

Экспериментальное определение акустического центра измерительного гидрофона

Буллат Ильгизович Хатамтаев¹, Николай Геннадьевич Щерблюк²✉

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

¹bulat_3004@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8197-8160>

²shcherbluck@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-7547-9202>

Аннотация. Рассмотрены методы повышения точности фазовой калибровки гидрофонов. Показано, что при калибровке гидрофона опорный центр, например геометрический центр контура активного элемента гидрофона, может быть смещён относительно акустического центра активного элемента из-за неравномерной толщины гидроизоляционного покрытия элемента. Предложен метод определения положения акустического центра гидрофона относительно выбранного опорного центра. Описана схема эксперимента по определению положения (смещения) акустического центра гидрофона относительно геометрического центра контура активного элемента. Приведены результаты экспериментов для гидрофонов разных типов и проанализированы источники неопределённости измерений. Показано, что учёт смещения акустического центра позволяет повысить точность фазовой калибровки гидрофонов. Предложенный метод можно использовать в области гидроакустических измерений чувствительности приёмников звукового давления.

Ключевые слова: акустический центр, гидрофон, фазовая калибровка гидрофона, опорный центр, геометрический центр, контур активного элемента, смещение

Для цитирования: Хатамтаев Б. И., Щерблюк Н. Г. Экспериментальное определение акустического центра измерительного гидрофона // Измерительная техника. 2022. № 10. С. 53–57. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-10-53-57>

Experimental determination of the acoustic center of a measuring hydrophone

Bulat I. Khatamtaev¹, Nikolay G. Shcherblyuk²✉

^{1, 2} Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering, Mendeleevo, Moscow region, Russia

¹bulat_3004@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8197-8160>

²shcherbluck@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-7547-9202>

Abstract. The following problem is considered in the underwater acoustic. At the same time the location of the hydrophone acoustic center must be known respect to the reference point. A method is proposed for determining the position of the acoustic center of a hydrophone relative to a selected reference center. The scheme of the experiment to determine the position (displacement) of the acoustic center of a hydrophone relative to the geometric center of the active element contour is described. The results of the experiment for different types of hydrophones are presented and the sources of measurement uncertainties are discussed. It is shown that taking into account the displacement of the acoustic center makes it possible to improve the accuracy of the phase calibration of hydrophones. The proposed method can be used in the field of the underwater measurement of the sound pressure receiver sensitivity.

Keywords: acoustic center, hydrophone, hydrophone phase calibration, reference center, geometric center, active element outline, offset

Введение. Устройства для преобразования акустических колебаний в электрические и электрических колебаний в акустические широко применяются в деятельности, связанной с освоением водной среды планеты. На основе данных устройств созданы приёмники звукового давления (гидрофоны) и колебательной скорости, излучатели акустических волн разной направленности, принимающие и излучающие гидроакустические антенны, эхолоты

и пр. Если преобразователь, например гидрофон, используется как средство измерений, то его необходимо калибровать [1] – определять частотную зависимость чувствительности в режиме приёма. Чувствительность гидрофона связывает звуковое давление волны, падающей на преобразователь, и напряжение на выходе. Эта величина комплексная, поэтому выделяют амплитудную и фазовую калибровки.

Любой метод калибровки гидрофона реализуется с использованием калибруемого приёмника и излучающего преобразователя. При этом необходимо иметь информацию о создаваемом излучателем акустическом поле в заданной точке пространства, в частности в месте расположения приёмника. Расчёт акустического поля, создаваемого излучателем произвольной формы и размеров, – непростая задача. Если габаритные размеры измерительного бассейна позволяют рассматривать создаваемое излучателем звуковое поле в дальней зоне, то излучатель можно заменить эквивалентной излучающей точкой. Физической моделью излучающей точки является пульсирующая сфера с малым по сравнению с длиной излучаемой волны радиусом, звуковое давление волны обратно пропорционально расстоянию до центра сферы [2]. Точку в пространстве, из которой исходят сферические гармонические волны, называют акустическим центром излучателя (ГОСТ Р МЭК 61094-3-2001¹). Положение акустического центра зависит от значения длины волны, дистанции между излучателем и точкой наблюдения, а также выбранного направления излучения.

На результаты измерений чувствительности гидрофона оказывает влияние приёмник излучения, поскольку падающая акустическая волна рассеивается на корпусе приёмника. Поэтому при выполнении калибровки используют понятие чувствительности по полю – считают, что гидрофоном измеряют звуковое давление в точке невозмущённого звукового поля (свободного поля), а вносимые гидрофоном искажения рассматривают как погрешность измерения. В этом случае гидрофон заменяют эквивалентным точечным приёмником, расположенным в акустическом центре гидрофона. Однако понятие акустического центра гидрофона в режиме приёма не столь очевидно, как для излучения. Принято считать, что акустические центры обратимого преобразователя в режиме приёма и в режиме излучения совпадают, существуют и другие определения понятия акустического центра [3, 4].

Расстояния между акустическими центрами преобразователей входят в расчётную формулу комплексной чувствительности гидрофона [5]. Точность определения расстояний влияет на точность калибровки измерительного гидрофона и особенно критична при измерениях фазового угла чувствительности (фазовой калибровке). Однако до настоящего времени способ экспериментального определения положения акустического центра гидрофона не стандартизирован, а определение положения этого центра – одна из экспериментальных задач, решаемых лабораторной гидроакустикой.

Ситуацию с определением положения акустического центра гидрофона усугубляет то, что способ, основанный на измерении зависимости звукового давления от расстояния между излучателем и приёмником, получивший распространение при калибровке микрофонов [6, 7], оказался малоприменимым в гидроакустике [8]. В воздушной акустике

применяются другие методы определения акустического центра неточечного источника звука, например, используют большое число приёмников звука, объединённых в одну систему, и последующую обработку полученных данных [9, 10]. Последняя версия стандарта IEC 60565-1-2020² рекомендует калибровать гидрофон относительно назначенного опорного центра, например геометрического центра активного элемента гидрофона. Исследованию экспериментальной зависимости звукового давления от дистанции отводится роль проверки условий свободного поля. Однако активный элемент гидрофона скрыт непрозрачным гидроизоляционным покрытием, которое не везде имеет одинаковую толщину, из-за чего геометрический центр гидрофона, определяемый по контуру покрытия, может быть смещён относительно центра активного элемента [11].

Цель данной работы – предложить и экспериментально обосновать способ определения положения акустического центра гидрофона. При рассуждениях ограничимся рассмотрением гидрофонов со сферическим и цилиндрическим активными элементами, наиболее распространённых в практике гидроакустических измерений.

Экспериментальное определение положения акустического центра. Если активный элемент гидрофона – идеальная сфера или цилиндр, то акустический центр является центром сферы или окружности поперечного сечения цилиндра, проведённого через центр осевой линии. Рассмотрим ситуацию, при которой на активный элемент гидрофона, расположенного в однородной и безграничной водной среде, со скоростью c падает акустическая волна от излучателя в точке A (рис. 1). Активный элемент представим геометрической моделью в виде сферы (CB , C) радиусом $b=CB$ с центром в точке C и покрывающего его компунда – сферы (DE , D) радиусом DE с центром в точке D . Точку D – геометрический центр активного элемента – примем в качестве опорной точки, относительно которой будем определять положение акустического центра, т. е. центр сферы (CB , C), смещённый относительно геометрического центра на отрезок DC . Для простоты примем, что точки C и D лежат в одной плоскости, перпендикулярной оси симметрии гидрофона.

Используя теорему косинусов для треугольника ADC и допущение, что излучатель расположен достаточно далеко по сравнению со смещением $\Delta=DC$, получим приближённое выражение для расстояния $r(\alpha)=AB$ между излучателем и ближайшей к нему точкой сферы (CB , C):

$$r(\alpha)=L-b+\Delta\cos(\alpha+\alpha_0), \quad (1)$$

где $L=AD$ – расстояние от излучателя до геометрического центра гидрофона; $\alpha=\angle ADF$ – угол между опорным направлением гидрофона и направлением на излучатель; $\alpha_0=\angle FDE$ – угол между опорным направлением гидрофона

¹ ГОСТ Р МЭК 61094-3-2001. ГСИ. Микрофоны измерительные. Первичный метод градуировки по свободному полю лабораторных эталонных микрофонов методом взаимности.

² IEC 60565-1-2020. Подводная акустика. Гидрофоны. Калибровка гидрофонов. Часть 1. Процедуры калибровки гидрофонов в свободном поле.

и направлением смещения DC ; формула (1) верна и для гидрофона с цилиндрическим активным элементом.

Обозначим $t(\alpha)$ – временной интервал от момента начала излучения до момента начала приёма сигнала гидрофоном, за который фронт акустической волны проходит расстояние $r(\alpha) = ct(\alpha)$. Измерив зависимость временного интервала $t(\alpha)$ от угла α , получим выражение (1), по которому можно определить смещение Δ и угол α_0 .

Постановка эксперимента. Схема эксперимента по измерению зависимости $t(\alpha)$ показана на рис. 2. Измерения проводили в гидроакустическом бассейне размером $1,5 \times 1 \times 1$ м с оптически прозрачными стенками. Излучатель $И$ размещали в бассейне на средней глубине равноудаленно от стенок бассейна и закрепляли неподвижно. Измерительный гидрофон $ИГ$ устанавливали на штанге координатно-поворотного устройства на расстоянии 80 см от излучателя так, чтобы геометрические центры гидрофона и излучателя находились на одной глубине, и ориентировали опорным направлением на излучатель. Координатно-поворотное устройство позволяет смещать гидрофон как в плоскости XY , параллельной поверхности воды, так и по глубине, а также поворачивать относительно вертикальной оси, совпадающей с осью симметрии гидрофона.

Излучатель возбуждали с помощью генератора $Г$, на выходе которого формировали квадратурно дополненные (косинусные и синусные) тональные импульсы заданной частоты и амплитуды [12]. Длительность импульсов устанавливали такой, чтобы обеспечить возможность временной селекции прямого сигнала излучателя в сигнале на выходе гидрофона. Аппаратура приёмного тракта $АПТ$ включала усилитель сигнала по напряжению и цифровой осциллограф. Для увеличения отношения сигнал/шум применяли когерентное накопление сигналов, принятых гидрофоном. Оцифрованные осциллограммы сигналов сохраняли в памяти персонального компьютера $ПК$. После сохранения текущей осциллограммы гидрофон поворачивали на угловой шаг $\Delta\alpha = 360^\circ/N$ для снятия следующей осциллограммы. Эту процедуру повторяли до совершения гидрофоном полного оборота вокруг своей оси.

Формула (1) выведена в предположении, что точка D во время поворотов гидрофона не смещается относительно геометрического центра закреплённого неподвижно излучателя, т. е. лежит на оси вращения. Из-за прецессии штанги координатно-поворотного устройства достичь такой неподвижности с приемлемой точностью – сложная инженерная задача. Однако, если позицию точки D при приёме сигнала излучателя с опорного направления гидрофона ($\alpha=0$) зафиксировать, то после каждого поворота на угол $\Delta\alpha$ координаты точки можно корректировать с помощью координатно-поворотного устройства, возвращая геометрический центр гидрофона в позицию, зафиксированную в опорном направлении.

Первоначальную позицию геометрического центра гидрофона в эксперименте фиксировали следующим образом. Координату геометрического центра по оси Y контролировали с помощью лазера $Л$, создающего луч,

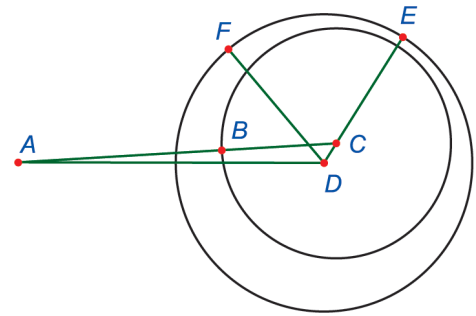


Рис. 1. Геометрическая модель гидрофона; вид сверху вдоль оси симметрии гидрофона

Fig. 1. A hydrophone geometrical model, the view from above, along to hydrophone symmetry axis

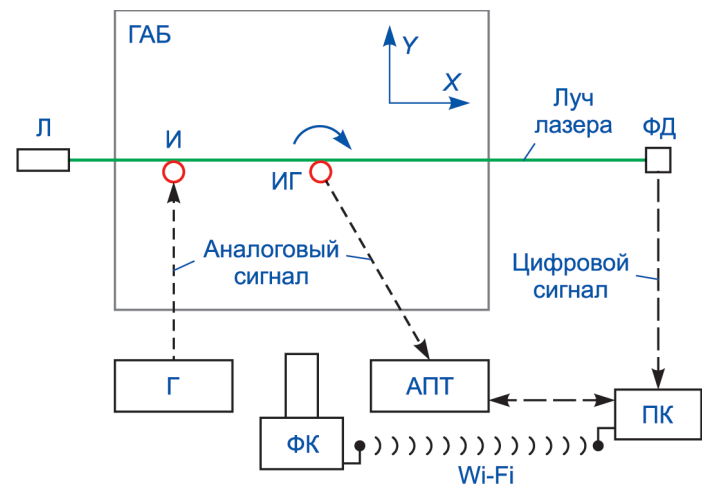


Рис. 2. Принципиальная схема эксперимента (вид сверху): $Л$ – лазер; $И$ – излучатель; $ИГ$ – измерительный гидрофон; $ФД$ – фотодетектор; $Г$ – генератор; $ФК$ – фотокамера; $АПТ$ – аппаратура приёмного тракта; $ПК$ – персональный компьютер; $ГАБ$ – гидроакустический бассейн

Fig. 2. Schematic of the experiment (view from above): L – laser; E – emitter; H – hydrophone; LS – light sensor; G – generator; C – camera; ERP – equipment of the receiving path; PC – personal computer; UT – underwater tank

параллельный прямой $И$ – $ИГ$ и касающийся края активного элемента гидрофона $ИГ$ (см. рис. 2). Луч лазера направляли в фотодетектор $ФД$, с помощью которого регистрировали мощность лазерного излучения. Зафиксировав значение мощности при $\alpha=0$, после очередного поворота гидрофона корректировали положение геометрического центра гидрофона так, чтобы показание фотодетектора совпадало с зафиксированным значением.

Положение геометрического центра гидрофона по глубине и координате по оси X контролировали фотокамерой $ФК$. Полученное с помощью фотокамеры изображение активного элемента гидрофона передавали по Wi-Fi в персональный компьютер $ПК$. По фотографии гидрофона, полученной при угле $\alpha=0$, строили мишень – контурное изображение активного элемента с меткой в точке геометрического центра

изображения. После очередного поворота гидрофона его положение юстировали так, чтобы геометрический центр контурного изображения активного элемента при текущем угле поворота совпал с геометрическим центром мишени.

Квадратурной обработкой полученных осциллограмм получали временные зависимости огибающих модуля и аргумента принятых гидрофоном сигналов. По положению передних фронтов огибающих относительно момента излучения строили зависимость $\Delta t(\alpha)$ изменения временной задержки принятого гидрофоном сигнала от угла поворота гидрофона α . В качестве опорного значения использовали задержку сигнала t_0 , принятого гидрофоном в опорном направлении. Полученную зависимость $\Delta t(\alpha)$ использовали для нахождения $t(\alpha) = \Delta t(\alpha) + t_0$.

Результаты эксперимента. Зависимость $t(\alpha)$ аппроксимировали функцией

$$X_0 + X_1 \cos \alpha + X_2 \sin \alpha, \quad (2)$$

где X_0, X_1, X_2 – неизвестные параметры, значения которых определяли методом наименьших квадратов.

Из (1), (2) следует, что смещение $\Delta = c\sqrt{X_1^2 + X_2^2}$. Значение угла α_0 получали по положению локального минимума функции (2), который достигается в точке $\alpha_{\min} = -\arctan(X_2/X_1)$. Угол находили по формуле $\alpha_0 = \pi - \alpha_{\min}$. Вычисленные таким образом параметры Δ, α_0 определяют положение акустического центра гидрофона относительно геометрического центра в полярных координатах.

На рис. 3 представлены зависимость смещений акустического центра $\Delta r(\alpha) = c(t(\alpha) - t_0)$, построенная по данным эксперимента с гидрофоном ГИ 20 (ВНИИФТРИ, Россия), и функция, аппроксимирующая эту зависимость по формуле (2) (скорость звука в гидроакустическом бассейне принимали

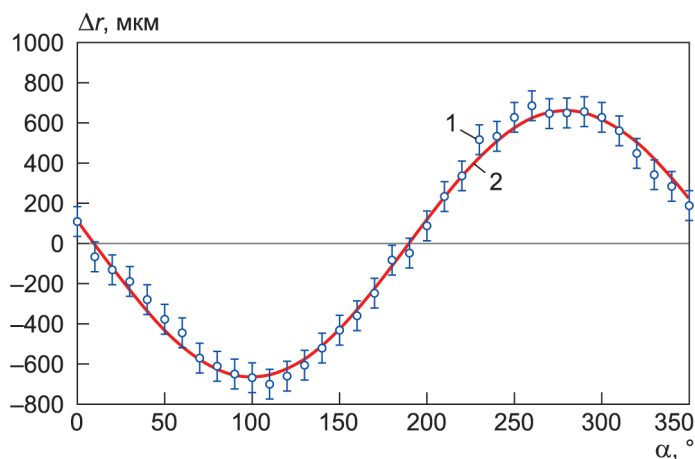


Рис. 3. Зависимость смещения Δr от углов α поворота риски для гидрофона типа ГИ 20:

1 – экспериментальные данные (с разбросом); 2 – аппроксимация по формуле (2)

Fig. 3. Relation between offset values Δr and rotation angles α of the hydrophone reference direction for hydrophone GI 20:

1 – experimental data (with a spread); 2 – approximation by the formula (2)

равной 1478 м/с). Аналогичные эксперименты были выполнены для ряда гидрофонов, различающихся по размерам активного элемента, типу и толщине покрытий: ОП-1, ГИ 21, ГИ-20 (ВНИИФТРИ, Россия) и TC4034 (Reson, Дания). В таблице приведены смещение Δ и углы α_0 , стандартная суммарная неопределённость u_c результатов измерений смещения и углов для этих гидрофонов (d, d^* – диаметры активного элемента без учёта и с учётом толщины покрытия соответственно).

Источники неопределённости измерений. К доминирующим источникам неопределённости измерения координат акустического центра относятся следующие неопределённости: определения зависимости $t(\alpha)$; фиксации геометрического центра гидрофона в направлении осей X, Y; положения оси вращения гидрофона, а также неопределённость, обусловленная влиянием вибрации.

Применение в приёмном тракте маломощного усилителя по напряжению в сочетании с когерентным накоплением принятых гидрофоном сигналов цифровым осциллографом позволило значительно увеличить отношение сигнал/шум осциллограмм, которые далее обрабатывали. Для повышения точности определяли не временную задержку принятых гидрофоном импульсов излучателя, а зависимость изменения этой задержки от угла падения звуковой волны. Для этого использовали характерный участок в начальной части переднего фронта огибающих. Частота дискретизации сигнала аналого-цифровым преобразователем осциллографа составляет не менее 500 МГц, что даёт оценку верхней границы неопределённости измерения изменения временной задержки не более 3 мкс.

Минимальный шаг 12 мкм перемещения координатно-поворотного устройства принимали в качестве оценки неопределённости положения оси вращения гидрофона.

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

В направлении оси Y опорную точку фиксировали с помощью лазерного луча и фотодетектора. На неопределённость фиксации влияют чувствительность фотодетектора и расстояние от излучателя до гидрофона. Установили, что эта неопределённость мала по сравнению с рассмотренными выше и ей можно пренебречь.

Смещение Δ , угол α_0 и неопределённости их измерений для гидрофонов различных типов

Тип гидрофона	d , мм	d^* , мм	Δ , мкм	u_c , мкм	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

Неопределённость фиксации геометрического центра гидрофона по оценке составила не более 22 мкм.

Следствие вибрации в помещении гидроакустического бассейна – случайный разброс результатов измерения смещения Δ . В экспериментах стандартная неопределённость типа А не превысила 15 % среднего значения результатов измерения. Неопределённость типа В результата измерения смещения акустического центра гидрофона относительно геометрического центра составила 25 мкм. Значения суммарной неопределённости результата измерения u_c приведены в таблице.

Обсуждение результатов. При калибровке гидрофона геометрический центр контура активного элемента гидрофона смещён относительно акустического центра активного элемента в среднем на 0,5 мм, что составляет примерно 20 % средней толщины покрытия, и при современных технических возможностях это смещение можно определить с неопределённостью 12–15 %.

При измерении модуля частотной характеристики чувствительности влияние несовпадения акустического и геометрического центров гидрофона пренебрежимо мало на фоне других источников погрешности, и при калибровке по амплитуде используют геометрический центр активного элемента гидрофона. При измерениях аргумента комплексной чувствительности согласно IEC 60565-1-2020 формула вычисления фазового угла чувствительности гидрофона методом взаимности основана на предположении, что геометрические центры всех преобразователей расположены на одной прямой, причём при разворотах калибруемого гидрофона его геометрический центр остается неподвижным. Если акустический центр калибруемого гидрофона не совпадает с его геометрическим центром, то возникает фазовый набег, который вносит дополнительную погрешность в фазовый угол чувствительности. Например, на частоте 100 кГц смещение 0,5 мм акустического центра относительно геометрического центра приведёт к неопределённости фазового угла 12°, что сравнимо с неопределённостью результатов измерений на первичном эталоне [13]. Проблема устраняется, если в результате измерения фазового угла чувствительности ввести поправку $\omega \Delta \cos \alpha_0 / c$, где ω – частота калибровки; c – скорость звука.

Отметим также, что форма активного элемента гидрофона отклоняется от идеальной сферы, в том числе по причине сборки активного элемента из нескольких частей, например из двух полусфер. Степень этого отклонения можно оценить по экспериментальной зависимости $t(\alpha)$, если добавить в аппроксимирующую функцию (2) слагаемые с косинусом и синусом угла $t\alpha$, где $m \geq 2$.

Заключение. Результаты данной работы показывают, что смещение акустического центра активного элемента гидрофона относительно контура его покрытия – характерное явление для используемых на практике гидрофонов. Смещение акустического центра относительно опорного центра вызывает фазовый набег, уменьшающий точность фазовой калибровки гидрофонов относительно опорного центра. Предложенный метод экспериментального определения этого смещения

позволяет рассчитать поправку к фазовой чувствительности гидрофона, что повышает точность её измерения.

Список источников / References

1. Справочник по гидроакустике. Изд. 2-е, перераб. и доп. / ред. А. Е. Колесникова. Л.: Судостроение, 1988. 522 с. [*Spravochnik po gidroakustike*, 2nd ed., ed. by A. E. Kolesnikov, Leningrad, Sudostroenie Publ., 1988, 522 p. (In Russ.)].
2. Свердлин Г. М. Прикладная гидроакустика. Изд. 2-е, перераб. и доп. Л.: Судостроение, 1990. 320 с. [Sverdlin G. M., *Prikladnaja gidroakustika*, 2nd ed., Leningrad, Sudostroenie Publ., 1990, 320 p. (In Russ.)].
3. Trott W., Effective acoustic center redefined, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1977, vol. 62, no. 2, pp. 468–469. <https://doi.org/10.1121/1.381510>
4. Jacobsen F., Barrera-Figueroa S., and Rasmussen K., *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2004, vol. 115, no. 4, pp. 1468–1473. <https://doi.org/10.1121/1.1652036>
5. Боббер Р. Гидроакустические измерения: Пер с англ. М.: Мир, 1974. 359 с. [Robert J. Bobber, *Underwater electro-acoustical measurements*, Naval Research Laboratory, Washington D.C., 1970].
6. Barrera-Figueroa S., Rasmussen K., Jacobsen F., *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2006, vol. 120, no. 5, pp. 2668–2675. <https://doi.org/10.1121/1.2345830>
7. Rodrigues D., Durocher J.-N., Bruneau M., Bruneau A.-M., *Acta Acustica united with Acustica*, 2010, vol. 96, no. 2, pp. 300–305. <https://doi.org/10.3813/AAA.918279>
8. Исаев А. Е. Точная градуировка приемников звукового давления в водной среде в условиях свободного поля. Менделеев: ВНИИФТРИ, 2008. 369 с. [Isaev A. E., *Tochnaja graduirovka priemnikov zvukovogo davleniya v vodnoj srede v usloviyah svobodnogo polja*, Mendeleevo, VNIIFTRI Publ., 2008, 369 p. (In Russ.)].
9. Hagai I. B., Pollow M., Vorländer M., Rafaely B., *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2011, vol. 130, no. 4, pp. 2003–2015. <https://doi.org/10.1121/1.3624825>
10. Deboy D., Zotter F., Acoustic center and orientation analysis of sound-radiation recorded with a surrounding spherical microphone array, *Proceedings of the 2nd International Symposium on Ambisonics and Spherical Acoustics*, Paris, May 6–7, 2010, p. 21.
11. Hayman G., Wang Y., Robinson S. P., *Journal of the Acoustical Society of America*, 2013, vol. 133, no. 5, pp. 750–759. <https://doi.org/10.1121/1.4774272>
12. 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. [Isaev A. E., *Measurement Techniques*, 2010, vol. 53, no. 4, pp. 379–385. <https://doi.org/10.1007/s11018-010-9514-x>].
13. Hayman G., Robinson S., *Proc. 11th Europ. Conf. on Underwater Acoustics*, Edinburgh, 2012, pp. 1437–1444. <https://doi.org/10.1121/1.4770061>

Статья поступила в редакцию 25.08.2022; одобрена после рецензирования 13.09.2022; принята к публикации 14.09.2022.
The article was submitted 25.08.2022; approved after reviewing 13.09.2022; accepted for publication 14.09.2022.