

Использование реверберационных звуковых полей для метрологических работ в лабораторном гидроакустическом бассейне

А. Е. ИСАЕВ, И. В. ЧЕРНИКОВ

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

Описана методика измерений по свободному полю, предназначенная для градуировки гидроакустических преобразователей в незаглушенном лабораторном бассейне и основанная на использовании реверберационных полей шумового и линейно-частотно-модулированного сигналов в сочетании с обработкой методом скользящего комплексного взвешенного усреднения. Приведены результаты испытаний методики в шумовом реверберационном поле лабораторного бассейна.

Ключевые слова: градуировка, гидроакустический приемник, реверберационное и диффузное звуковые поля, измерения по свободному и диффузному полям.

The technique of free-field measurements for the calibration of underwater sound transducers in reverberant laboratory water tank is described. The technique is based on the use of reverberant fields of noise and linearly frequency modulated signals in combined with the processing by method of complex moving weighted averaging. The results of testing the technique in the noise reverberant field of laboratory water tank are submitted.

Key words: calibration, underwater sound receiver, reverberant sound field, diffuse sound field, free-field measurements, diffuse-field measurements.

Во ВНИИФТРИ разработана и совершенствуется новая методика измерений, которая позволяет существенно расширить метрологические работы в лабораторном гидроакустическом бассейне. При использовании реверберационных полей широкополосных акустических сигналов методика базируется на программно-аппаратной реализации метода скользящего комплексного взвешенного усреднения (СКВУ) [1] и критерии качества реализации условий свободного поля [2]. Методика регламентирует измерения подробной частотной зависимости комплексного передаточного импеданса (ПИ) пары излучатель — приемник; испытания акустических свойств гидрофонов и их подводных носителей различного конструктивного исполнения, измерения чувствительности гидроакустических приемников к скалярной (звуковое давление) и векторным (колебательная скорость, градиент давления) величинам акустического поля абсолютным и относительным методами, а также фазочастотных характеристик [3—5].

Первые практические результаты по применению методики были получены в 2005 г. при использовании линейно-частотно-модулированного (ЛЧМ) сигнала. Сегодня возможности градуировки гидроакустического приемника в реверберационном поле ЛЧМ-сигнала с помощью техники СКВУ достаточно исследованы и представлены в [1, 4—6]. Расширились возможности градуировки по полю вследствие применения шумового акустического сигнала. Ниже приведены сведения об измерениях в шумовом реверберационном звуковом поле и результатах тестирования в большом и малом лабораторных бассейнах ГЭТ 55—2011 [7].

В основе градуировки гидроакустического преобразователя методами взаимности и сличения с опорным гидрофоном лежит измерение ПИ пары излучатель — приемник [8].

Из общей теории линейных систем следует, что в свободном звуковом поле комплексные спектры тока через излучатель $S_i(f)$ и выходного напряжения приемника $R_i(f)$ связаны через комплексный ПИ пары излучатель—приемник в свободном поле соотношением $R_i(f) = Z_{\text{СП}}(f) S_i(f)$. Методика предусматривает следующий порядок получения $Z_{\text{СП}}(f)$ по результатам измерений в шумовом реверберационном звуковом поле. Реверберационное поле в бассейне создают, возбуждая излучатель шумовым сигналом, превышающим по продолжительности время реверберации в бассейне. Измеряют спектры $S_i(f)$ и $R_i(f)$, которые используют для вычисления текущих взаимных спектров $R_i(f)S_i(f)^*$ и спектров мощности $|S_i(f)|^2 = S_i(f)S_i(f)^*$ (символ * означает комплексное сопряжение). Текущие спектры усредняют по n реализациям и получают усредненные оценки спектра мощности $\langle |S_i(f)|^2 \rangle$ и взаимного спектра $\langle R_i(f)S_i(f)^* \rangle$. С использованием полученных оценок передаточный импеданс пары излучатель — приемник в реверберационном поле вычисляют по формуле

$$Z_{\text{СП}}(f) = \langle R_i(f)S_i(f)^* \rangle / \langle |S_i(f)|^2 \rangle.$$

Передаточный импеданс пары в свободном поле получают обработкой ПИ пары в реверберационном поле по методу СКВУ:

$$Z_{\text{СП}}(f) = \frac{1}{\Delta f_{\text{ВУ}}} \int_{-\Delta f_{\text{ВУ}}/2}^{\Delta f_{\text{ВУ}}/2} Z_{\text{СП}}(f - f') h_{\text{ВФ}}(f') df',$$

где $\Delta f_{\text{ВУ}}$ — частотный интервал взвешенного усреднения; $h_{\text{ВФ}}(f)$ — взвешивающая функция [1].

Условия тестирования. Для оценки возможностей методики и отладки ее программной реализации были выполнены:

измерения тонально-импульсным методом (в свободном поле) характеристик направленности гидроакустических приемников, а также амплитудно- и фазочастотных характеристик ПИ пары излучатель — приемник;

исследования звукового поля при излучении в бассейне продолжительных сигналов белого шума;

измерения в реверберационном шумовом поле (с использованием методики) зависимостей звукового давления от расстояния до излучателя и характеристик направленности приемников по свободному полю, амплитудно- и фазочастотных характеристик ПИ пары излучатель — приемник по свободному и диффузному полям.

Особенность шумового реверберационного звукового поля в бассейне — возможность выделения зоны свободного (прямая волна излучателя доминирует) звукового поля и диффузной зоны (преимущественное направление падения звуковой волны отсутствует), разделенных переходной зоной [9]. Диффузное и свободное поля — понятия в определенном смысле взаимно исключающие. Свободное поле подразумевает абсолютно детерминированный случай распространения бегущей волны в отсутствие влияния каких-либо преград. Диффузное поле создается излучением шумового сигнала в помещение с отражающими границами. Тем самым достигают максимальной плотности звуковых мод и случайности фаз звуковых волн, максимально приближая звуковое поле к «хаосу», в котором отсутствует зависимость акустических параметров поля от пространственной координаты, а направленные свойства приемника не проявляются. Чем ближе характеристики реверберационного и диффузного полей, тем сложнее задача измерений по полю. И наоборот, близость характеристик реверберационного и свободного звуковых полей должна упрощать задачу точных измерений по полю.

Перед тестированием методики было важно оценить степень близости характеристик звукового поля, свободного или диффузного, поскольку это может влиять на качество измерений по полю. Большой и малый бассейны ГЭТ 55—2011 выполнены в виде коробов: железобетонного длиной 10,25 м, шириной 6,5 м, глубиной (расстояние от зеркала воды до дна) 5,9 м и изготовленного из листов оргстекла длиной 1,5 м, шириной 1 м, глубиной 1 м. Звуковое поле в большом бассейне исследовали в частотном диапазоне 500 Гц — 100 кГц, в малом — на частотах 200—500 кГц. Излучатель возбуждали продолжительными сигналами типа белый шум. Измеряли звуковые давления в частотных полосах шириной 3 кГц и получали зависимости звукового давления от расстояния до излучателя для различных частот (центральных частот полос). Близость характеристик звукового поля в бассейне и диффузного либо свободного полей оценивали по отклонениям экспериментальных зависимостей от опорных, отражающих поведение звукового давления в идеальном диффузном поле либо свободном поле сферической звуковой волны, причем это отклонение, анало-

гичное тому, как было принято в [9], не должно превышать $\pm 1,3$ дБ.

В результате исследований, в частности, были подтверждены сделанные в [9] выводы о том, что критерию близости к свободному полю удовлетворяет участок реверберационного звукового поля на расстояниях 30—60 см от излучателя. С увеличением расстояния от 60 см до 2 м (переходная зона) экспериментальная зависимость звукового давления все больше отклоняется от функции $1/r$, приближаясь к горизонтальной прямой. На расстояниях 2—5 м от излучателя звуковое давление утрачивает зависимость от расстояния и поле приближается к диффузному. Результаты экспериментов в малом бассейне позволили рассматривать зонную структуру формирующегося в нем шумового реверберационного поля как копию зонной структуры поля в большом бассейне в масштабе 1:6.

При таком поведении звукового поля, когда с увеличением расстояния до излучателя поле все более отличается от свободного, приближаясь к диффузному, задача измерений по полю усложняется от наиболее простой в зоне свободного поля до неразрешимо сложной в диффузной зоне. Это дает возможность исследовать границы применимости методики. Уменьшение отношения сигнал — помеха с удалением от излучателя дополнительно ужесточает условия испытаний, но позволяет оценить помехозащищенность измерений. В силу перечисленных обстоятельств условия для измерений по полю в шумовых реверберационных полях бассейнов ГЭТ 55—2011 были признаны весьма подходящими для испытаний.

Проверка качества реализации условий свободного поля. Качество реализуемых условий свободного поля проверяли по экспериментальным зависимостям, обратным зависимости звукового давления от расстояния до излучателя. В большом бассейне такие зависимости с использованием методики получали в частотном диапазоне 1—100 кГц, увеличивая расстояние между излучателем и приемником с 0,3 до 5 м. Для этих зависимостей строили прямые наилучшего (по методу наименьших квадратов) приближения, характеризующие поведение зависимостей сферической звуковой волны в свободном поле. Отклонения экспериментальных данных от прямых наилучшего приближения не превысили 1,3 % независимо от того, в какой зоне (свободного звукового поля, диффузной или переходной) находился приемник и на какой частоте выполняли измерения [10]. Аналогичные результаты наблюдали при тестировании в малом бассейне.

Качество измерений по полю также оценивали по среднему квадратическому отклонению (СКО) частотных зависимостей ПИ пары излучатель — приемник, полученных с использованием методики при различных расстояниях между излучателем и приемником. Для этого в шумовом реверберационном поле получали частотные зависимости по полю, увеличивая расстояние между излучателем и приемником также от 0,3 до 5 м. Рассчитывали СКО зависимостей от опорной, которую измерили тонально-импульсным методом при расстоянии 0,5 м между излучателем и приемником. Для

всех частот СКО не превысили 0,3 дБ с учетом результатов на предельных расстояниях между излучателем и приемником [10]. Различия СКО, полученных в экспериментах на разных частотах и расстояниях, оказались незначительны.

При тестировании фазочастотные характеристики пары излучатель—приемник измеряли тонально-импульсным методом при расстоянии 0,5 м между излучателем и приемником и с использованием методики при удалении приемника в диффузную зону на расстояние 4 м от излучателя [10]. Различия значений фазового угла, найденных разными методами в свободном звуковом поле и в диффузной зоне, увеличиваются с ростом частоты, но на частотах до 63 кГц включительно не превышают 0,1 рад, что соответствует точности современных эталонов для фазовой градуировки гидрофонов.

Измерения характеристик направленности. Для уменьшения погрешности измерений в описанных выше экспериментах в качестве излучателя и приемника использовали ненаправленные гидрофоны (характеристика направленности на всех частотах близка к круговой). Эксперименты, выполненные с направленными приемниками, заслуживают отдельного рассмотрения. Близость реверберационного поля к диффузному и качество измерений по свободному полю удобно оценивать, используя приемник с существенно неравномерной характеристикой направленности. Какими бы глубокими и узкими провалами ни была изрезана характеристика направленности приемника в свободном поле, на характеристике, измеренной в идеальном диффузном поле, провалов не должно быть, а сама характеристика должна иметь вид окружности, поскольку в диффузном поле понятия прямой волны излучателя и направления приема (направленности приемника) отсутствуют. Если характеристика, измеренная в шумовом реверберационном поле, заметно отличается от окружности, то звуковое поле существенно отличается от диффузного. Изменение характера изрезанности и уменьшение глубины провалов на характеристике направленности позволяют проконтролировать и оценить диффузность звукового поля количественно. И наоборот, близость формы характеристики направленности приемника в свободном поле и измеренной по полю в шумовом реверберационном поле на участках со значительной неравномерностью и провалами дает возможность судить о качестве реализации условий свободного поля при использовании методики.

Были подобраны два специальных приемника (далее приемники А и Б) с явно выраженными направленными свойствами для экспериментов по измерению характеристик направленности в большом (приемник А) и малом (приемник Б) бассейнах. На рис. 1 кривыми 1, практически совпадающими с кривыми 3, показаны характеристики направленности приемника А в свободном поле, измеренные тонально-импульсным методом на частотах 25 и 30 кГц на расстоянии 0,7 м от излучателя. Характеристики изрезаны многочисленными узкими провалами до 35—40 дБ. Приемник с такими характеристиками направленности позволяет наглядно продемонстрировать диффузность звукового поля

и одновременно — возможности методики при измерениях по свободному полю.

При измерениях по диффузному полю приемник ориентировали опорным направлением на излучатель, установленный на расстоянии 4,7 м, от которого поступали продолжительные шумовые сигналы. Измеряли зависимость выходного напряжения приемника от угла падения прямой волны излучателя в частотных полосах шириной 3 кГц. Эти зависимости, изображенные на рис. 1 кривыми 2, намного равномернее характеристик в свободном поле: глубокие узкие провалы отсутствуют, а неравномерность не превышает 4—5 дБ. Из сравнения неравномерности характеристик направленности в диффузной зоне и приведенных выше отклонений звукового давления от горизонтальной прямой с типовой погрешностью градуировок рабочих гидрофонов следует, что в этой области бассейна характеристики звукового и диффузного полей достаточно близки.

При тех же углах падения прямой волны излучателя на приемник определяли частотные зависимости пары излучатель—приемник по полю с использованием методики. По этим зависимостям строили характеристики направленности на отдельных частотах и в частотных полосах — соответственно кривые 3, 4 на рис. 1. Результаты экспериментов показали, что характеристики направленности по полю, измеренные в диффузной зоне реверберационного поля на расстоянии 4,7 м от излучателя, практически повторяют характеристики направленности, измеренные тонально-импульсным методом при расстоянии 0,7 м между излучателем и приемником. Исключение составляет интервал 15—45°, где несовпадения характеристик можно расценить как существенные. Для характеристик на частоте 30 кГц заметны также расхождения в пределах 115—125°, они объясняются различным влиянием эксцентриситета оси вращения приемника на результаты измерений, когда расстояния между излучателем и приемником различаются на 4 м (0,7 и 4,7 м). Подтверждением этому может служить почти полное совпадение кривых 1, 3 на рис. 2 (различия заметны в угловом интервале 150—180°), которыми представлены характеристики направленности приемника Б, измеренные соответственно тонально-импульсным методом и с применением методики в диффузной зоне реверберационного поля малого бассейна. Такое совпадение характеристик направленности позволяет сделать вывод о высокой эффективности разработанной методики измерений.

Практические критерии диффузного звукового поля.

При измерениях в малом бассейне в качестве приемников звукового давления использовали гидрофоны и находили скалярную составляющую акустического поля. При измерениях в большом бассейне приемником А служил приемник градиента звукового давления КГП10, с помощью которого регистрировали векторную составляющую акустического поля. На частотах 25 и 30 кГц, много превосходящих верхнюю граничную частоту приемника 12,5 кГц, характеристики направленности КГП10 резко отличаются от дипольных, их искажают дополнительные резкие провалы глубиной 30—35 дБ. Это обстоятельство также использовали для ужесто-

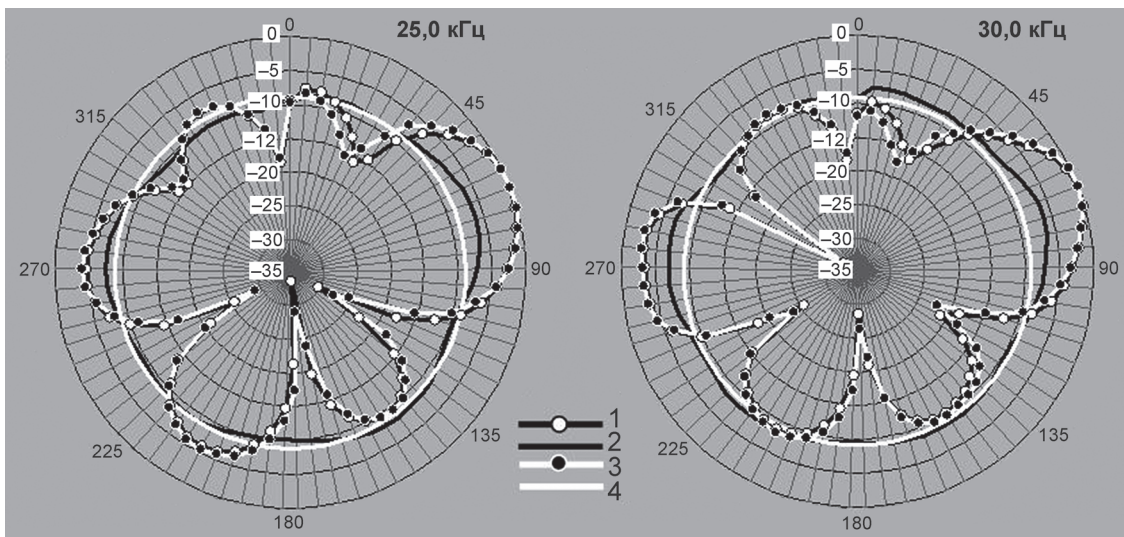


Рис. 1. Характеристики направленности приемника А:

1 — в свободном поле; 2 — по диффузному полю; 3 — измеренная по полю в зоне диффузного поля; 4 — чувствительность по диффузному полю

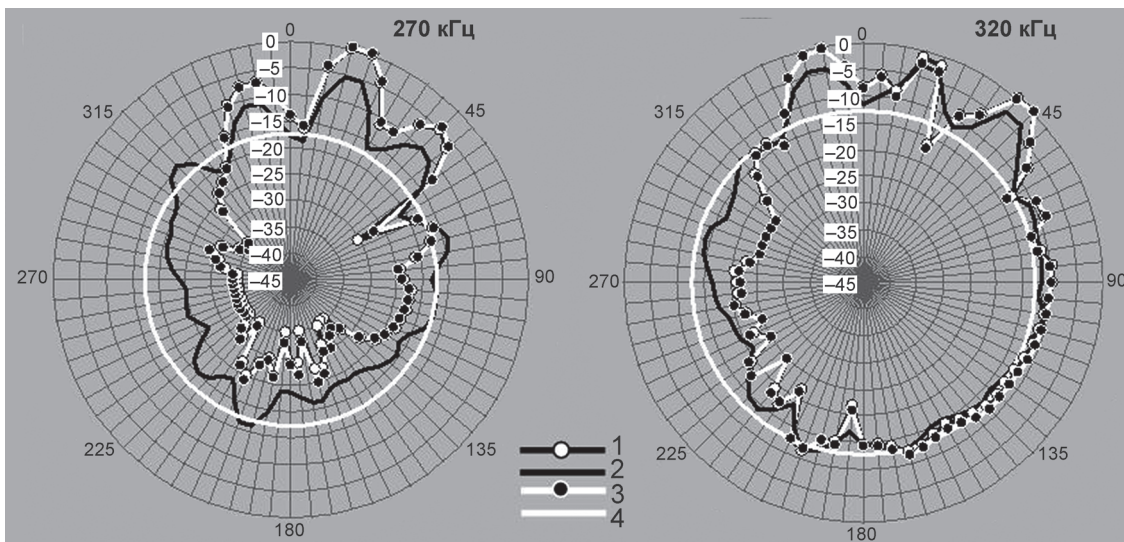


Рис. 2. Характеристики направленности приемника Б:

обозначения кривых те же, что на рис. 1

чения условий испытаний. Характеристики направленности КГП10, полученные с применением методики на частотах его рабочего диапазона, имеют характерную для диполя форму, что типично для векторного приемника [10]. До настоящего времени градуировку векторного приемника выполняли в стоячей волне камеры малого объема в диапазоне, ограниченном сверху критической частотой 1—2 кГц. Попытки расширить частотный диапазон камеры на более высокие частоты успехом не увенчались. Применение методики позволяет градуировать векторные приемники по полю в частотном диапазоне от 500 Гц и выше, а стоячую волну использовать на более низких частотах, на которых погрешности измерений в камере удовлетворительны.

Определение диффузного поля появилось из статистической теории реверберации, согласно которой поле долж-

но отвечать требованиям изотропности и однородности, что позволяет измерять акустическую мощность источника шума по звуковому давлению в помещении, а также градуировать по диффузному полю приемник звукового давления. Вместе с тем изотропность (одно из главных свойств диффузного поля) проявляется в инвариантности звукового давления к пространственной координате. При этом остается неясным, как интерпретировать сигнал на выходе приемника градиента давления, помещенного в такое звуковое поле.

Применяемые практические критерии диффузного поля опираются на понятие звуковой волны и оказываются недостаточными, поскольку в действительности относятся к реверберационному полю. При большом числе отражений реверберационное поле становится почти диффузным, т. е. среднее квадратическое значение звукового давления во всех точках поля одинаковое и таким образом

обеспечивается выполнение свойства однородности (средние по времени значения плотности звуковой энергии во всех точках равны). При этом не следует забывать, что обратное утверждение, вообще говоря, неверно, поскольку не выполняется, например, для поля стоячих звуковых волн. Более того, однородность не означает изотропности: направления прихода потоков энергии в каждой точке поля равновероятны и средние значения энергии по различным направлениям одинаковы. Критерий нарушения диффузности применительно к обсуждаемой методике — это нарушение в реверберационном поле такого свойства диффузного поля, как отсутствие устойчивой интерференционной картины. В реверберационном поле лабораторного бассейна при любом числе отражений устойчивая интерференция существует, на этом и основана идея метода СКВУ.

Заключение. Созданная методика существенно изменяет общепринятые представления о возможностях метрологических работ в лабораторном гидроакустическом бассейне, позволяет многократно повысить информативность измерительного эксперимента (в сравнении с измерениями на тональных импульсах), получить исчерпывающую модель акустического приемника, по результатам градуировки решить задачу не только верификации, но и валидации приемника [11, 12].

Методика измерений в шумовых реверберационных полях демонстрирует высокие, на уровне первичных эталонов, показатели качества измерений по свободному полю вне зависимости от близости реализуемого в эксперименте реверберационного поля к диффузному. Она позволяет выполнять быстрые измерения по полю в широком диапазоне частот с эталонной точностью и требуемой подробностью по частоте (до практически непрерывных), получать характеристики направленности, амплитудно- и фазочастотные характеристики чувствительности акустических приемников, т. е. в отсутствие безэхового гидроакустического бассейна выполнять измерения как в безэховой камере; существенно расширять частотный диапазон градуировки по полю в гидроакустическом бассейне в сторону низких частот; определять метрологические характеристики приемника по диффузному полю и в полосах частот. Методика обеспечивает одинаковую эффективность исследований приемников как скалярной (звукового давления), так и векторных (градиент звукового давления, колебательная скорость и т. п.) величин акустического поля.

В настоящее время авторы еще не могут представить достаточно данных, чтобы продемонстрировать возможности и ограничения применения методики для метрологических целей в воздушной акустике. Тем не менее, можно ожидать, что для широкого круга рутинных градуировок можно будет ослабить требования к безэховой и реверберационной камерам, значительно упростить и удешевить стоимость метрологических работ.

Среди первоочередных задач по дальнейшему совершенствованию методики измерений можно выделить исследование границ применимости шумового сигнала для градуировки по полю, определение областей преимущественного использования реверберационных полей тонально-импульсного, ЛЧМ- и шумового сигналов, с тем чтобы в обозримое время довести методику измерений по полю в реверберационном поле шумового сигнала до практического применения.

Приведенные результаты экспериментов с шумовым сигналом подтвердили сделанный в [1] вывод о том, что результаты применения метода СКВУ не зависят от способа получения подвергаемой обработке частотной зависимости. Это позволяет относиться к шумовому сигналу не как к случайному в смысле повторяемости результата измерений, а как к одному из видов широкополосного сигнала, пригодного для выполнения метрологических работ в незаглушенном гидроакустическом бассейне. Тонально-импульсный, ЛЧМ и шумовой сигналы образуют набор гармонично дополняющих

друг друга сигналов, что делает актуальным их использование на разных уровнях поверочной схемы от первичных эталонов до рабочих средств измерений.

Л и т е р а т у р а

1. **Исаев А. Е.** Точная градуировка приемников звукового давления в водной среде в условиях свободного поля. Менделеево: Издательство ВНИИФТРИ, 2008.

2. **Исаев А. Е.** Критерий качества реализации условий свободного поля при градуировке гидроакустического приемника в бассейне с отражающими границами // Измерительная техника. 2014. № 5. С. 48—53.

3. **Yi Chen, Isaev A. E., Yuebing Wang, Enyakov A. M., Fei Teng, Matveev A. N.** The COOMET Pilot Comparison 473/RU-a/09: Comparison of hydrophone calibrations in the frequency range 250 Hz to 200 kHz. // Metrologia. Tech. Suppl. 2011. V. 48. 09004.

4. **Исаев А. Е., Матвеев А. Н., Некрич Г. С., Поликарпов А. М.** Комплексная градуировка приемника градиента давления с использованием процедуры метода взаимности // Акустический журнал. 2014. Т. 60. № 1. С. 48—55.

5. **Исаев А. Е., Матвеев А. Н., Некрич Г. С., Поликарпов А. М.** Градуировка приемника градиента давления по полю в отражающем бассейне с применением ЛЧМ сигнала // Акустический журнал. 2013. Т. 59. № 6. С. 773—781.

6. **Исаев А. Е., Матвеев А. Н.** Применение метода скользящего комплексного взвешенного усреднения для восстановления неравномерной частотной характеристики приемника // Акустический журнал. 2010. Т. 56. № 5. С. 651—654.

7. **Исаев А. Е., Матвеев А. Н., Некрич Г. С., Некрич С. Ф., Сильвестров С. В., Черников И. В., Щелкунов А. И., Щерблюк Н. Г.** Государственный первичный специальный эталон единицы звукового давления в водной среде ГЭТ 55—2011 // Измерительная техника. 2013. № 7. С. 3—5.

8. **IEC60565:2006.** Underwater acoustics — Hydrophones — Calibration in the frequency range 0,01 Hz to 1 MHz.

9. **Лопашев Д. З.** Исследование звукового поля в большом измерительном бассейне // Исследования в области акустических и гидроакустических измерений: Труды института Комитета стандартов, мер и измерительных приборов СССР. 1963. Вып. 73(133). С. 31—40.

10. **Исаев А. Е., Черников И. В., Щерблюк Н. Г.** Инновационная технология измерений для градуировки гидроакустических преобразователей в реверберационном поле лабораторного бассейна // Альманах современной метрологии. 2015. № 2. С. 76—102.

11. **Исаев А. Е., Поликарпов А. М.** Проблемы валидации при градуировке приемника подводного шума // Альманах современной метрологии. 2014. № 1. С. 119—160.

12. **Исаев А. Е., Поликарпов А. М., Черников И. В.** Акустические сигналы и поля для метрологических работ в лабораторном гидроакустическом бассейне // Альманах современной метрологии. 2015. № 2. С. 103—132.

Дата принятия 11.03.2015 г.