

Статья принята в работу: 02.11.2022 г.