

УДК 534.6.08 + 519.876

## **ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ «КАЛИБРУЕМОСТИ» И КАЛИБРОВКИ АВТОНОМНОГО РЕГИСТРАТОРА ПОДВОДНОГО ЗВУКА**

**А.Е. Исаев, А.М. Поликарпов**

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл., Россия,  
isaev@vniiftri.ru,  
a\_polikarpov@vniiftri.ru

*Аннотация.* Обсуждаются проблемы калибровки автономного регистратора подводного звука. В большинстве случаев конструкция регистратора не предусматривает его совместимость с эталонной установкой, что препятствует калибровке регистратора с использованием существующей эталонной базы. Создать акустический сигнал, требуемый для тестирования smart-регистратора, невозможно из-за неидеальности излучателя и реверберации звука в звукомерном устройстве эталонной установки. Проблемы калибровки регистратора усугубляет отсутствие стандартов, которые содержали бы требования к характеристикам и конструкции, методы испытаний, поверки и периодической калибровки регистратора. Обсуждаются недостатки использования для калибровки регистратора стандарта МЭК 60565 на калибровку гидрофона. Приводятся сведения о подходе к калибровке, основанном на получении лабораторной модели регистратора, по данным которой рассчитывают чувствительности регистратора применительно к различным измерительным задачам.

*Ключевые слова:* автономный регистратор подводного звука, средство измерений, калибровка, прослеживаемость, совместимость с эталонной установкой, лабораторная модель регистратора.

## **THE PROBLEMS OF PROVIDING CALIBRATION ABILITY AND CALIBRATION OF AUTONOMOUS UNDERWATER SOUND RECORDER**

**A.E. Isaev, A.M. Polikarpov**

FSUE «VNIIFTRI», Mendeleevo, Moscow region, Russia,  
isaev@vniiftri.ru,  
a\_polikarpov@vniiftri.ru

*Annotation.* The problems of calibration of an autonomous underwater sound recorder are discussed. In most cases, the design of the recorder does not provide its compatibility with the reference facility, which prevents the recorder from being calibrated using the existing reference base. It is impossible to create an acoustic signal required for testing a smart recorder because of the projector non-ideality and sound reverberation in the sound-measuring part of the reference facility. Recorder calibration problems are aggravated by the lack of standards that would contain requirements for characteristics and design, test methods, verification and periodic calibration of

*the recorder. The disadvantages of using the IEC 60565 standard on hydrophone calibration for calibration of the recorder are discussed. Information on the approach to recorder calibration based on obtaining of its laboratory model, from which the recorder sensitivity is calculated in relation to various measuring tasks, is given.*

*Key words: autonomous underwater sound recorder, measuring instrument, calibration, traceability, compatibility with the reference installation, laboratory recorder model.*

*«Мы сами знаем, что задача не имеет решения.  
Но мы хотим знать, как её решать».  
Аркадий и Борис Стругацкие*

Приёмники звука не исчерпываются хорошо знакомыми всем микрофонами и могут быть очень специфическими. Например, искусственное ухо предназначено для работы с головным телефоном и больше ни для чего. Назначение приёмника определяет его конструкцию и тип приёма звука. Приёмники звука могут использоваться как для измерений, так и для других целей, например микрофон в телефонной трубке. Если обычный ненаправленный бытовой микрофон прикрепить к сферическому отражателю, получим направленный микрофон, который орнитологи используют для записи голосов птиц.

К приёмникам, предназначенным для измерений, предъявляются особые требования. Первое из них — стабильность характеристик. Стабильность требует подтверждения. То есть характеристики приёмника должны измеряться, а для этого сам приёмник должен обладать возможностью его калибровки, то есть быть калибруемым.

В гидроакустике гидрофон применяют как для прослушивания подводных звуков, так и для измерений. Если прослушиваемый звук — крик кита (биологи используют термин «вокализация»), то основное требование к гидрофону — выделить вокализацию на фоне шума. Однако если необходимо узнать спектр вокализации, к гидрофону предъявляют требование равномерности частотной характеристики. Такой приёмник ещё не средство измерений (СИ), но его конструкция должна позволять определить его частотную характеристику, то есть этот приёмник должен быть калибруемым.

Обычно калибровку связывают с прослеживаемостью к эталонам. Однако поведение частотной характеристики микрофона можно определить методом актюатора (электростатического возбудителя), при этом чувствительность микрофона останется неизвестной. Метод актюатора можно использовать не для любого микрофона, то есть возможность даже такой «сокращённой» калибровки предъявляет определённые требования к конструкции приёмника.

К сожалению, эти простые истины, очевидные для метрологов, далеко не всегда очевидны для разработчиков приёмников звука [1, 2].

В последнее время для записи различных подводных звуков широкое распространение получили автономные рекордеры, состоящие из гидрофона и записывающего устройства. Чтобы количественно сопоставить данные, полученные разными рекордерами, необходимо знать характеристики рекордеров, то есть уметь определять численные значения этих характеристик. По сути, это та же калибровка СИ. При этом возникают те же самые проблемы: зная характеристики гидрофона, нельзя утверждать, что такие же характеристики имеет и рекордер. Чтобы получить характеристики рекордера, конструкция рекордера должна обеспечивать возможность его калибровки в том виде, как его погружают в море.

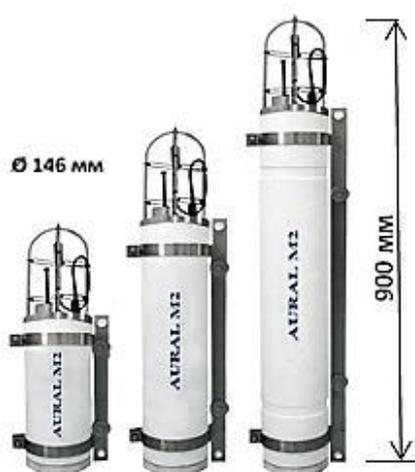


Рис. 1. Гидроакустические рекордеры типа AURAL M2

Для СИ обязательным является обеспечение возможности его калибровки с использованием эталонной базы. Регистраторы подводного звука создают для записи шума моря в течение продолжительного времени, но не как СИ подводного звука. При таком подходе рекордер — «чёрный ящик», на входе которого акустический сигнал, а на выходе — цифровая запись акустического сигнала, обработанного электронными устройствами рекордера (рис. 1). При попытке откалибровать «чёрный ящик» возникают проблемы его совместимости с эталонной установкой [2, 3]:

- отсутствует возможность подавать на вход рекордера электрический сигнал через эквивалент гидрофона;
- отсутствует возможность получать сигнал гидрофона во время выполнения измерений;

- отсутствует возможность обнаружить факт перегрузки регистрирующего тракта рекордера либо искажения сигнала вследствие малого отношения сигнал/шум;
- если выходной сигнал доступен только в цифровой форме, рекордер должен иметь возможность синхронизации с эталонной установкой, а формат цифрового сигнала должен допускать обработку на эталонной установке.

Отсутствие возможности подавать на вход рекордера электрический сигнал через эквивалент гидрофона привело в NPL (Великобритания) к необходимости создать для калибровки рекордеров на частотах  $\leq 1$  кГц установку, изображённую на рис. 2а [4]. Звукоприёмную часть рекордера (гидрофон) помещают в заполненную воздухом камеру малого объёма 1, тестовый сигнал создают миниатюрным громкоговорителем 2, измерения выполняют сравнением с опорным микрофоном 3. Установка позволяет получить приемлемые для практики результаты, если чувствительность рекордера мало меняется с частотой (см. зависимости на рис. 2б). Если рекордер имеет встроенные октавные или третьоктавные фильтры, параметры тестовых сигналов должны задаваться и контролироваться с гораздо большей точностью, чем это возможно для акустических сигналов.

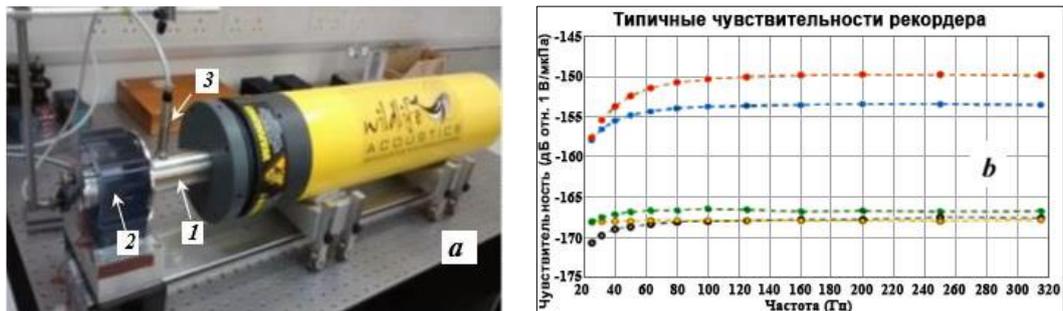


Рис. 2. Установка для низкочастотной калибровки рекордера (а), зависимости чувствительности на низких частотах (б) (NPL, Великобритания)

Если частотная зависимость чувствительности гидрофона известна, а сам гидрофон может быть отсоединён от рекордера, измерения частотной характеристики рекордера на низких частотах могут быть выполнены значительно проще. В этой ситуации целесообразно применить хорошо зарекомендовавший себя на практике метод замещения напряжения, при котором сигнал на электрический вход рекордера подаётся через гидрофон или его электрический эквивалент — конденсатор, ёмкость которого равна ёмкости гидрофона (см. схему на рис. 3).

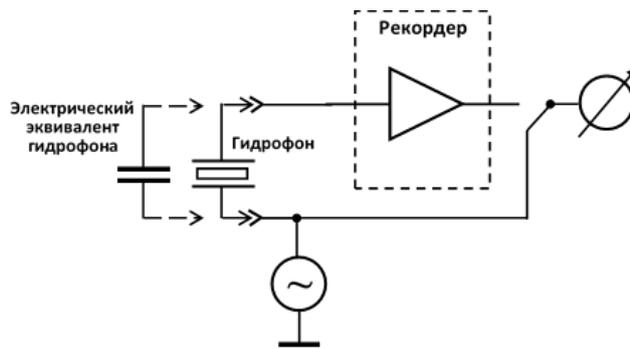


Рис. 3. Схема измерений при калибровке методом замещения напряжения

Современные smart-рекордеры вместо самого сигнала выдают оценки измеряемого параметра сигнала. Чтобы проверить правильность выходных данных, такой рекордер необходимо тестировать разнообразными сигналами. В большинстве случаев требуемый акустический сигнал создать невозможно из-за неидеальности излучателя и реверберации звука в звукомерном устройстве эталонной установки.

Рекордер должен обеспечивать возможность его калибровки методами, реализуемыми эталонной установкой. Например, если в эталоне используют тонально-импульсный метод измерений, то рекордер должен обеспечивать процедуру измерений тонально-импульсным методом, включая алгоритм стробирования, который с высокой точностью обеспечивает синхронизацию с эталонной установкой.

Аналогичные проблемы возникают при калибровке воздушных шумомеров, но для них найдены приемлемые решения, которые закреплены в стандартах. Одно из принципиальных решений — обязательные требования к конструкции шумомера, обеспечивающие его калибровку рациональным сочетанием акустических и электрических сигналов. Например, должна быть обеспечена возможность подавать на вход шумомера сигнал через электрический эквивалент первичного преобразователя.

Обеспечение совместимости с эталонной установкой не исчерпывает проблем калибровки рекордера. До настоящего времени не создан стандарт на калибровку рекордера. В отсутствие стандарта при калибровке рекордеров используют стандарт на калибровку гидрофона МЭК 60565. При этом в качестве чувствительности рекордера используют чувствительность гидрофона по свободному полю. Покажем, к чему приводит такой подход.

На рис. 4 изображена частотная характеристика рекордера AURAL M2, измеренная в NPL (Великобритания) [5]. Рядом 1 показана чувствительность рекордера по полю, измеренная в бассейне тонально-импульсным методом. Ряд 2 показывает частотную характеристику чувствительности гидрофона рекордера, причём на частотах ниже 1 кГц чувствительность измерена

по давлению в камере малого объёма. Кривая ряда 2 в окрестности частоты 1 кГц не имеет значительных изменений, что объясняется малым рассеянием звука на корпусе гидрофона. Рассеяние на корпусе рекордера обуславливает значительную изрезанность его частотной характеристики чувствительности. Неравномерность частотной характеристики рекордера многократно превосходит допустимую погрешность измерений. Кроме того, поведение частотной характеристики на частотах вблизи 1 кГц показывает, что тонально-импульсный метод мало пригоден для калибровки таких приёмников звука. Чтобы получить частотную характеристику рекордера во всём диапазоне частот, на низких частотах вынужденно используют значения ряда 2. При этом на частоте 1 кГц образуется разрыв, который свидетельствует о том, что либо значения ряда 1, либо значения ряда 2, либо значения обоих рядов вблизи частоты 1 кГц измерены некорректно. Измерения по давлению в камере малого объёма не могут учитывать влияние рассеяния звука корпусом рекордера хотя бы потому, что в камеру можно поместить только гидрофон. Результаты измерений по полю тонально-импульсным методом не согласуются с законами акустики — рассеяние уменьшается с увеличением длины волны. Наиболее вероятное объяснение — в окрестности частоты 1 кГц и тот и другой методы имеют большую погрешность.

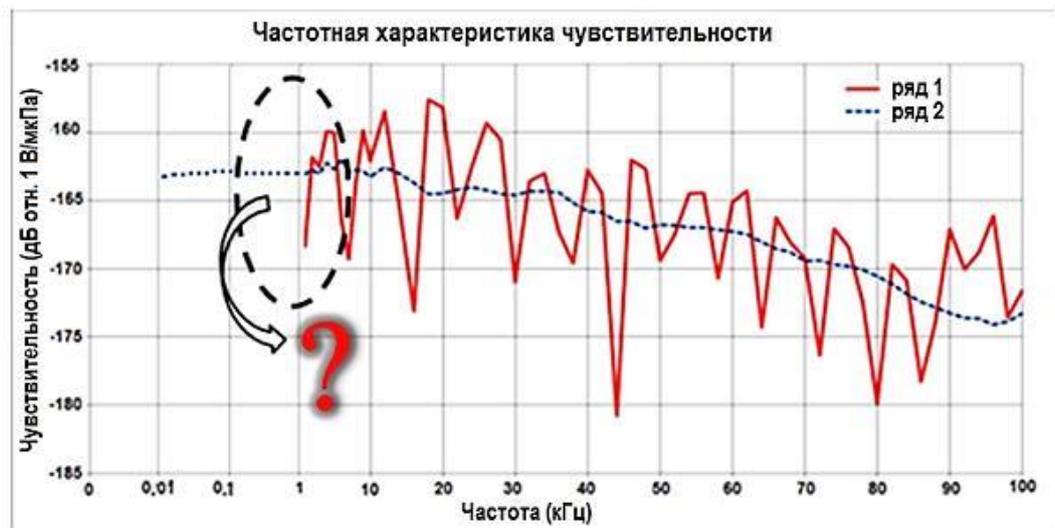


Рис. 4. Частотные характеристики чувствительности: ряд 1 — рекордера; ряд 2 — гидрофона (NPL, Великобритания)

Обратим внимание на существенный аспект калибровки. Рекордер, который предназначен для измерений шумов в полосах частот, был откалиброван на гармонических сигналах. Налицо несоответствие измеряемых сигналов

сигналам при калибровке. Это порождает проблему: какое значение чувствительности использовать при вычислении уровня шума в частотной полосе. Вариант использования центральной частоты полосы частот явно некорректен, поскольку в пределах полосы частот чувствительность (см. ряд 1) изменяется значительно.

Поскольку у объекта, рассеивающего звук, частотная характеристика и характеристика направленности взаимосвязаны, характеристики направленности рекордера также далеки от идеальных, что показывают зависимости на рис. 5 [5]. Если по представленным данным попытаться оценить погрешность рекордера, то к неравномерности частотной характеристики прибавится не меньшая неравномерность характеристики направленности.

Эти проблемы отсутствуют для гидрофона, поскольку у него частотная характеристика и характеристика направленности близки к идеальным.

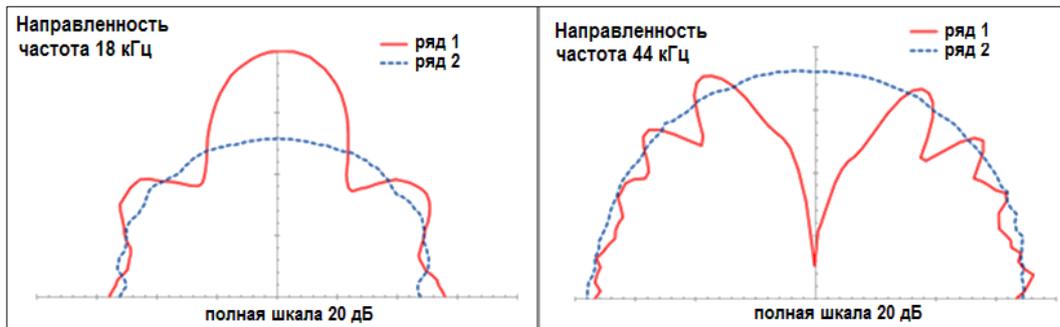


Рис. 5. Характеристики направленности: ряд 1 — рекордера; ряд 2 — гидрофона (NPL, Великобритания)

Причины большой погрешности рекордера AURAL — плохие акустические свойства конструкции рекордера и применённое к рекордеру определение чувствительности, не подходящее для приёмников с большим рассеянием звука на корпусе. Акустическое качество рекордера можно улучшить, используя приёмы, известные в воздушной акустике.

В стандарте МЭК 69565 чувствительность гидрофона определена как отношение выходного напряжения к звуковому давлению в плоской бегущей волне при следующих условиях: бегущая волна заданной частоты падает на гидрофон с опорного направления. Это определение прекрасно работает при эталонных измерениях в бассейне. Однако при использовании рекордера в море неравномерность диаграммы направленности становится одной из составляющих погрешности, поскольку направление на источник звука либо неизвестно, либо звук поступает со многих направлений.

Попыткой решения этих проблем стал разработанный ВНИИФТРИ метод измерений частотных характеристик чувствительности приёмника при излучении в отражающем звук бассейне продолжительных сигналов с распределённой в полосе частот мощностью. Метод основан на технике СКВУ [6–8] и позволяет выполнять измерения по полю в бассейне, начиная с сотен герц, на которых влияние дифракции звуковой волны на приёмнике становится пренебрежимо малым. На рис. 6 представлены частотные зависимости чувствительности массогабаритной модели рекордера, полученные с использованием техники СКВУ при различных углах падения звуковой волны. В отличие от частотной зависимости на рис. 4 зависимости на рис. 6 не имеют разрывов и резких скачков ни на высоких, ни на «сверхнизких» для бассейна частотах. Чувствительность плавно изменяется как при изменении частоты, так и при изменении угла падения звуковой волны. Поведение подробных частотных зависимостей на частотах выше 3 кГц согласуется с данными NRL, однако плавное изменение частотных зависимостей позволяет показать их закономерный характер, расхождение зависимостей уменьшается с уменьшением частоты, и на частоте 250 Гц зависимости сходятся к чувствительности гидрофона. Такое поведение чувствительности на низких частотах характерно для акустических приёмников с микрофоном, вынесенным из корпуса. Как правило, с уменьшением частоты влияние дифракционных эффектов уменьшается, что следует из общих законов акустики.

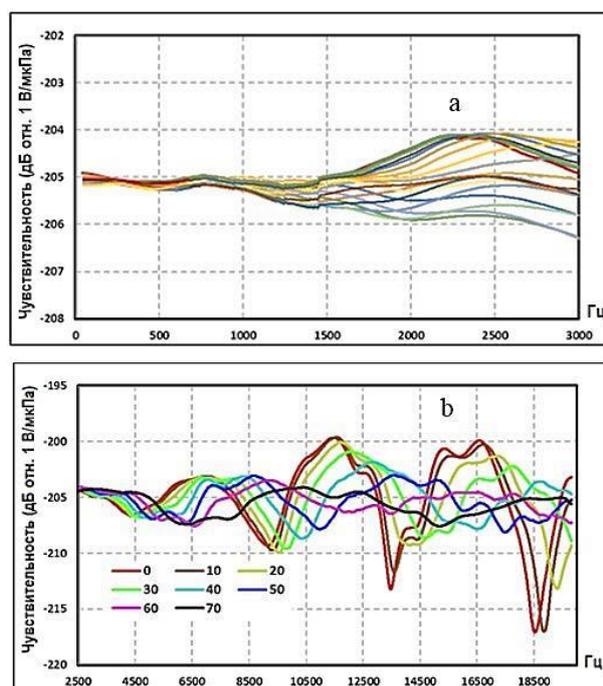


Рис. 6. Частотные зависимости чувствительности массогабаритной модели рекордера на низких (а) и высоких (б) частотах (ФГУП «ВНИИФТРИ»)

В результате применения метода получают лабораторную модель приёмника звука [6, 9, 10], которая представляет собой набор подробных частотных характеристик чувствительности, измеренных при различных углах падения звука на приёмник. Большое количество данных, содержащихся в такой модели, приближает её к полной динамической характеристике приёмника. Модель названа лабораторной, поскольку в непосредственном виде данные, содержащиеся в этой модели, могут быть использованы при измерениях в лабораторных условиях. Однако, используя модель, можно получать значения чувствительности для различных измерительных задач. Например, чтобы получить чувствительность приёмника для измерений шума в 1/3-октавной полосе с заданного направления, можно выполнить энергетическое усреднение в этой полосе подробной частотной характеристики, измеренной при падении звука с этого направления [9]. Аналогично при измерении шума в угловом секторе энергетическим усреднением можно вычислить чувствительность в этом секторе.

Предложенные энергетические чувствительности обладают ещё одним полезным свойством: кроме их адекватности задаче измерения шума в полосе частот, они в ряде случаев позволяют резко сократить расстояния дальнего поля при калибровке.

### **Заключение**

При создании рекордера подводного звука на этапе составления технического задания следует определиться с его назначением: будет он СИ или регистратором. Как СИ рекордеры должны гарантировать единообразие измеряемых параметров и сопоставимость результатов измерений. Создавать измеритель подводного звука необходимо на основе международных стандартов, которые ещё предстоит создать и которые, подобно стандартам на воздушные шумомеры, должны содержать требования к характеристикам и конструкции, методы испытаний с нормированными неопределённостями, методы поверки и периодической калибровки. Конструкция рекордера должна не только обеспечивать его совместимость с эталонной установкой, но и удовлетворять специфическим требованиям, обусловленным особенностью условий его эксплуатации (например, меры по уменьшению шумов обтекания, меры, препятствующие обрастанию рекордера морскими организмами, что нарушает его акустические свойства и стабильность характеристик, и т.п.).

Критерием при формировании набора параметров, измеряемых воздушным шумомером, являлась их адекватность для оценивания вредного воздействия звука на человека. Сегодня осознаны важность и острая потребность в стандартизации измерений подводного звука, которая составит основу для обеспечения сопоставимости результатов исследований, предоставит информацию

о критериях звукового воздействия на морских обитателей, а также руководящие принципы по калибровке рекордеров, сбору и представлению данных, имеющих значимость для морской биологии. В настоящее время набор параметров для оценки негативного воздействия звука на различные виды рыб, млекопитающих и других обитателей моря только формируется. В качестве таковых рассматриваются параметры, существенно отличающиеся от используемых в воздушной акустике, например, звуковой «щелчок» и звуковой «рывок» частиц водной среды [10].

Сегодня, в отсутствие стандартизованного набора параметров, подводный звук характеризуют параметрами, аналогичными тем, с которых начинали измерения шума в воздушной акустике: среднеквадратическое и пиковое значения, энергия шума в полосе частот фильтра и т.п. Оценка каждого из таких параметров представляет самостоятельную задачу, для решения которой следует использовать специальным образом определённую чувствительность приёмника. Получение лабораторной модели рекордера и подходы к расчёту по этой модели чувствительности применительно к некоторым измерительным задачам рассмотрены в [6, 9, 11–12].

#### Список литературы

1. Martinez J.J., Deng Z., Myers J.R., Rohrer J.S., Carlson T.J., Caviggia K.A. Design and Implementation of an Underwater Sound Recording Device // Prepared for the U.S. Department of Energy under Contract DE-AC05-76RL01830. — Richland, Washington: Pacific Northwest National Laboratory, 2011.
2. Исаев А.Е., Николаенко А.С., Поликарпов А.М. Калибровка рекордера подводного звука и вопросы прослеживаемости создаваемых средств измерений к первичным эталонам // Альманах современной метрологии. — 2019. — № 1 (17). — С. 94–108.
3. Hayman G., Robinson S.P., Lepper P.A. Calibration and characterization of autonomous recorders used in the measurement of underwater noise // *Advances in Experimental Medicine and Biology*. — 2015. — DOI: 10.1007/978-1-4939-2981-8\_52.
4. Buogo S., Can Çorakçı A. et al. Underwater acoustic calibration standards for frequencies below 1 kHz: current status of EMPIR “UNAC-LOW” project // *IMEKO International Conference on Metrology for the Sea*. — Naples, Italy, October 11–13, 2017.
5. Hayman G., Robinson S., Lepper P. Methodologies for the calibration and characterization of autonomous underwater recorders // 40<sup>th</sup> Anniversary conference. — Birmingham, UK: Institute of Acoustics, 2014.
6. Исаев А.Е., Николаенко А.С. Лабораторная калибровка гидроакустического приёмника по полю на низких частотах // *Измерительная техника*. — 2018. — № 01. — С. 54–59.

7. Исаев А.Е. Точная градуировка приёмников звукового давления в водной среде в условиях свободного поля: монография / Под ред. П.А. Красовского. — Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2008. — 369 с.
8. 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.
9. Исаев А.Е., Николаенко А.С., Поликарпов А.М. Чувствительность приёмника при измерениях подводного шума // *Измерительная техника*. — 2018. — № 09. — С. 61–65.
10. Interim Best Practice Guide for Underwater Particle Motion Measurement for Biological Applications. Document number XX // Technical report by Exeter University for the IOGP Marine Sound and Life Joint Industry Programme. — 2020.
11. Исаев А.Е., Николаенко А.С. Калибровка в лабораторном бассейне регистратора с вынесенным гидрофоном // *Измерительная техника* — 2018. — № 07. — С. 62–65.
12. Исаев А.Е., Николаенко А.С., Поликарпов А.М. Экспериментальные исследования массогабаритной модели рекордера // *Альманах современной метрологии*. — 2019. — № 4 (20). — С. 54–122.

*Статья поступила в редакцию: 09.03.2021 г.*

*Статья прошла рецензирование: 22.03.2021 г.*

*Статья принята в работу: 01.04.2021 г.*