

Чувствительность гидроакустического приёмника при измерениях подводного шума

А. Е. ИСАЕВ, А. Н. МАТВЕЕВ, А. С. НИКОЛАЕНКО, А. М. ПОЛИКАРПОВ

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

Рассмотрены проблемы, возникающие при использовании чувствительности гидрофона по полю для измерений подводного шума. На примере калибровки гидроакустического приёмника показаны способы получения энергетической и секторальной энергетической чувствительностей приёмника и преимущества их применения при измерениях окружающего шума и шума при сертификационных испытаниях судна.

Ключевые слова: гидроакустический приёмник, чувствительность по полю, частотная характеристика чувствительности, энергетическая чувствительность, секторальная энергетическая чувствительность, измерения подводного шума.

The problems of using the traditional hydrophone free-field sensitivity for underwater noise measurements are discussed. On the example of underwater receiver calibration the ways of obtaining and the advantages of using of the one-third octave energy sensitivity at ambient noise measuring and sectoral one-third octave energy sensitivity at underwater noise measuring during certification tests of ship are shown.

Key words: underwater sound receiver, free-field sensitivity, frequency response, energy sensitivity, sectoral energy sensitivity, underwater noise measurements.

В воздушной акустике в зависимости от целей измерений стандартизованы требования к приёмнику звука, методике измерений, процедуре калибровки приёмника и использованию результатов калибровки. Например, для измерений в заглушённой камере применяют микрофон, откалиброванный по свободному полю (далее – по полю), а для измерений окружающего шума – микрофон, откалиброванный по диффузному полю.

Проблемы экологии моря привели к необходимости измерять подводный окружающий шум, мощность которого распределена по частоте, а преимущественное направление приёма отсутствует. Как и в воздушной акустике, при таких измерениях вместо чувствительности, определенной в соответствии с [1], необходимо использовать чувствительность по диффузному полю [2], дефиниция которой в настоящее время отсутствует в гидроакустике.

Чувствительность гидрофона согласно [1] – это чувствительность на частоте при падении на гидрофон с опорного направления плоской звуковой волны, распространяющейся в свободном поле. Это определение подходит для эталонных измерений при воспроизведении и передаче единицы звукового давления измерительному гидрофону в силу следующих обстоятельств. Малые в сравнении с длиной падающей звуковой волны размеры активного элемента измерительного гидрофона позволяют выполнять калибровку в поле сферической звуковой волны, но при этом рассматривать результат калибровки как чувствительность в поле плоской звуковой волны. Отработанная десятилетиями конструкция измерительного гидрофона обеспечивает неизменность положения его акустического центра при изменении частоты, что даёт возможность определять расстояние между акустическими

центрами излучателя и калибруемого гидрофона. В условиях лабораторного бассейна можно ориентировать опорное направление гидрофона на излучатель. Достаточная продолжительность тонального импульса позволяет приписывать частоте значение чувствительности, измеренное при калибровке.

Совершенная конструкция измерительного гидрофона даёт возможность использовать значения его чувствительности согласно [1] и при решении других измерительных задач, например, измерениях уровней подводного шума в натурных условиях. Ориентировать опорное направление гидрофона на источник шума при измерениях в море затруднительно, а при измерениях окружающего шума не имеет смысла. Наряду с требованием малой общей неравномерности частотной характеристики чувствительности (ЧХЧ) приёмника существенным становится требование малой неравномерности ЧХЧ в пределах третьоктавной полосы частот. Однако конструкция активного элемента и малое рассеяние звука корпусом гидрофона обеспечивают близкую к круговой характеристику направленности и равномерную в пределах третьоктавной полосы ЧХЧ гидрофона.

В натурных условиях гидрофон обычно устанавливают на измерительную платформу, которая, кроме предварительной обработки сигнала, обеспечивает проверку работоспособности гидроакустического приёмника (ГП), плавучесть, позиционирование, малые шумы обтекания и т. п. В отсутствие специализированных стандартов при калибровке ГП используют определение чувствительности гидрофона, приведённое в [1]. В отличие от конструкции гидрофона конструкция ГП не столь совершенна, что проявляется в искажениях звукового поля корпусом ГП. Поэтому необходимы другие подходы на

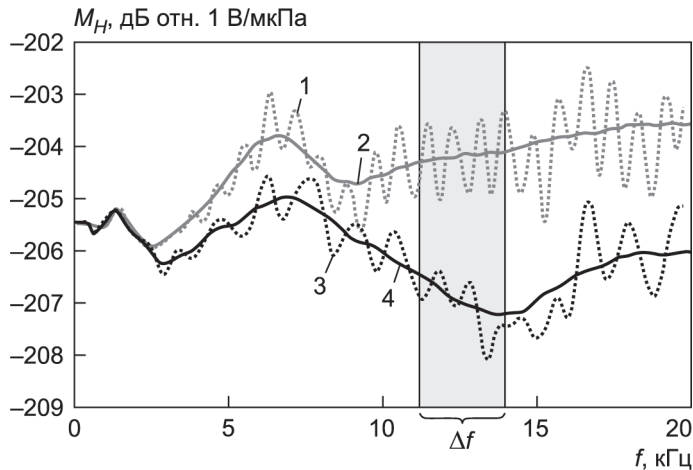


Рис. 1. Частотные характеристики чувствительности (кривые 1, 3) и энергетическая чувствительность (кривые 2, 4) экспериментальной модели ГП с гидрофоном B&K8104, удалённым на 830 мм от стального цилиндрического корпуса диаметром 150 мм, при фронтальном (кривые 1, 2) и боковом (кривые 3, 4) падении звуковой волны

всех этапах применения ГП, включая уточнённое определение его чувствительности, методы калибровки, использование результатов калибровки при измерениях подводного шума.

Неравномерность ЧХЧ гидрофона достаточно полно описывается значениями его чувствительности на частотах третьоктавного ряда. Чтобы охарактеризовать свойства ГП, необходимо измерять подробные ЧХЧ [3, 4]. Более того, в отличие от гидрофона, с получением подробной ЧХЧ решение проблемы калибровки ГП не заканчивается. На рис. 1 (кривые 1, 3) представлены ЧХЧ экспериментальной модели ГП с гидрофоном B&K8104, удалённым на 830 мм от стального цилиндрического корпуса диаметром 150 мм, при фронтальном и боковом падении звуковой волны [5]. При калибровке излучатель располагался на расстоянии 3 м от ГП.

При фронтальном падении звуковой волны ЧХЧ удовлетворяет формулировке определения чувствительности по полю [1] (плоская звуковая волна, опорное направление, фиксированная частота). Эту ЧХЧ можно применять, например, для

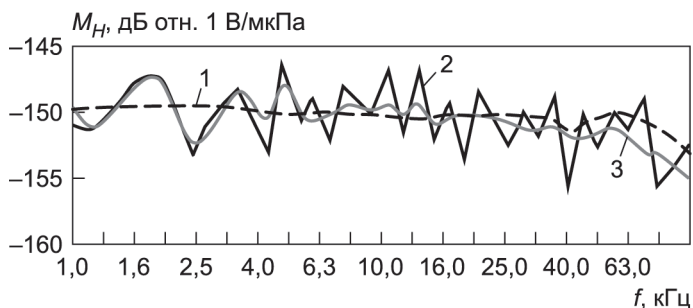


Рис. 2. Частотные характеристики чувствительности (шаг 1/6 октавы):

1 – гидрофон, который затем установили в ГП; 2 – ГП; 3 – энергетическая чувствительность ГП в третьоктавных полосах частот

оценки временной стабильности акустических характеристик ГП или для проверки соответствия его свойств установленным нормам. Однако при использовании этой зависимости для измерения уровней подводного шума в третьоктавных полосах частот возникает ряд проблем, например, какое из значений чувствительности, попавших в третьоктавную полосу частот Δf , следует подставить в формулу измерений шума. Другая проблема – как с помощью представленных ЧХЧ учесть направленность ГП при измерениях третьоктавного спектра? (Ниже будет показано, что решение, пригодное для измерений шума с выбранного направления, может оказаться непригодным для измерений окружающего шума.) Ещё одна проблема – нарушение критерия дальнего поля на частотах выше 1 кГц при боковом падении звуковой волны на ГП.

Эти проблемы удаётся решать, если вместо ЧХЧ использовать энергетические чувствительности ГП в третьоктавных полосах частот (см. рис. 1, кривые 2, 4). Для этих кривых значения на оси абсцисс означают центральные частоты третьоктавных полос. Каждой центральной частоте соответствует чувствительность, полученная энергетическим усреднением подробной ЧХЧ в третьоктавной полосе [4]:

$$M_H(f_0, \varphi_i, \Delta f) = \left[\frac{1}{\Delta f} \int_{f_0 - \Delta f/2}^{f_0 + \Delta f/2} M_H^2(f, \varphi_i) df \right]^{1/2}, \quad (1)$$

где $M_H(f_0, \varphi_i)$ – ЧХЧ ГП при угле падения звуковой волны φ_i ; $f_0, \Delta f$ – центральная частота и номинальная ширина третьоктавной полосы частот.

Ширина Δf третьоктавной полосы частот увеличивается пропорционально центральной частоте f_0 . Для расчётов использовали приближённое соотношение [6]:

$$\Delta f = f_0 (a_{1/3} - a_{1/3}^{-1}),$$

где $a_{1/3} = 1,12$.

В качестве пределов интегрирования в (1) подставляли значения нижней $f_{\min} = f_0/1,12 = 0,89f_0$ и верхней $f_{\max} = 1,12f_0$ частот полосы.

При использовании энергетической чувствительности для измерений шума в стандартизованных третьоктавных полосах частот проблема неоднозначности исчезает, поскольку каждой третьоктавной полосе соответствует единственное значение чувствительности. Кроме того, при боковом падении звуковой волны для частотных полос от 6,3 кГц и выше выполняется критерий дальнего поля, поскольку при приёме шума в широких полосах частот пространственная область корреляции прямой и рассеянной звуковых волн уменьшается, и акустический размер ГП сокращается до размера гидрофона [4]. Малые остаточные осцилляции энергетической чувствительности не вносят существенного вклада в погрешность измерений третьоктавного спектра на частотах ниже 6,3 кГц. Определённая таким образом энергетическая чувствительность по полю соответствует следующим условиям применения: плоская звуковая волна; опорное (либо выбранное относительно опорного) направление; шум в третьоктавной полосе частот. Отметим, что полученная по формуле (1) энергетическая чувствительность

подходит для измерения шума источника, локализованного в опорном либо в выбранном направлении, однако может оказаться непригодной в других измерительных ситуациях.

На рис. 2 с шагом 1/6 октавы изображены частотные характеристики: ГП (кривая 2) и гидрофона (кривая 1), который затем установили в приёмник. Частотная характеристика гидрофона слабо зависит от частоты и близка к плоской на частотах ниже 40 кГц. Частотная характеристика ГП изрезана осцилляциями, вызванными рассеянием звуковой волны элементами его конструкции [7]. Размах осцилляций достигает 8,5 дБ и не уменьшается с уменьшением частоты. На рис. 2 также приведена энергетическая чувствительность ГП в третьоктавных полосах частот. Данная зависимость на высоких частотах не имеет резких изменений, которые сглажены усреднением в широких частотных полосах; осцилляции на низких частотах обусловлены ослаблением эффекта сглаживания с уменьшением ширины третьоктавной полосы.

Использование энергетической чувствительности в третьоктавных полосах частот привело к значительным расхождениям результатов измерений окружающего шума в море. На рис. 3 представлены третьоктавные уровни подводного шума, измеренные гидрофоном, откалиброванным согласно [1], и ГП, откалиброванным в третьоктавных частотных полосах. Различия данных уровней на частотах выше 6,3 кГц не превышают 1,5 дБ, что можно считать приемлемым при существующих нормах измерений подводного шума. На частотах ниже 6,3 кГц различия возрастают до 4,5 дБ, причём осцилляции уровней шума, измеренного ГП, с точностью до наоборот повторяют осцилляции ЧХЧ ГП, представленные на рис. 2. Использование энергетической чувствительности в третьоктавных частотных полосах привело к увеличению погрешности измерений на низких частотах. Причина этого состоит в неправильном использовании результатов калибровки ГП. Калибровку выполняли при ориентации опорного направления ГП на излучатель, а результаты калибровки использовали не для измерений шума в опорном направлении, а для измерений окружающего шума при отсутствии преимущественного направления падения звуковой волны на ГП.

На рис. 3 отдельными точками показаны уровни шума, полученные при использовании чувствительности ГП, рассчитанной как среднее значение энергетической чувствительности при изменении угла падения звуковой волны от 0 до 360°. Использование такой чувствительности (аналог чувствительности по диффузному полю в воздушной акустике) позволяет получить результаты, близкие к результатам измерений ненаправленным гидрофоном. В воздушной акустике стандартизовано измерение трёх ЧХЧ микрофона в зависимости от условий его применения: при измерениях по полю, по давлению и по диффузному полю. Чтобы учесть влияние направленности ГП при измерениях окружающего шума, калибровку в третьоктавных полосах частот необходимо дополнить требованием: «калибровка по диффузному полю».

Откалибровать ГП по диффузному полю в бассейне подобно тому, как это делают в воздушной акустике, не удаётся, поскольку по качеству диффузного поля незаглушённый бассейн значительно уступает реверберационной камере [8]. Для

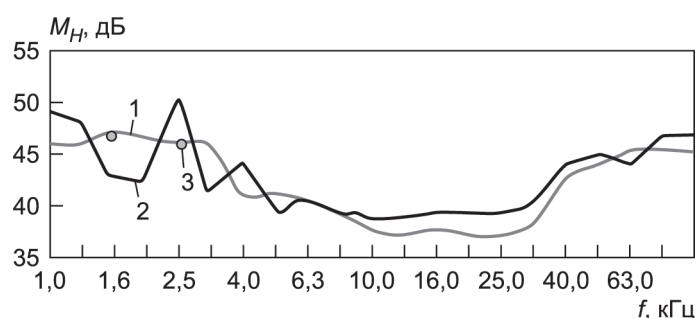


Рис. 3. Третьоктавные уровни подводного шума: 1, 2 – измеренные, соответственно, гидрофоном, откалиброванным согласно [1], и ГП, откалиброванным в третьоктавных частотных полосах; 3 – полученные с использованием энергетической чувствительности ГП, усреднённой по углам падения звуковой волны

решения этой задачи можно использовать подробные ЧХЧ ГП по полю. Предложенная в [3] процедура калибровки позволяет в условиях лабораторного бассейна измерять такие ЧХЧ вплоть до самых низких частот, на которых направленностью ГП можно пренебречь. При этом чувствительность по диффузному полю можно получить расчётным методом по взвешенным значениям энергетических чувствительностей для различных направлений падения звуковой волны, например, аналогично тому, как это принято для шумомера.

Использование автономных ГП позволяет реализовать наиболее эффективные схемы развёртывания ГП при сертификационных измерениях излучаемого судном подводного шума [9]. В стандартах [9–11] детально прописана процедура таких измерений, однако не уделено достаточного внимания вопросам, связанным с учётом акустических свойств ГП. Например, требуется учитывать его направленность, однако отсутствуют рекомендации, как это делать.

При сертификации судна измерения подводного шума выполняют, стараясь обеспечивать фиксированную ориентацию ГП в пространстве. При проходе судна испытательным курсом угловой сектор измерений составляет от $\pm 30^\circ$ [9, 10] до $\pm 45^\circ$ [11]. Это позволяет дополнительно уточнять понятие чувствительности, чтобы иметь возможность учитывать направленность ГП. При измерениях по классам В и С [9, 10] выходное напряжение ГП усредняют в едином временном окне данных, длительность, начало и окончание которого соответствуют проходу корабля в угловом секторе измерений. Поскольку результат усреднения напряжения в полосе частот в угловом секторе измерений будет представлен одним числом, то и чувствительность ГП должна быть охарактеризована одним числом, адекватным измерительной ситуации. В качестве такого числа целесообразно использовать секторальную энергетическую чувствительность: среднее квадратическое значение энергетической чувствительности в номинальной полосе частот третьоктавного фильтра в угловом секторе измерений. Такой способ учёта характеристики направленности ГП можно также применять, когда временное окно данных дробят на короткие выборки, для каждой из которых корректируют расстояние между акустическими центрами корабля и ГП – измерения согласно [11] и по классу А [9, 10].

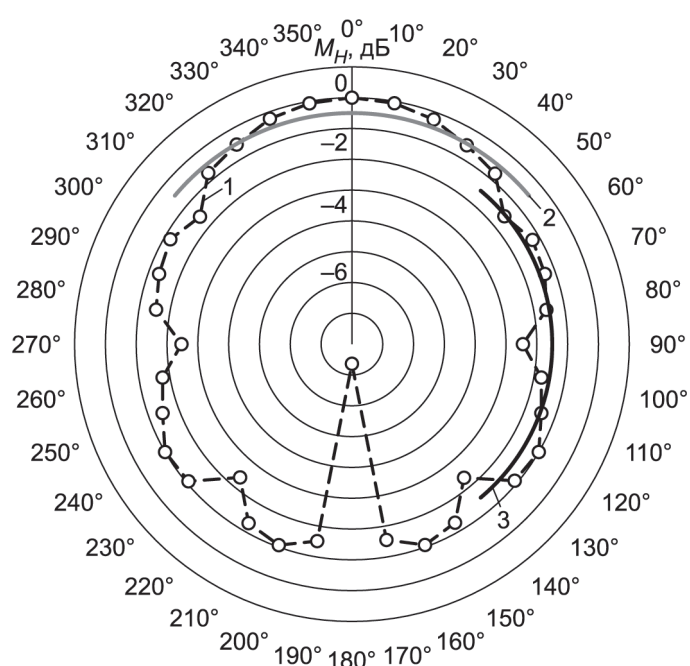


Рис. 4. Характеристика направленности экспериментальной модели ГП в третьооктавной полосе с центральной частотой 16 кГц (1) и секторальные энергетические чувствительности для этой же частотной полосы в угловых секторах $\pm 50^\circ$ (2) и $40\text{--}140^\circ$ (3)

В зависимости от способа крепления ГП на испытательном морском полигоне значения секторальной энергетической чувствительности следует определять во фронтальном или боковом угловых секторах. На рис. 4 представлены характеристика направленности экспериментальной модели ГП в третьооктавной полосе с центральной частотой 16 кГц и энергетические чувствительности для этой же частотной полосы в угловых секторах $\pm 50^\circ$ и $40\text{--}140^\circ$.

Характеристику направленности в третьооктавной полосе частот рассчитывали как двадцать десятичных логарифмов отношения значений энергетической чувствительности ГП в полосе частот при изменении угла падения звуковой волны $\varphi = 0 \dots 360^\circ$ к значению его энергетической чувствительности в полосе частот при падении звуковой волны с опорного направления (при $\varphi_{\text{оп}} = 0$):

$$20 \lg \frac{M_H(f_0, \varphi_i, \Delta f)}{M_H(f_0, \varphi_{\text{оп}}, \Delta f)}.$$

Секторальную энергетическую чувствительность в угловом секторе $\Delta\varphi$, заданном начальным φ_1 и конечным φ_n значениями углов падения звуковой волны, получали как среднее квадратическое значение энергетических чувствительностей ГП в полосе частот:

$$M_H(f_0, \Delta\varphi, \Delta f) = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n M_H^2(f_0, \varphi_i, \Delta f) \right]^{1/2}.$$

На рис. 4 секторальные энергетические чувствительности экспериментальной модели ГП представлены в децибелах

относительно энергетической чувствительности в опорном направлении:

$$20 \lg \frac{M_H(f_0, \Delta\varphi, \Delta f)}{M_H(f_0, \varphi_{\text{оп}}, \Delta f)}.$$

Заключение. Обеспечение единства измерений основано на правильности методов измерений, валидации и верификации применяемых средств измерений (СИ). Для этого в воздушной акустике при измерениях различных шумов используют отработанные методики выполнения измерений и СИ, характеристики которых адекватны этим методикам. Так решается проблема валидации. Методы калибровки (верификация) также подчинены задачам измерений. Различные аспекты решения измерительных задач отражены в системе гармонизированных стандартов.

Исходя из современного понимания проблем экологии моря определены конечные цели и начата разработка стандартов для решения задач измерений подводного шума. Решение таких задач требует выстраивания той же цепочки в гидроакустике: методы измерений, валидация, верификация. Простое копирование подходов, применяемых в воздушной акустике, невозможно хотя бы потому, что показания шумомера в децибелах «А» отражают свойства слуха человека, но не морских обитателей. Использование полосового сигнала при калибровке ГП во многих случаях позволяет решить проблему расстояния дальнего поля. При измерениях звука в лабораторных условиях и шума в море измеряемой величиной является звуковое давление. Однако смысловая нагрузка термина «звуковое давление» и набор параметров, которыми характеризуют звуковое давление в зависимости от задачи измерений, совершенно различны. Прямое применение стандарта [1] не позволяет получить при калибровке характеристику ГП, адекватную методам измерения подводного шума, что, как минимум, приводит к завышенной оценке погрешности результатов измерений. Правильность методов измерений подводного шума, процедур валидации и верификации напрямую зависит от того, насколько используемая формулировка понятия чувствительности ГП применима к задаче измерений.

Л и т е р а т у р а

1. **IEC 60565–2006 (МЭК 60565–2006).** Подводная акустика. Гидрофоны. Калибровка в частотном диапазоне от 0,01 Гц до 1 МГц.
2. **ГОСТ Р 53576-2009 (МЭК 60268-4:2004).** Микрофоны. Методы измерения электроакустических параметров.
3. **Исаев А. Е., Николаенко А. С.** Лабораторная калибровка гидроакустического приемника по полю на низких частотах // Измерительная техника. 2018. № 1. С. 54–59.
4. **Исаев А. Е.** Точная градуировка приемников звукового давления в водной среде в условиях свободного поля. Менделеево: ВНИИФТРИ, 2008.
5. **Isaev A. E., Nikolaenko A. S.** Free-field calibration of underwater sound receiver in a laboratory water tank at very low

frequencies // CCAUV/15-17. Published in electronic version on BIPM website: www.bipm.org, 2017 [Электрон. версия]. https://www.bipm.org/cc/CCAUV/Allowed/11/CCAUV_Workshop_Low-frequency.pdf (дата обращения: 20.01.2018).

6. **ГОСТ Р 8.714-2010 (МЭК 61260:1995)**. ГСИ. Фильтры полосовые октавные и на доли октавы. Технические требования и методы испытаний.

7. **Isaev A., Nikolaenko A.** Calibration of the receiver for the measurement of ambient underwater noise // INTER-NOISE 2016: Proc. 45th Intern. congress exposition on noise control engineering, Hamburg, Germany, 2016. P. 7050–7057.

8. **Исаев А. Е., Черников И. В.** Лабораторная градуировка гидроакустического приёмника в реверберационном поле

шумового сигнала // Акустический журнал. 2015. Т. 61. № 5. С. 1–9.

9. **ISO/DIS 17208-2:2017**. Underwater acoustics. Quantities and procedures for description and measurement of underwater noise from ships. Pt. 2: Determination of source levels from deep water measurements.

10. **ANSI/ASA S12.64-2009/Part 1 (R2014)**. Quantities and procedures for description and measurement of underwater sound from ships. Pt 1. General requirements.

11. **Rule Note NR 614**. Underwater Radiated Noise (URN). Bureau Veritas, 2017.

Дата принятия: 13. 03.2018.

