

Лабораторная градуировка приемника для измерений уровней подводного шума корабля

А. Е. ИСАЕВ

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

Рассмотрена градуировка в лабораторном гидроакустическом бассейне приемника, применяемого для измерений уровней подводного шума в натуральных условиях. Введено понятие чувствительности приемника в 1/3-октавной полосе частот и предложен способ ее определения по подробной частотной характеристике приемника. Показано, как преодолеть сложности, обусловленные рассеянием от конструкции, окружающей гидрофон в приемнике, проявляющиеся в увеличении эффективного размера приемника и расстояния дальнего поля при его градуировке.

Ключевые слова: подводный шум, приемник, чувствительность, 1/3-октавная полоса частот, корреляция источников рассеяния, обобщенный критерий расстояния дальнего поля.

The calibration problems in the laboratory hydroacoustic water tank receiver used for measuring in natural conditions the levels of underwater sound noise were considered. A notion of receiver sensitivity in a fraction octave frequency band and a method of its determination by the detailed frequency characteristic were proposed. The approaches allowing overcome the difficulties caused by scattering from construction surrounding the receiver hydrophone and manifested in an increase of the receiver effective size and of far field distance at its calibration have been considered.

Key words: receiver, underwater noise, sensitivity, 1/3-octave frequency band, scattering sources correlation, generalized criterion of far-field distance.

В последние годы значительно вырос спрос на измерения подводного шума. Стремительно усилившееся влияние антропогенных факторов, вызванное активным освоением ресурсов на морском шельфе, увеличением судоходства большегрузных (сильно шумящих) торговых судов и т. п., обусловило растущий интерес к воздействию подводного шума на экологическое состояние прибрежных акваторий. В [1, 2] подводный звук, излучаемый судном, считается одним из основных источников загрязнения мирового океана, а его нормирование и измерение взято за основу разработки критериев для оценивания благоприятного экологического статуса морской среды.

Величины и процедуры для описания и измерений подводного шума судов в условиях морского полигона регулирует стандарт США [3]. Первые международные стандарты аналогичного назначения разрабатывают организации по стандартизации ISO ТК8 и ТК43. При испытаниях судов измеряют уровни звукового давления в 1/3-октавных полосах частот. Измерения выполняют гидрофоном, установленным на заданной глубине с помощью специальной конструкции — системы вывешивания (далее — носитель гидрофона) [3]. Чувствительность гидрофона необходимо определять с учетом влияния носителя, и она должна быть подходящей для измерений уровня звукового давления шума.

Высокие требования к точности измерений подводного шума (1,5 дБ по классу А [3]) исключают возможность экспертных оценок влияния носителя и заставляют выполнять градуировку не измерительного гидрофона, как это обычно принято, а всего приемника для измерения уровней подводного шума (далее — приемник УПШ) в том виде, в каком его применяют по назначению — гидрофон, установленный в носитель (далее — приемник в целом). При этом проблема градуировки приемника УПШ сегодня остается открытой и

требует обсуждения параметра, который можно использовать в качестве его чувствительности, разработки метода градуировки и стандартизации как соответствующих параметров, так и самого метода.

Проблемы градуировки приемника УПШ. Для измерений уровня воздушного шума в натуральных условиях используют выносные микрофонные системы. Такие системы достаточно сложные, имеют также защиту микрофонов от ветра и птиц. Как правило, параметры выносной системы незначительно отличаются от характеристик встроенного в нее измерительного микрофона. По размерам приемник выносной микрофонной системы ненамного превосходит микрофон, что позволяет градуировать приемник в целом (в сборе) в обычной заглушенной камере методами, традиционно применяемыми для градуировки измерительного микрофона.

Из-за особых условий использования приемника невозможно создать приемник УПШ, характеристики которого мало отличались бы от характеристик измерительного гидрофона. Помимо вывешивания гидрофона носитель, как правило, выполняет функции контейнера периферийной аппаратуры, крепления, позиционирования и механической защиты. Для градуировки приемника УПШ принципиальное значение имеют большие (до 2 м) размеры и неудовлетворительная акустическая прозрачность носителя. Элементы конструкции, окружающей гидрофон, рассеивают падающую на носитель звуковую волну и искажают звуковое поле в точке приема (в месте расположения гидрофона). Следствием этого является высокая изрезанность и значительные (на высоких частотах до 10—15 дБ) отличия между характеристиками приемника УПШ и встраиваемого в него гидрофона.

В качестве примера на рис. 1 показаны частотные характеристики экспериментального образца приемника УПШ 1, приемника при снятом обтекатель 2, собственная частот-

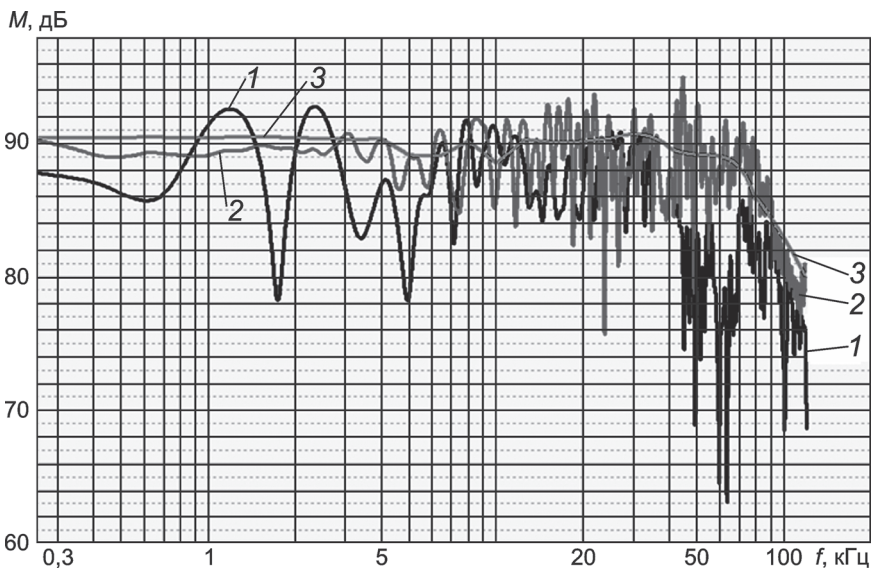


Рис. 1. Результаты градуировки гидрофона, установленного на носителе (кривая 1) и при снятом обтекателе (кривая 2); кривая 3 — собственная частотная характеристика гидрофона

ная характеристика гидрофона приемника 3. Носитель и обтекатель настолько сильно искажают звуковое поле в точке приема (до 20 дБ и выше), что даже при самом поверхностном рассмотрении представленных зависимостей становится очевидным — для такого приемника при измерениях шума в 1/3-октавных полосах использование значений чувствительности гидрофона на 1/3-октавных частотах противоречит здравому смыслу. В этой ситуации теряют актуальность как совершенствование гидрофона, так и повышение точности эталона для его градуировки. Градуировка гидрофона, установленного в носитель, также не улучшает ситуацию с измерением УПШ. Практическое использование для измерений шума в полосах частот значений чувствительности, полученных при градуировке на 1/3-октавных частотах приемника в

целом, нецелесообразно из-за размаха и частоты осцилляций зависимостей 1 и 2 (см. рис. 1), а также изрезанности характеристик направленности приемника, представленных зависимостями 1 на рис. 2, а, б.

При проектировании приемника УПШ разработчики надеются получить хорошие акустические свойства. К сожалению, на практике приходится работать с тем, что оказалось. Даже использование акустически прозрачных материалов не обеспечивает требуемой акустической прозрачности конструкции носителя [4]. Для повышения достоверности оценки погрешности измерений частотной характеристики приемника и уменьшения погрешности измерений УПШ необходимо, чтобы при градуировке приемника выполнялись, как минимум, два требования: градуировать гидрофон, установленный в носитель, и определять чувствительность приемника к тем сигналам, для измерений которых его будут использовать на полигоне.

Рассмотрим две основные проблемы, препятствующие решению этой задачи.

Проблема первая. Рассеяние звуковой волны в точке приема вызывает характерные осцилляции частотной характеристики. Частоту осцилляций определяет временная задержка рассеянной волны относительно прямой: чем дальше находится источник рассеяния от гидрофона, тем меньше период осцилляций, а их самих можно рассматривать как голограмму и использовать ее для определения пространственного распределения рассеивателей [4, 5].

На рис. 3 показаны фрагменты частотных характеристик, полученных при исследованиях экспериментальных конструкций приемника УПШ. Частотная зависимость 1 на рис. 3, а совершает менее двух осцилляций в пределах 1/3-октавной полосы частоты 40 кГц, что позволяет оценить удаленность источника рассеяния от точки приема примерно в 25 см. Пе-

риод осцилляций зависимости 1 в 1/3-октавной полосе частоты 63 кГц на рис. 3, б указывает на присутствие источника рассеяния на расстоянии 15 см от гидрофона.

Во время приема гармонического сигнала рассеяние в точке приема становится причиной того, что в присутствии источника рассеяния эффективный размер приемника определяет расстояние между его активным элементом и источником. Этот размер возрастает в десятки раз и зависит от габаритного размера всей подводной конструкции. Для гидрофона, установленного в носи-

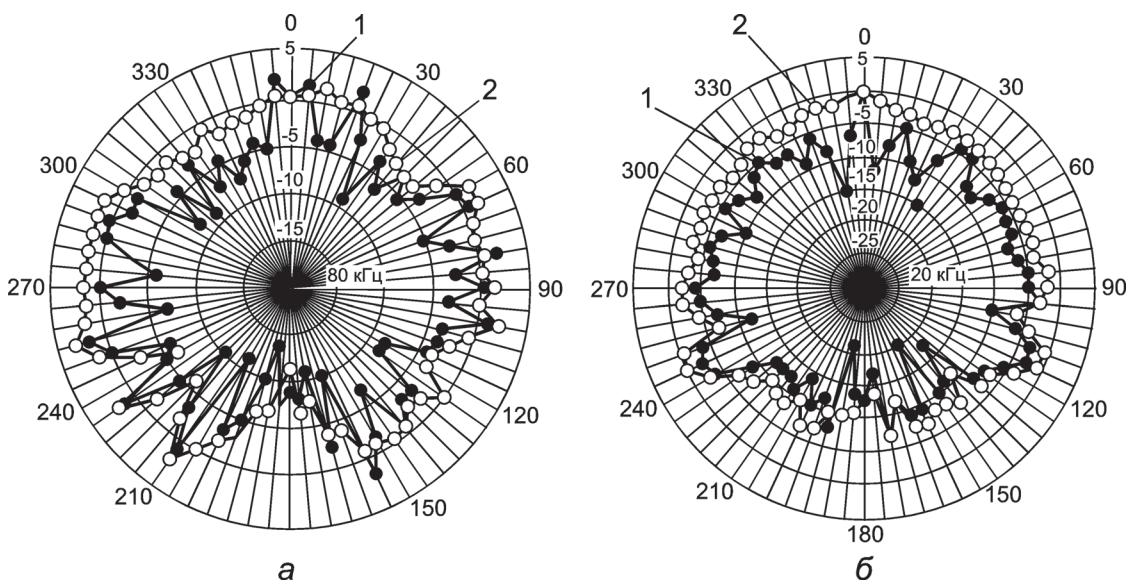


Рис. 2. Характеристики направленности приемника с обтекателем: 1 — на гармоническом сигнале; 2 — на 1/3-октавных полосах частот

тель типа торпеда, это может быть либо диаметр, либо длина торпеды. В такой ситуации эффективный размер приемника может достигать 1 м и более, а расстояние дальнего поля при градуировке приемника на высоких частотах будет составлять десятки или сотни метров. Такая градуировка невыполнима в лабораторном бассейне с применением общепризнанных методов измерений.

Проблема вторая. При измерениях подводного шума среднее квадратическое значение звукового давления $p(\Delta f_{1/n, m})$ в $1/n$ -октавной полосе $1/3$ -октавной частоты с номером m вычисляют по результатам измерений выходного напряжения приемника $U(\Delta f_{1/n, m})$ в той же полосе частот. Напряжение $U(\Delta f_{1/n, m})$ в полосе частот $f_m \pm 1/2 \Delta f_{1/n, m}$ связано со спектральной плотностью мощности $G_p(f)$ измеряемого звукового давления выражением

$$U(\Delta f_{1/n, m}) = \left[\int_{f_m - 1/2 \Delta f_{1/n, m}}^{f_m + 1/2 \Delta f_{1/n, m}} M^2(f) G_p(f) df \right]^{1/2},$$

где $M(f)$ — частотная характеристика чувствительности приемника.

При измерениях шума в частотных полосах, в которых неравномерность частотной характеристики приемника пренебрежимо мала по сравнению с погрешностью измерений, можно принять $M(f) \approx M(f_m)$ и воспользоваться формулой

$$p(\Delta f_{1/n, m}) = U(\Delta f_{1/n, m}) / M(f_m), \quad (1)$$

где $M(f_m)$ — чувствительность приемника на частоте f_m .

Если неравномерность частотной характеристики в пределах частотной полосы измерений существенна, приближительное равенство $M(f) \approx M(f_m)$ нарушается и использование $M(f_m)$ становится некорректным. В этой ситуации вынужденно применяют формулу (1), поскольку в настоящее время при градуировке гидроакустического приемника определяют только набор чувствительностей на $1/3$ -октавном ряде частот.

Предположим, что удалось измерить частотную характеристику приемника УПШ в условиях дальнего поля. На рис. 3 можно видеть, что значения чувствительности изменяются на 2,5 дБ в $1/3$ -октавной полосе частоты 40 кГц и на 5,5 дБ в $1/3$ -октавной полосе частоты 63 кГц, при этом частотные зависимости совершают соответственно две и четыре осцилляции в пределах $1/3$ -октавных полос. Рассмотрим, какое из значений чувствительности в этих частотных полосах является подходящим, чтобы его подставить в формулу расчета УПШ.

Чувствительность в полосе частот. Чувствительность, традиционно измеряемая при градуировке гидроакустического приемника, определена на классе гармонических сигналов и представляет отношение амплитуд выходного напряжения приемника и звукового давления на заданной частоте [6]. Измеряемой величиной является среднее квадратическое значение (СКЗ) звукового давления с распределенной в полосе частот мощностью, которое определяют косвенным методом по результатам измерений напряжения на выходе приемника. При этом использовать традиционную чувствительность приемника некорректно, поскольку она определена на классе гармонических сигналов, а УПШ — на классе широкополосных (шумовых) сигналов. При измерениях УПШ следует применять чувствительность, заданную на классе широкополосных сигналов, например, через СКЗ

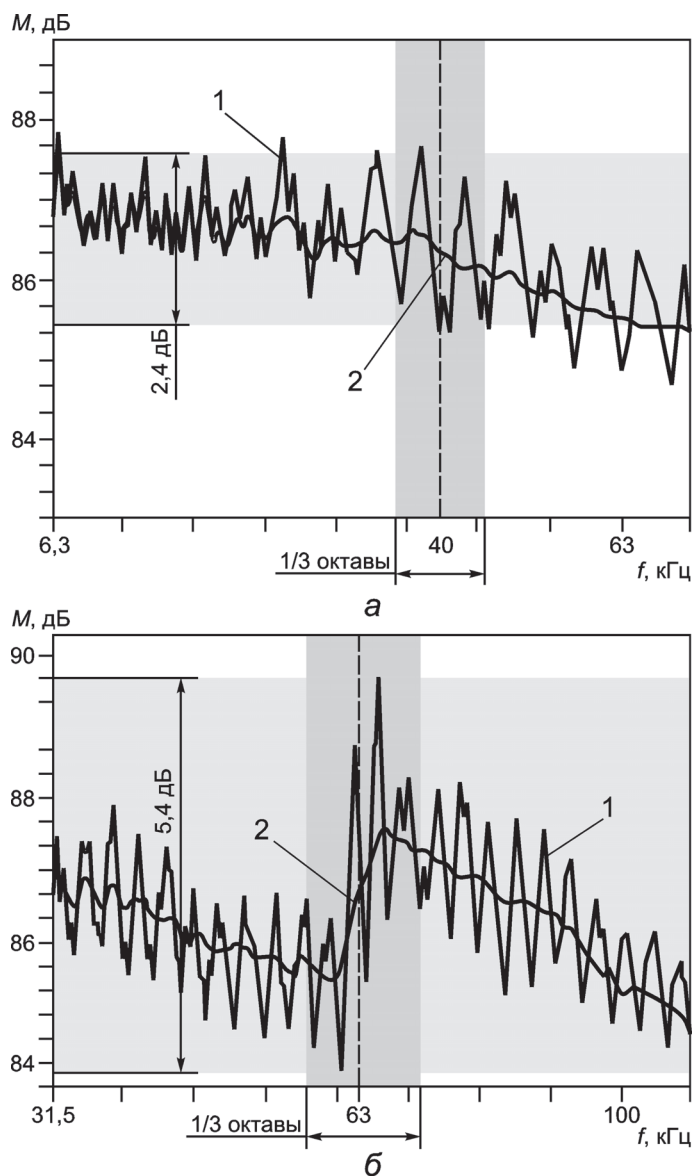


Рис. 3. Частотные характеристики (кривые 1) приемника при источниках рассеяния, удаленных от гидрофона на 25 см (а) и 15 см (б); кривые 2 — СКЗ характеристики на $1/3$ -октавной полосе частот

звукового давления и выходного напряжения приемника в $1/3$ -октавной полосе частот.

В условиях априорной неопределенности относительно спектральных свойств сигнала, измеряемого в натуральных условиях, наиболее простым и универсальным решением может стать градуировка на шуме с равномерным в полосе частот спектром. Кривые 2 на рис. 3 — это частотные зависимости приемника УПШ, рассчитанные как отношение СКЗ выходного напряжения приемника и звукового давления в $1/3$ -октавной полосе частот для случая, когда звуковой шум имеет равномерный спектр в этой полосе. Тогда чувствительность $M_{1/3, m}$ приемника в $1/3$ -октавной полосе частоты f_m можно вычислить как СКЗ модуля частотной зависимости чувствительности приемника в указанной полосе [4]:

$$M_{1/3, m} = \frac{1}{\Delta f_{1/3, m}} \sqrt{\int_{f_m - 1/2 \Delta f_{1/3, m}}^{f_m + 1/2 \Delta f_{1/3, m}} M^2(f) df}. \quad (2)$$

Использовать этот параметр для расчета УПШ правильно, поскольку и чувствительность и УПШ определены для класса широкополосных сигналов. Неоспоримое преимущество введенного таким образом определения чувствительности — его независимость от вида тестового сигнала, применяемого при градуировке, так как в (2) отсутствует спектр шума. В результате эту задачу измерения полосового случайного сигнала во временной области можно заменить задачей измерения частотной характеристики приемника. Другими словами, для вычисления $M_{1/3,m}$ необходимо любым способом измерить достаточно подробную зависимость $M(f)$ по полю.

Получить такую характеристику кажется чрезвычайно просто — достаточно измерить чувствительность с шагом по частоте, выбравшим исходя из формы частотной характеристики приемника, тем более что набор таких методов сегодня достаточно широк [7]. Современные способы реализации условий свободного поля позволяют подавить влияние отражений и при излучении широкополосных (частотно-модулированных либо шумовых) тестовых сигналов в реверберационном поле незаглушенного бассейна получить результаты, эквивалентные измерениям в безэховой камере, многократно уменьшив при этом трудоемкость и продолжительность эксперимента [4]. Однако одно только отсутствие отраженного сигнала при измерениях не означает и не гарантирует свободного поля бегущей звуковой волны, понятие которого, строго говоря, подразумевает бесконечное существование свободного поля во времени и его бесконечную протяженность в пространстве. Последнее означает возможность разнести в таком поле излучатель и приемник на сколь угодно большое расстояние — расстояние дальнего поля, обеспечив тем самым условия, при которых падающую на приемник звуковую волну можно считать локально плоской. Как уже было упомянуто, принципиальным препятствием для разнесения излучателя и приемника при градуировке приемника УПШ традиционными методами является совокупность двух факторов: увеличение эффективного размера приемника вследствие рассеяния звуковой волны на носителе и ограниченные размеры рабочей зоны измерительного бассейна.

Увеличение размеров рабочей зоны бассейна даже в сравнительно небольших масштабах требует значительных материальных затрат. Для решения задачи градуировки приемника УПШ неосознанно больший практический интерес представляет управление эффективным размером приемника.

Частотно-временное соотношение неопределенностей и эффективный размер приемника УПШ. Для ответа на вопрос, каким образом задать чувствительность, подходящую для измерения УПШ в $1/n$ -октавных частотных полосах, как того требует стандарт [3], обратимся вновь к зависимостям на рис. 2, 3. Кривыми 2 (см. рис. 2) представлены характеристики направленности, полученные по результатам измерений чувствительности приемника УПШ в $1/3$ -октавных полосах частот. Осцилляции этих кривых существенно меньше осцилляций кривых 1. Аналогично осцилляции кривых 2 (см. рис. 3) существенно меньше осцилляций кривых 1 и с увеличением частоты уменьшаются до пренебрежимо малых, т. е. исчезает эффект от рассеивателей. Осцилляции устранены из-за выглаживания частотных зависимостей, свойственного любой операции усреднения. В данном случае происходит усреднение по частоте при вычислении СКЗ в

полосе частот. Однако выравнивание зависимостей 2 на рис. 2, 3 имеет более глубокий смысл.

Если в частотно-временном соотношении неопределенностей $\Delta f \Delta t \geq 1$ временной интервал выразить отношением расстояния $\lambda'_{\Delta f}$ к скорости звука $\Delta t = \lambda'_{\Delta f} / c$, то получим час-

отно-пространственное соотношение $\Delta f = c / \lambda'_{\Delta f}$, связывающее частоту (частотный интервал) и пространственную переменную (расстояние) через фундаментальную константу — скорость звука, характеризующую среду распространения звуковой волны.

Рассмотрим полученное соотношение с точки зрения пространственного стробирования, возникающего при вычислении СКЗ широкополосного звукового шума [4]. Суть стробирования в том, что при приеме широкополосного сигнала ширине полосы частот Δf в окружающем приемник пространстве можно сопоставить область, которую из точки приема охватывает радиус $\lambda'_{\Delta f} = c / \Delta f$ (в математике — радиус корреляции), обратно пропорциональный Δf . Радиус корреляции определяет размер так называемой пространственной области корреляции источников рассеяния (размер области приема в [4]). Главное свойство области состоит в том, что на осцилляции частотной характеристики приемника (характеристики направленности) оказывают влияние только те источники рассеяния, которые находятся внутри области корреляции. Источники вне области не вызывают осцилляций характеристик приемника УПШ [4]. Иными словами, при наличии у приемника УПШ рассеивателя звуковой волны частотно-временное соотношение неопределенностей накладывает ограничение на размер области приема и соответственно акустический размер приемника. Таким образом, эффективный размер приемника УПШ ограничен сверху областью приема $\lambda'_{\Delta f}$, значение которой зависит от ширины полосы частот принимаемого акустического шума.

Критерий расстояния дальнего поля при градуировке приемника УПШ. Рассмотрим его на примере $1/3$ -октавной полосы частоты f_m . Ширину полосы примем пропорциональной средней частоте полосы $\Delta f_{1/3,m} \approx 0,23 f_m$. Тогда размер области приема $\lambda'_{1/3,m} \approx 0,44 \lambda_m$ (λ_m — длина звуковой волны на средней частоте полосы) уменьшается с увеличением частоты (ширины полосы частот).

Обобщенный критерий расстояния дальнего поля $D_{1/3,m}$ для градуировки в $1/3$ -октавных частотных полосах приемника УПШ при наличии у приемника источника рассеяния, удаленного от точки приема на расстояние d , запишем в виде

$$D_{1/3,m} \approx \beta d^2 / \lambda_m \text{ для } d \leq \lambda'_{1/3,m};$$

$$D_{1/3,m} \approx \beta (\lambda'_{1/3,m})^2 / \lambda_m \text{ для } d > \lambda'_{1/3,m},$$

где β — константа, значение которой выбирают из условий эксперимента.

В качестве примера на рис. 4 приведены зависимости $3,5 d^2 / \lambda_m$, $3,5 (\lambda'_{1/3,m})^2 / \lambda_m$ — соответственно кривые 1, 2 и зависимость $D_{1/3,m}$, полученная при $d = 40$ см (кривая 3).

Расстояния дальнего поля возрастают на низких частотах, но в отличие от градуировки на гармонических сигналах

уменьшаются на высоких частотах. Отметим следующие два обстоятельства. Частотные полосы в диапазоне средних частот представляются наиболее неудачными в смысле большого расстояния дальнего поля. Значения обобщенного критерия для высоких частот получены из соотношения неопределенности, и не учитывают структуру области рассеяния.

Если пространственное распределение источников рассеяния известно, то с помощью обобщенного критерия можно уточнить расстояния дальнего поля. Удаленность этих источников от точки приема можно оценить, например, по осцилляциям частотной зависимости методами, аналогичными акустической голографии [4, 5]. На рис. 5 изображена частотная зависимость расстояния дальнего поля (при градуировке 1/3-октавного приемника УПШ) в форме сферы диаметром 0,8 м с двумя источниками рассеяния, удаленными от точки приема на 40 и 26 см (кривая 5). На низких частотах ширина 1/3-октавной полосы достаточно узкая и соответствующая ей область корреляции охватывает оба рассеятеля. Размер приемника УПШ и расстояние дальнего поля определяет источник, который наиболее удален от точки приема.

С приближением к средним частотам ширина 1/3-октавной полосы увеличивается. Область корреляции сжимается так, что удаленный рассеятель выпадает из этой области. Расстояние дальнего поля резко уменьшается до значения, которое задает рассеятель, ближний к точке приема. Потом расстояние дальнего поля вновь увеличивается с ростом частоты до тех пор, пока вне области корреляции окажется ближний рассеятель, при этом расстояние дальнего поля опять резко уменьшится. Эти эффекты проиллюстрированы на рис. 5 кривой 5. Учет пространственного распределения источников рассеяния позволил уменьшить расстояние дальнего поля до 5 м и градуировать 1/3-октавный приемник УПШ по полю в лабораторном бассейне длиной 10, шириной 9 и глубиной 6 м.

Заключение. Сегодня для гидроакустического приемника стандартизована только чувствительность по полю, которую находят при градуировке на частотах 1/3-октавного ряда [6, 8]. В силу определения чувствительности по полю более всего относится к измерительному гидрофону, применяемому при лабораторных измерениях, когда известны направления излучения и приема, гидрофон обладает малым рассеянием, а характеристика направленности близка к круговой. Вместе с тем, эта чувствительность

не пригодна для измерений подводного шума (судна или морской среды). Необходимость повысить точность измерений заставляет разрабатывать новые методы градуировки, вводить и применять специальное определение чувствительности приемника УПШ.

Предложенное понятие чувствительности в полосах частот конкретизирует универсальное определение чувствительности гидрофона в [8] применительно к измерениям подводного шума и обобщает понятие чувствительности по полю на класс сигналов с распределенной по частоте мощностью. Традиционную чувствительность по полю можно рассматривать как предельный случай чувствительности в полосе частот при стремлении ширины полосы к нулю.

Можно выделить следующие преимущества предложенного подхода к градуировке приемника УПШ. В отличие от

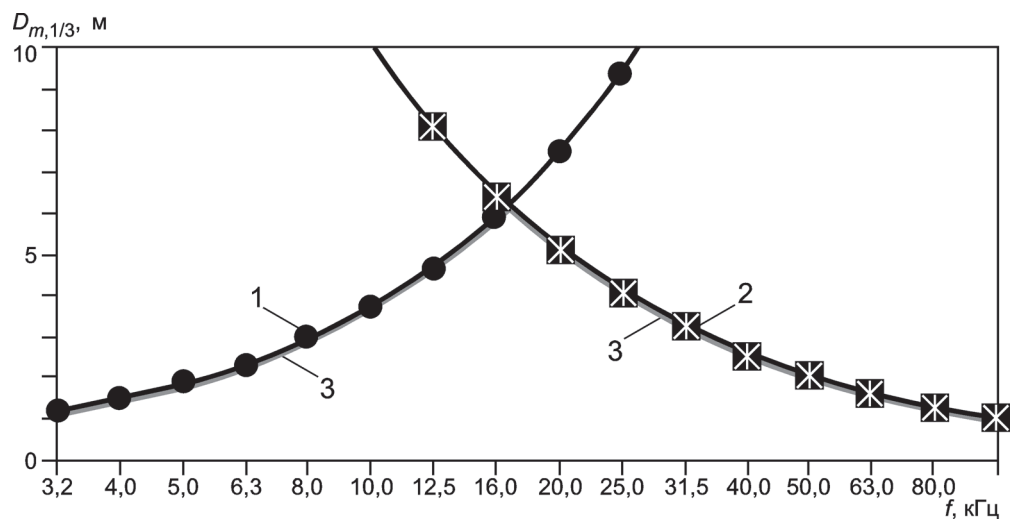


Рис. 4. Зависимости $3,5d^2/\lambda_m$, $3,5(\lambda'_{1/3,m})^2/\lambda_m$ — соответственно кривые 1, 2, и зависимость критерия расстояния дальнего поля для приемника УПШ при наличии источника рассеяния, удаленного от точки приема на 40 см (кривая 3)

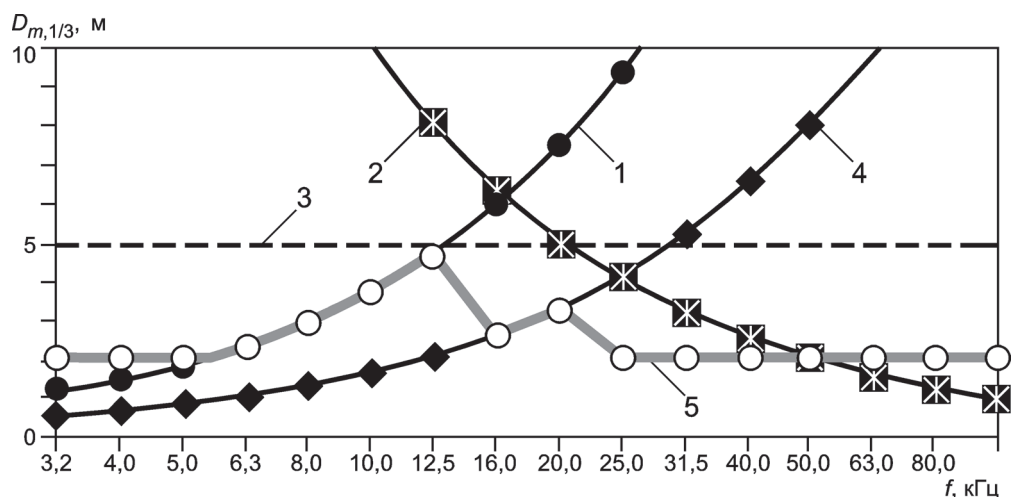


Рис. 5. Частотные зависимости расстояния дальнего поля: 1, 4 — для удаленного и ближнего источников рассеяния; 2, 5 — рассчитанные исходя из размера области корреляции и с учетом удаленности источников от точки приема для градуировки в 1/3-октавных полосах; 3 — максимально возможное расстояние между приемником УПШ и излучателем в бассейне

традиционной чувствительности по полю чувствительность в $1/n$ -октавных полосах частот задана на классе сигналов, по свойствам более близким к шумовым, и поэтому более приемлема для измерений подводного шума в соответствии с [3]. Процедура градуировки не требует излучения шумовых сигналов в гидроакустическом бассейне. Для получения чувствительности в $1/n$ -октавной полосе частот достаточно использовать подробную частотную характеристику приемника. Значительно сокращается расстояние между источником звука и приемником УПШ как при градуировке, так и измерении излучаемого судном шума.

Несомненно, что введение в практику нового понятия «чувствительность в $1/n$ -октавной полосе частот», а также конкретизация способа задания чувствительности на классе сигналов с распределенной по частоте мощностью потребуют значительно большего опыта их применения, чем был получен в одной лаборатории. Чтобы уточнить расстояние между приемником и источником звука и оценить возможность градуировки приемника УПШ в лабораторном бассейне заданных размеров необходимо изучить источники рассеяния. К недостаткам подхода следует отнести то, что исследования были ограничены только моделью в виде точечного приемника в окружении локализованных в пространстве эквивалентных источников рассеяния. Вместе с тем часть проблем, связанных со значительной продолжительностью эксперимента по получению подробных частотных характеристик, удалось преодолеть благодаря разработанному во ВНИИФТРИ методу реализации условий свободного поля при излучении в гидроакустическом бассейне с отражающими границами продолжительных линейно-частотно-модулированных и шумовых сигналов [4, 9].

Литература

1. **EURAMET TC-AUV ROADMAP: UNDERWATER ACOUSTICS.** Underwater acoustical metrology to support marine technology and sustain the marine environment [Электрон. ресурс]. www.gobokee.org/ebook/euramet-tc-auv-roadmap-underwater-acoustics-underwater-37se1q (дата обращения 01.06.2014 г.).
2. **Marine Strategy Framework Directive 2008/56/EC** of the European Parliament and of the Council of 17 June 2008 [Электрон. ресурс]. www.ec.europa.eu (дата обращения 01.06.2014 г.).
3. **ANSI/ASA S12.64—2009.** Quantities and Procedures for Description and Measurement of Underwater Sound from Ships. Part 1: General Requirements.
4. **Исаев А. Е.** Точная градуировка приемников звукового давления в водной среде в условиях свободного поля. Менделеево: Изд-во ВНИИФТРИ, 2008.
5. **Исаев А. Е.** Применение методов акустической голографии при исследовании гидроакустических измерительных модулей в условиях лабораторного бассейна // Законодательная и прикладная метрология. 2007. № 5. С. 53—57.
6. **IEC 60565 (2006).** Underwater acoustics — Hydrophones — Calibration in the frequency range 0,01 Hz to 1 MHz.
7. **Robinson S.** Review of methods for low frequency transducer calibration in reverberant tanks // PL Report CMAM 034. ISSN 1369-6785. 1999.
8. **P50.2.037—2004.** ГСИ. Измерения гидроакустические. Термины и определения.
9. **Исаев А. Е., Матвеев А. Н.** Градуировка гидрофонов по полю при непрерывном излучении в реверберирующем бассейне // Акустический журнал. 2009. Т. 55. № 6. С. 727—736.

Дата принятия 10.11.2014 г.

539.1.074

Использование методов спектрометрии нейтронов при измерении дозиметрических величин

П. Ф. МАСЛЯЕВ, С. Г. ФЕДОРОВ

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Менделеево, Россия, e-mail: fedorov911@gmail.com

Описан алгоритм восстановления спектра нейтронов с использованием нейтронных спектрометров, содержащих различные блоки детектирования, помещенные в шаровой замедлитель. Показаны способы учета и исключения влияния сопутствующего излучения. Описаны преимущества и недостатки различных детекторов, применяемых для дозиметрии нейтронного излучения.

Ключевые слова: нейтронные дозиметрия и спектрометрия, энергетическая зависимость чувствительности.

An algorithm for the recovery of the neutron spectrum using neutron spectrometers with different detection units placed in a ball moderator. Showing methods of accounting and exclude the effect of concomitant radiation. Influencing factors are described, the advantages and disadvantages of the various detectors used in neutron radiation dosimetry.

Key words: neutron dosimetry and spectrometry, sensitivity energy dependence.

Основными величинами, используемыми в дозиметрии нейтронного излучения, являются мощности поглощенной дозы, ее эквивалента и производные от них величины: керма и поглощенная доза в мышечной ткани, амбиентный

(АЭД) и индивидуальный (ИЭД) эквиваленты дозы. Средства измерений (СИ) поглощенной дозы и ее мощности применяются в лучевой терапии и аварийной дозиметрии [1]. Средства измерений АЭД и его мощности служат при контроле