

## Эквивалентный размер и акустический центр измерительного гидрофона

Александр Евгеньевич Исаев<sup>1✉</sup>, Булат Ильгизович Хатамтаев<sup>2</sup>

1, 2 Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений,  
г. п. Менделеево, Московская обл., Россия

<sup>1</sup>isaev@vniiftri.ru✉

<sup>2</sup>bulat\_3004@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8197-8160>

**Аннотация.** Рассмотрена проблема, возникающая при амплитудно-фазовой калибровке гидрофонов методом взаимности и заключающаяся в нарушении согласованности характеристик гидрофона, которые указывает производитель. Нарушение указанной согласованности характеристик обусловлено необходимостью определять фазочастотную характеристику при калибровке гидрофона. Размеры приёмной части гидрофона и положение акустического центра производитель устанавливает по чертежу приёмной части и тем самым подменяет акустические параметры геометрическими. Для восстановления согласованности характеристик предложено определять положение акустического центра и эквивалентный размер приёмной части гидрофона по результатам акустических измерений. Показано, что смещение акустического центра гидрофона относительно его геометрического центра – характерное явление, а геометрический и измеренный акустически размеры активного элемента могут различаться. Для обеспечения единства акустических измерений предложено ввести понятие эквивалентного радиуса и уточнить понятие акустического центра гидрофона, а также стандартизовать способы их экспериментального нахождения. Полученные результаты актуальны для различных приложений (в том числе, экология моря, медицинские ультразвуковые исследования) при контроле фазовых характеристик элементов гидроакустических антенн различного назначения, при обеспечении идентичности фазочастотных характеристик измерительных каналов векторных приёмников и при решении задач, связанных с восстановлением формы акустического сигнала по напряжению, зарегистрированному на выходе приёмника.

**Ключевые слова:** гидрофон, амплитудно-фазовая калибровка, метод взаимности, акустический центр гидрофона, эквивалентный радиус активного элемента

**Для цитирования:** Исаев А. И., Хатамтаев Б. И. Эквивалентный размер и акустический центр измерительного гидрофона // Измерительная техника. 2022. № 12. С. 58–63. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-12-58-63>

## Equivalent size and acoustic center of measuring hydrophone

Alexander E. Isaev<sup>1✉</sup>, Bulat I. Khatamtaev<sup>2</sup>

<sup>1, 2</sup> Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering, Mendeleevo, Moscow region, Russia

<sup>1</sup>isaev@vniiftri.ru✉

<sup>2</sup>bulat\_3004@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8197-8160>

**Abstract.** The problem that arises during the amplitude-phase calibration of hydrophones by the reciprocity method and consists in the violation of the consistency of the hydrophone characteristics specified by the manufacturer is considered. Violation of the indicated consistency of characteristics is due to the need to determine the phase-frequency characteristic when calibrating the hydrophone. The manufacturer sets the dimensions of the receiving part of the hydrophone and the position of the acoustic center according to the drawing of the receiving part and, thereby, replaces the acoustic parameters with geometric ones. To restore the consistency of the characteristics, it is proposed to determine the position of the acoustic center and the equivalent size of the receiving part of the hydrophone from the results of acoustic measurements. It is shown that the displacement of the acoustic center of a hydrophone relative to its geometric center is a characteristic phenomenon, while the geometric and acoustically measured dimensions of the active element may differ. To ensure the unity of acoustic measurements, it is proposed to introduce the concept of an equivalent radius and to clarify the concept of the acoustic center of a hydrophone, as well as to standardize the methods of their experimental determination. The results obtained will be useful in monitoring the phase responses of elements of hydroacoustic antennas for various purposes, ensuring the identity of the phase-frequency characteristics of the vector receivers measuring channels, in solving problems related to restoring the shape of an acoustic signal from the recorded output receiver voltage, for various applications, including marine ecology, medical ultrasound, etc.

**Keywords:** hydrophone, amplitude-phase hydrophone calibration, reciprocity method, hydrophone acoustic center, active element equivalent radius

**Введение.** При калибровке и эксплуатации гидрофона используется сложившийся набор его характеристик. К характеристикам гидрофона относятся размеры приёмной части и положение акустического центра (АЦ), которые производитель определяет по чертежу приёмной части, тем самым подменяя акустические параметры геометрическими. Пока основной метрологической характеристикой гидрофона было значение модуля чувствительности на частоте звуковой волны при её падении с опорного направления, применение полученных по чертежу (как указано выше) характеристик позволяло с необходимой точностью выравнять преобразователи на одном горизонте при калибровке, проверять выполнение закона обратной пропорциональности звукового давления расстоянию, определять модуль чувствительности и характеристики направленности. Необходимость использования, взаимообусловленность и согласованность характеристик гидрофона в наибольшей степени проявляется при его калибровке по полю. Положение АЦ требуется знать, чтобы установить преобразователи в бассейне и выровнять их на одном горизонте, а габаритные размеры приёмной части – для определения расстояния между излучателем и приёмником акустическим способом с учётом поправки на радиусы. При измерениях характеристики направленности (угловой зависимости модуля чувствительности) гидрофон поворачивают вокруг оси его симметрии.

По мере расширения круга задач гидроакустических измерений потребовалось определять фазочастотную характеристику (ФЧХ) гидрофона с целью контроля фазовых характеристик элементов гидроакустических антенн различного назначения [1, 2], обеспечения идентичности ФЧХ измерительных каналов приёмников векторных гидроакустических величин [3], восстановления формы акустического сигнала по напряжению, зарегистрированному на выходе приёмника, а также для различных приложений (экология моря, медицинский ультразвук и др.) [4–7].

Включение ФЧХ в набор нормируемых характеристик гидрофона влечёт за собой необходимость не только уточнить смысловую нагрузку традиционно используемых характеристик, но и, возможно, расширить этот набор. Для измерения аргумента комплексной чувствительности и фазовой характеристики направленности потребовалось повысить точность определения координат АЦ. В силу взаимообусловленности характеристик повышение требований к точности определения координат АЦ нарушило согласованность и сложившийся порядок использования характеристик гидрофона при его калибровке, например, стали вращать гидрофон относительно оси, проходящей через АЦ, а не оси симметрии гидрофона. Для точной локализации АЦ необходимо разрабатывать новые способы определения его координат.

Применяемый ранее акустический способ давал настолько низкую точность определения положения АЦ, что предпочтительнее было использовать назначенное производителем положение АЦ. Однако назначенное положение

АЦ во многих случаях оказалось непригодным для определения ФЧХ гидрофона. Чтобы восстановить согласованность характеристик гидрофона, положение АЦ определяли по результатам не геометрических, а акустических измерений. Попытка разработать способы уточнения положения АЦ привели к появлению нового понятия – акустического размера приёмной части гидрофона.

По комплексным значениям электрических передаточных импедансов пар «излучатель – приёмник» можно вычислить комплексную чувствительность приёмника по формуле метода взаимности. Однако результат вычислений зависит от того, какой акустический смысл был вложен в исходные измерения. Например, к неприемлемо большим погрешностям определения аргумента чувствительности может привести использование при вычислениях положения геометрического центра (ГЦ) активного элемента преобразователя вместо его АЦ. Оказалось, что подобные упрощения, приемлемые при измерениях модуля, недопустимы при измерениях аргумента чувствительности. Ситуация усугубляется в измерительных случаях, когда перестают работать и акустические понятия, например, замена гидрофона на его АЦ. В расчёты при измерениях методом взаимности входит расстояние между АЦ. Казалось бы, оно равно расстоянию, которое пробегает 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. Поэтому измеряется расстояние, пройденное фронтом звуковой волны, но не расстояние, которое следует использовать при калибровке по полю методом взаимности. В методе взаимности применяется понятие сферической волны, волновая поверхность которой – сфера радиусом  $r$ , а изменение звукового давления пропорционально  $1/r$ .

Для реальных излучателя и приёмника, которые не являются математическими точками, а имеют размер, фронт волны (граничная поверхность, разделяющая возмущённую и невозмущённую среды) 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 при методе 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 амплитудно-фазовой калибровке гидрофона методом взаимности, стандартизованной в последней версии ИЕС 60565-1(2020)<sup>1</sup>, 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 позиционирования

<sup>1</sup> ИЕС 60565-1(2020). Подводная акустика. Гидрофоны. Калибровка гидрофонов. Часть 1. Процедуры калибровки гидрофонов в свободном поле.

калибруемого приёмника по ГЦ его активного элемента [5], используют поправки на смещение АЦ при развороте приёмника при его калибровке [10], получают ФЧХ приёмника по относительной амплитудно-частотной характеристике (АЧХ) с применением преобразования Гильберта [11]. Однако, несмотря на принимаемые меры, результаты измерений модуля и измерений аргумента чувствительности остаются далеко не равноточными. Стандартизованный в IEC 60565-1 (2020) метод калибровки и его модификация с участием прецизионной системы юстировки ГЦ по лучу лазера – это подмена АЦ на ГЦ со всеми вытекающими последствиями.

Цель настоящей работы – уточнение и дополнение набора нормируемых характеристик гидрофонов для обеспечения требуемой точности акустических измерений при решении расширенного круга измерительных задач.

**Положение акустического центра измерительного гидрофона.** В [12] предложен способ определения положения АЦ измерительного гидрофона, измерительный эксперимент описан в [13]. По итогам исследований гидрофонов различных типов указанным способом установлено, что смещение АЦ гидрофона относительно его ГЦ – характерное явление. В таблице приведены параметры гидрофонов ГИ-20, ГИ 20 (в данном случае гидрофоны ГИ 20 и ГИ-20 рассматриваются как разные гидрофоны, так как имеют разную толщину покрытия, т. е. разные диаметры контура активного элемента) ГИ 21, ОП-1 (ВНИИФТРИ, Россия) и ТС4034 (Teledyne RESON A/S, Дания): диаметры активного элемента  $D$  и его контура  $d$ , а также смещение  $\Delta$  (расстояние до ГЦ с учётом суммарной неопределённости результата измерения смещения АЦ гидрофона относительно ГЦ) и угол  $\alpha_0$  (направление смещения относительно опорного направления гидрофона).

Среднее смещение АЦ для гидрофонов всех типов составляет примерно 0,5 мм (около 20 % средней толщины покрытия гидрофонов). Измерив задержку фронта принятой гидрофоном звуковой волны, удалось определить смещение с погрешностью 12–15 %.

К источникам неопределённости экспериментального определения координат АЦ относятся:

неопределённость измерения временных задержек импульсов излучателя (длины пути пробега звуковой волны), принятых гидрофоном при изменении угла падения звуковой волны;

неопределённость фиксации ГЦ гидрофона в опорном направлении излучателя;

сдвиг ГЦ гидрофона в направлении, перпендикулярном опорному направлению излучателя;

влияние вибрации.

Параметры гидрофонов

| Гидрофон | $D$ , мм | $d$ , мм | $\Delta$ , мкм | $\alpha_0$ , ° |
|----------|----------|----------|----------------|----------------|
| 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            |
| ТС4034   | 6        | 11       | 288±38         | 137            |

В эксперименте, описанном в [13], по последовательно излучённым и принятым гидрофоном косинусным и синусным тональным импульсам строили аналитические сигналы. После квадратурной обработки сигналов получали огибающие – временные зависимости модуля и фазы аналитических сигналов [12]. Малые смещения оси вращения гидрофона обеспечивали прецизионной 3D-системой позиционирования, контролируя положение оси по лучу лазера с помощью фотокамеры и фотодетектора. Применение малошумящего усилителя в сочетании с когерентным накоплением принятых гидрофоном сигналов позволило значительно увеличить отношение сигнал/шум осциллограмм, 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 неопределённости измерения пути пробега звуковой волны не более 3 мкм. В качестве оценки неопределённости фиксации оси вращения гидрофона принимали минимальный шаг перемещения 3D-системы позиционирования 12 мкм.

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

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

В экспериментах значение стандартной неопределённости типа А достигало 15 % измеренного значения смещения. Возможная причина – вибрация в лабораторном помещении. Неопределённость типа В составила 25 мкм. Значения суммарной неопределённости результата измерения смещения АЦ гидрофона относительно ГЦ приведены в таблице.

**Эквивалентный радиус активного элемента.** В [14] при калибровке ультразвуковых гидрофонов с использованием сфокусированного ультразвукового луча установлено различие геометрических (номинальных) и измеренных акустически размеров активных элементов гидрофонов. Влияние на результат калибровки пространственного усреднения звукового давления на активном элементе гидрофона оценивали количественно как по геометрическим, так и по измеренным акустически размерам элемента. В результате исследования ряда гидрофонов авторы [14] обнаружили, что разница между геометрическим и акустическим размером активного элемента гидрофона может оказаться настолько большой, что для таких оценок можно использовать только акустический размер.

Чтобы получить ФЧХ расчётным методом требуется знать радиус активного элемента приёмника. Однако неясно, что понимать под радиусом, чтобы, добавив к минимально-фазовой части ФЧХ (МФЧХ) фазовый набег на этом

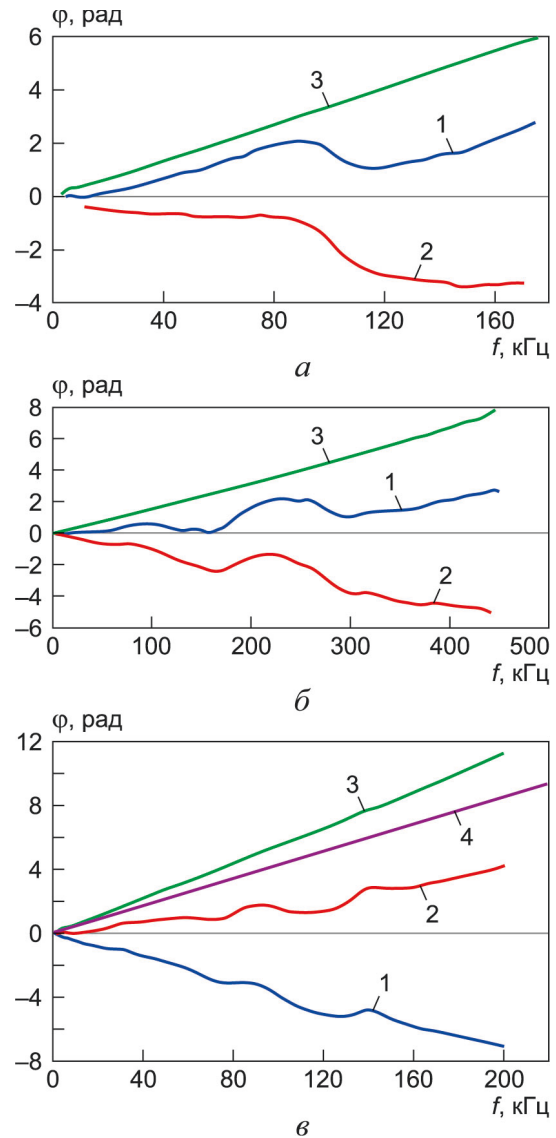
радиусе, получить ФЧХ гидрофона [9, 11, 15, 16]. Результаты экспериментов, выполненных на Государственном первичном эталоне единиц звукового давления и колебательной скорости в водной среде ГЭТ 55-2017 [12, 13], дают основание полагать, что геометрический и измеренный акустически размеры активного элемента могут различаться не только для ультразвуковых гидрофонов.

На рисунках *а, б* приведены следующие характеристики гидрофонов TC4033 (Teledyne RESON A/S, Дания) и B&K8103 (Brüel&Kjaer, Дания): ФЧХ (1), полученные по стандартизованной измерительной процедуре комплексной калибровки методом взаимности, дополненной введением поправки на смещение АЦ при развороте калибруемого гидрофона; МФЧХ (2), рассчитанные с использованием преобразования Гильберта относительной АЧХ гидрофона; разности ФЧХ и МФЧХ (3), которые практически совпадают с аппроксимирующими их наклонными пунктирными прямыми.

Согласно предложенной в [11] модели гидрофона частотные зависимости 3 звена опережения представляют собой фазовый набег  $kr$  звуковой волны при её распространении на расстояние, равное радиусу  $r$  активного элемента гидрофона ( $k$  – волновое число). Как и следовало ожидать, аппроксимирующие прямые проходят через начало координат. Исходя из наклонов прямых радиусы активных элементов гидрофонов должны составлять 3,73 и 7,93 мм для гидрофонов B&K8103 и TC4033 соответственно. Однако эти данные не соответствуют радиусам 4,75 мм и 12,5 мм, указанным производителями гидрофонов в технических описаниях. Информация о размерах собственно активного элемента, скрытого непрозрачным влагонепроницаемым покрытием, либо о толщине его покрытия в технических описаниях отсутствует.

Гидрофон ГИ-20 имеет пьезокерамический активный элемент диаметром 20 мм, состоящий из двух полусфер или из цельной сферы. Толщина слоя влагонепроницаемого покрытия составляет 2 и 4 мм для цельной и сборной сфер соответственно. На рисунке *в*, помимо экспериментальной ФЧХ (1), расчётной МФЧХ (2) и разности ФЧХ и МФЧХ (3), приведена зависимость  $kr$  (4), рассчитанная для указанного в документации гидрофона ГИ-20 значения радиуса пьезокерамической сферы  $r=10$  мм. Зависимость 4, наклону которой соответствует значение радиуса  $r=12,6$  мм, существенно отличается от зависимости 3. Это различие может быть вызвано разной толщиной покрытия и стенок активного элемента, различием скоростей распространения звука в материалах покрытия и активного элемента и их отличием от скорости звука в среде, окружающей преобразователь, и пр. При калибровке по фазе к точности числа, подставляемого в формулу измерений в качестве размера активного элемента, предъявляют повышенные требования, поэтому целесообразно 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



Фазочастотные характеристики гидрофонов TC4033 ( $r=7,93$  мм), B&K8103 ( $r=3,73$  мм), ГИ-20 ( $r=12,6$  мм) – *а–в* соответственно; 1 – фазочастотная характеристика; 2 – минимально-фазовая часть фазочастотной характеристики; 3 – разность характеристик 1, 2; 4 – фазовый набег звуковой волны при распространении на расстояние 10 мм, равное радиусу  $r$  активного элемента гидрофона

Phase-frequency responses of hydrophones TC4033 ( $r=7.93$  mm), B&K8103 ( $r=3.73$  mm), GI-20 ( $r=12.6$  mm) – *a–c*, respectively; 1 – phase-frequency response; 2 – minimum-phase part of the phase-frequency response; 3 – difference of responses 1, 2; 4 – phase incursion of a sound wave when propagating over a distance  $r=10$  mm;  $r$  – is the radius of the hydrophone active element

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  $\tau_{P-H}=r_{P-H}/c$ , где  $c$  – скорость звука. Тогда разность  $\Delta\tilde{\tau}_{P-H}=\tilde{\tau}_{P-H}-\tau_{P-H}$  – время пробега звуковой волны на расстояние, равное сумме расстояний  $\tilde{r}_P, \tilde{r}_H$ , под которыми понимают эквивалентные радиусы активных элементов

излучателя и приёмника соответственно [12]. Для времён  $\tilde{r}_P = \tilde{r}_P/c$ ,  $\tilde{r}_H = \tilde{r}_H/c$  пробега звуковой волной расстояний  $\tilde{r}_P$ ,  $\tilde{r}_H$  соответственно выполняется равенство  $\Delta\tilde{r}_{P-H} = \tilde{r}_P + \tilde{r}_H$ .

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

$$\tilde{r}_P = c\tilde{r}_P = c(\Delta\tilde{r}_{P-T} - \Delta\tilde{r}_{T-H} + \Delta\tilde{r}_{P-H})/2;$$

$$\tilde{r}_T = c\tilde{r}_T = c(\Delta\tilde{r}_{T-H} - \Delta\tilde{r}_{P-H} + \Delta\tilde{r}_{P-T})/2;$$

$$\tilde{r}_H = c\tilde{r}_H = c(\Delta\tilde{r}_{P-H} - \Delta\tilde{r}_{P-T} + \Delta\tilde{r}_{T-H})/2.$$

Для участвовавшего в эксперименте гидрофона ГИ-20 значение эквивалентного радиуса составило 12,1 мм, что значительно лучше согласуется с результатами, представленными на рисунке 6.

**Заключение.** Существенный разброс результатов определения положения АЦ, обусловленный вибрацией при эксперименте, не позволяет рассматривать представленные данные как окончательное значение эквивалентного радиуса гидрофона типа ГИ-20, но указывает на проблему, которая заключается в необходимости определять положения АЦ и эквивалентные радиусы преобразователей, участвующих в измерениях ФЧХ гидрофонов при калибровке методом взаимности. ФЧХ можно измерять различными способами, например классическим, измеряя модули и аргументы комплексных передаточных импедансов пар «излучатель – приёмник», либо используя модель гидрофона в виде минимально-фазовой системы и звена опережения, и др. В любом случае обозначенная проблема требует решения. В воздушной акустике малый разброс значений дифракционных поправок позволяет применять одни и те же дифракционные поправки для микрофонов одного типа. В настоящее время очевидно, что использовать для гидрофонов типовые координаты АЦ невозможно, а возможность применения типовых значений эквивалентных радиусов ещё предстоит установить. Для этого необходимо уменьшить неопределённость типа А результатов измерений и набирать статистику по гидрофонам различных типов.

Немедленный практический результат, подобно ситуации с микрофонами, появляется для гидрофонов, ФЧХ которых можно определять на установках для измерения АЧХ (с учётом типовых значений эквивалентных радиусов). Ещё одно практическое следствие – появление нового параметра, характеризующего качество гидрофонов, – малый разброс эквивалентных радиусов отдельных экземпляров. Для таких гидрофонов упрощается процедура передачи единицы по поверочной схеме, для этого достаточно передать только подробную АЧХ. Другое следствие – требование высокой точности 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 в процессах совершенствования как конструкции гидрофонов, так и технологии их изготовления. Знание этих параметров гидрофонов повышает их конкурентоспособность.

Метрологический результат экспериментов – возможность совершенствовать ГЭТ 55-2017, 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 в рамках Международных пилотных сличений KOOMET 786 RU/19 при нестабильности опорного гидрофона удалось подтвердить правильность применённых участниками сличений методик измерений и стабильность работы эталонных установок.

Допуски на размеры микрофонов составляют сотые доли миллиметра. Высказанное теоретически оправданное предложение – вращать гидрофон относительно АЦ – практически невыполнимо на существующих эталонах. Более рациональным представляется дополнить требования к характеристикам гидрофона новым требованием: АЦ должен располагаться на оси симметрии гидрофона. Причём точность изготовления гидрофона должна быть доведена до точности изготовления микрофонов. Для гидрофона, предназначенного для фазовых измерений, положение АЦ должно быть измерено акустическим способом с высокой точностью, а к его характеристикам должна добавиться новая – акустический размер или эквивалентный радиус активного элемента гидрофона.

С целью обеспечения единства акустических измерений в стандарте на калибровку гидрофона представляется целесообразным уточнить формулировки понятий АЦ и эквивалентного радиуса, отсутствующие в IEC 60565-1(2020), а также стандартизовать способы их экспериментальных измерений.

#### Список источников

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. <https://doi.org/10.1134/S0320791919040038>
2. Росницкий П. Б., Сапожников О. А., Гаврилов Л. Р., Хохлова В. А. Метод создания абсолютно плотных фазированных решеток для неинвазивной ультразвуковой хирургии с контролем степени нерегулярности расположения элементов // Акустический журнал. 2020. Т. 66. № 4. С. 366–376. <https://doi.org/10.31857/S0320791920040097>
3. Кузнецов Г. Н., Пудовкин А. А., Субботкин А. О. Уравнения для расчета амплитудно- и фазочастотных характеристик векторно-скалярного приемника типа «триполь» с временной задержкой сигнала монополя // Акустический журнал. 2021. Т. 67. № 4. С. 440–449. <https://doi.org/10.31857/S0320791921040080>
4. Cooling M. P., Humphrey V. F., *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, 2008, vol. 55, pp. 84–93. <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2008.619>

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, pp. 1–23, URL: <http://eprintspublications.npl.co.uk/id/eprint/3981> (дата обращения: 08.12.2022).
6. Umchid S., Gopinath R., Srinivasan K., et al., *Ultrasonics*, 49, 306–311 (2009). <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2008.09.011>
7. Harris G. R., *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, 2011, vol. 58(11), pp. 2325–2333. <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2011.2090>
8. Исаев А. Е. Точная градуировка приёмников звукового давления в водной среде в условиях свободного поля. Менделеево: ВНИИФТРИ, 2008. 369 с.
9. Luker L. D., Van Buren A. L., *J. Acoust. Soc. Am.*, 1981, vol. 70, pp. 516–519. <https://doi.org/10.1121/1.386715>
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. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-7-48-53>
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. Хатамтаев Б. И., Щерблюк Н. Г. Акустический центр измерительного гидрофона и его экспериментальное определение // Измерительная Техника. 2022. № 10. С. 53–57. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-10-53-57>
14. Masahiro Yoshioka, *Japanese Journal of Applied Physics*, 2008, 47(5):3926–3928. <https://doi.org/10.1143/JJAP.47.3926>
15. Исаев А. Е., Хатамтаев Б. И. Аналитическое представление комплексной частотной характеристики гидрофона // Измерительная техника. 2021. № 8. С. 16–20. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-8-16-20>
16. Jacobsen F., Barrera-Figueroa S., Rasmussen K., *J. Acoust. Soc. Am.*, 2004, vol. 115, pp. 1468–1473. <https://doi.org/10.1121/1.1652036>
2. Rosnitskii P. B., Sapozhnikov O. A., Gavrilov L. R., Khokhlova V. A., *Acoustical Physics*, 2020, vol. 66, no. 4, pp. 366–376. <https://doi.org/10.1134/S1063771020040090>
3. Kuznetsov G. N., Pudovkin A. A., Subbotkin A. O., *Acoustical Physics*, 2021, vol. 67, no 4, pp. 421–429. <https://doi.org/10.1134/s1063771021040084>
4. Cooling M. P., Humphrey V. F., *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, 2008, vol. 55, pp. 84–93. <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2008.619>
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, pp. 1–23, available at: <http://eprintspublications.npl.co.uk/id/eprint/3981> (accessed: 08.12.2022).
6. Umchid S., Gopinath R., Srinivasan K., et al., *Ultrasonics*, 49, 306–311 (2009). <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2008.09.011>
7. Harris G. R., *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, 2011, vol. 58(11), pp. 2325–2333. <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2011.2090>
8. Isaev A. E., *Tochnaja gradirovka priemnikov zvukovogo davleniya v vodnoj srede v usloviyah svobodnogo polja*, Mendeleev, VNIIFTRI Publ., 2008, 369 p. (In Russ.)
9. Luker L. D., Van Buren A. L., *J. Acoust. Soc. Am.*, 1981, vol. 70, pp. 516–519. <https://doi.org/10.1121/1.386715>
10. Isaev A. E., Matveev A. N., Polikarpov A. M., Shcherblyuk N. G., *Measurement Techniques*, 2013, vol. 56, no. 6, pp. 706–711. <https://doi.org/10.1007/S11018-013-0269-Z>
11. Isaev A. E., Khatamtaev B. I., *Measurement Techniques*, 2021, vol. 64, no. 7, pp. 580–585. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-7-48-53>
12. Isaev A. E., Polikarpov A. M., Khatamtaev B. I., Experimental determination of the acoustic center of a measuring hydrophone, *Al'manac of modern metrology*, 2022, no. 2(30), pp. 56–71. (In Russ.)
13. Khatamtaev B. I., Shcherblyuk N. G., *Izmeritel'naya Tekhnika*, 2022, no. 10, pp. 53–57. (In Russ.) <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-10-53-57>
14. Masahiro Yoshioka, *Japanese Journal of Applied Physics*, 2008, 47(5):3926–3928. <https://doi.org/10.1143/JJAP.47.3926>
15. Isaev A. E., Khatamtaev B. I., *Measurement Techniques*, 2021, vol. 64, no. 8, pp. 622–627. <https://doi.org/10.1007/s11018-021-01981-7>
16. Jacobsen F., Barrera-Figueroa S., Rasmussen K., *J. Acoust. Soc. Am.*, 2004, vol. 115, pp. 1468–1473. <https://doi.org/10.1121/1.1652036>

## References

Статья поступила в редакцию 17.11.2022; одобрена после рецензирования 21.11.2022; принята к публикации 24.11.2022.  
The article was submitted 17.11.2022; approved after reviewing 21.11.2022; accepted for publication 24.11.2022.