

УДК 534.6.08

О РОЛИ СЛИЧЕНИЙ В СОВЕРШЕНСТВОВАНИИ ГЭТ 55

А.Е. Исаев, А.М. Поликарпов

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл.

isaev@vniiftri.ru,

a_polikarpov@vniiftri.ru

Обсуждаются цели, задачи и особенности международных и ключевых сличений ГПЭ ГЭТ 55, выполненных начиная со времени ввода эталона в эксплуатацию. На примере ГЭТ 55 рассмотрены проблемные ситуации, которые могут возникать при проведении международных сличений, и подходы к их разрешению. Уделено внимание результатам как самих сличений, так и исследований, выполненных при подготовке к ним, а также возможностям, которые предоставили международные сличения для совершенствования ГПЭ.

Ключевые слова: эталон, ключевые сличения, исследование, совершенствование, гидрофоны, цифровая техника, источники погрешностей, бюджет неопределённостей, калибровка.

ABOUT THE ROLE OF COMPARISONS IN GET 55 IMPROVEMENT

A.E. Isaev, A.M. Polikarpov

FSUE "VNIIFTRI", Mendeleevo, Moscow region

isaev@vniiftri.ru

a_polikarpov@vniiftri.ru

The goals, tasks and features of the international and key comparisons of the SPS GET 55, made since putting the standard into operation, are discussed. Using the example of the GET 55, problem situations that may arise during international comparisons and approaches to their resolution are considered. Attention is paid to the results of both the comparisons themselves and the studies carried out during preparation for them, as well as the opportunities provided by international comparisons to improve the SPS.

Key words: standard, key comparisons, research, improvement, hydrophones, digital equipment, sources of errors, uncertainty budget, calibration.

«Надо же думать, что понимать...»

В.С. Черномырдин

В соответствии с законом «Об обеспечении единства измерений» сличение эталонов единиц величин — «совокупность операций, устанавливающих соотношение между единицами величин, воспроизводимых эталонами единиц величин одного уровня точности и в одинаковых условиях...». Кроме установления соотношения воспроизводимых величин, сличения помогают

Альманах современной метрологии, 2019, № 3 (19)

решить ряд других метрологических задач. Постараемся показать это на примере сличений, выполненных с участием ГЭТ 55. В силу особенностей акустических эталонов сличают не меры (например, калибраторы звукового давления), а результаты калибровок эталонных приёмников звукового давления. Происходит это потому, что, как правило, эталон — громоздкое и нетранспортабельное средство измерений. При сличениях вынуждены использовать техническое средство, которое может быть перевезено и позволяет установить соотношение единиц. Акустикам «повезло», поскольку в эталонах реализованы измерения методом взаимности, результатом которых является чувствительность приёмника звукового давления — достаточно стабильного и малогабаритного технического средства (гидрофон либо микрофон), которое и путешествует во время сличений.

Наиболее статусными являются ключевые сличения МКМВ. Цель ключевых сличений — установление опорного значения величины по значениям, материализованным в эталонах участников этих сличений. Разность между опорным значением и значением, воспроизводимым эталоном, можно использовать как поправку. Ключевое сличение МКМВ — довольно редкое событие, к участию в котором может быть допущен только эталон, подтвердивший свои высокие метрологические свойства. Дело в том, что опорное значение определяют по результатам, представленным участниками. Неточный результат одного из участников может исказить опорное значение, и вместо установления наиболее точного значения величины придётся искать причину расхождений. Если причину удаётся обнаружить, то неудовлетворительные результаты исключают при вычислении опорного значения. Если причина не установлена, сличения будут признаны несостоявшимися. Избежать такой ситуации позволяет тщательный отбор участников, например, с помощью пилотных сличений. Постоянное совершенствование эталона и поддержание его высокого уровня, подтверждённого систематическими международными сличениями, является обязательным условием допуска к ключевым сличениям МКМВ.

Диалектическое противоречие работ на эталоне — обеспечение его стабильности и, на этой основе, совершенствование метрологических характеристик и расширение возможностей эталона. Результаты работ по совершенствованию эталона должны быть подтверждены независимыми методами с помощью пилотных и дополнительных сличений.

Первые международные сличения

Первые международные сличения созданного во ВНИИФТРИ под руководством А.Н. Голенкова Государственного специального первичного эталона единицы звукового давления в водной среде (ГЭТ 55) были выпол-

нены в 1965–1968 гг. В то время ещё не были сформулированы определения таких понятий, как степень эквивалентности эталона, опорное значение величины и др. Качество результатов сличений оценивали сравнением близости результатов калибровок и заявленных погрешностей эталонов. По результатам сличений лаборатория ВНИИФТРИ вошла в число лидирующих в области гидроакустических измерений.

На первых сличениях решалась задача подтверждения правильности технической реализации первичных методов калибровки гидрофонов, включая степень соответствия свойств пьезоэлектрического гидрофона (линейность, пассивность, обратимость) допущениям, положенным в основу измерений по методу взаимности. Разработанные во ВНИИФТРИ технологии позволили создать эталонные гидрофоны с требуемыми свойствами.

Своеобразие ситуации, продиктованной существовавшей в то время геополитической обстановкой, проявилось в том, что для создателей эталона более важной была близость не к «средним по больнице» значениям, а к значениям, представленным лабораторией США. Большие усилия США по совершенствованию подводного флота требовали совершенную систему метрологического обеспечения гидроакустических измерений, во главе которой должен быть точный эталон.

Региональные сличения

Следующие международные сличения были проведены через 30 лет в 1998–1999 гг. Их необходимость была продиктована тем, что была создана система взаимного признания национальных измерительных эталонов и сертификатов калибровки и измерений, выдаваемых национальными метрологическими институтами, которая потребовала устанавливать степени эквивалентности национальных эталонов с помощью ключевых сличений МКМВ.

Чтобы быть допущенными к ключевым сличениям, необходимо было подтвердить уровень эталона, приняв участие в региональных сличениях [1, 2]. За годы, прошедшие между сличениями, ГЭТ 55 не только хранил и передавал единицу, но был усовершенствован в результате двух глубоких модернизаций. В эталоне появилась автоматизированная система прецизионного позиционирования преобразователей, и был осуществлён переход на цифровую технику. Преимущества цифровой техники удалось использовать на региональном сличении, а новые приёмы измерений, опирающиеся на возможности системы позиционирования, удалось реализовать на ключевых сличениях МКМВ.

Традиционно повышения отношения сигнал/шум достигают, следуя постулату: чем уже полоса частот, тем выше отношение сигнал/шум. Это правило замечательно действует для тонального сигнала, но имеет принци-

пиальные недостатки при приёме импульсного сигнала. Использование узкополосного фильтра на высоких частотах существенно улучшает отношение сигнал/шум. Однако продолжительный переходной процесс в узкополосном фильтре не позволяет его использовать для измерений низкочастотного тонального импульса. Размеры бассейна ВНИИФТРИ и время реверберации в нем определяют параметры излучаемого тонального импульса: период повторения — не менее 1 с, длительность — не более 4 мс. При таких условиях крайне затруднительно реализовать оптимальную фильтрацию с помощью аналогового гребенчатого фильтра. Применение цифровой техники дало возможность применить другой приём: когерентное накопление серии синхронизированных тональных импульсов, что позволило применить адаптивный к помеховой обстановке алгоритм подавления случайной помехи. При этом узкополосный приём был заменён на широкополосный, при котором не только резко уменьшаются искажения переходным процессом в приёмнике, но и становится возможным наблюдать и оценивать детали формы принятого сигнала [3, 4]. Это позволяет более точно выделять установившуюся часть принятого сигнала, разработать методы исключения перекрёстной помехи, само существование которой было трудно обнаружить при узкополосном приёме. Благодаря применению цифровых методов оценки амплитуды сигнала по пиковому значению заменили гораздо более помехоустойчивой оценкой по методу наименьших квадратов. В результате удалось уменьшить доминирующие источники погрешностей, уточнить бюджет неопределённостей и подтвердить его на сличениях. Главным результатом успешно выполненных сличений можно считать приглашение ВНИИФТРИ к участию в первых в области гидроакустических измерений ключевых сличениях МКМВ.

Другим результатом сличений стала возможность сравнительного анализа бюджетов неопределённостей. Использование первичного эталона в рамках национальной поверочной схемы не даёт такой возможности, поскольку все измерения зависимы, потому что основаны на результатах, полученных на первичном эталоне. Международные сличения позволяют сравнивать результаты измерений и бюджеты неопределённостей, полученные независимо. Сравнительный анализ даёт объективную оценку преимуществ и недостатков собственного эталона. Если какая-либо из составляющих бюджета меньше, чем у других участников (например, обусловленная перекрёстной помехой), то это демонстрирует достоинства эталона. Если больше или вообще не учтена — это недостаток эталона и одновременно направление усилий по его совершенствованию. В такой ситуации опыт участников показывает как саму возможность, так и пределы уменьшения этой составляющей неопределённости, а иногда подсказывает способ решения задачи.

Первые ключевые сличения МКМВ

В различных областях измерений опыт проведения сличений различается весьма значительно. Например, воздушную акустику отличает высокая степень унификации как эталонных микрофонов, так и установок для калибровки, на протяжении многих лет регулярно проводятся международные сличения различного уровня. Следствием этого стало доведённое до деталей единообразие в понимании объекта измерений и измеряемых при сличениях параметров. В подводной акустике, в силу специфики этой области измерений, сличения проводят значительно реже, эталонный гидрофон сличений не стандартизован, эталонные установки в большой степени различаются как по техническим характеристикам, так и по исполнению. Например, калибровки выполняют и в баке, и в бассейне, и в озере. Поэтому при сличениях гораздо труднее согласовать их регламент, а иногда возникают совершенно неожиданные вопросы.

Например, при обсуждении Технического протокола первых ключевых сличений МКМВ результатов калибровок гидрофонов в диапазоне частот 1–500 кГц (ССАUV.W K1 2000–2003 гг.) возник вопрос: «Что такое гидрофон?». Сразу оговоримся, что всем участникам были хорошо известны формулировки определений гидрофона и его чувствительности, приведённые в словаре МЭК. Однако выполненные во ВНИИФТРИ исследования показали, что эти определения нуждаются в уточнении, по крайней мере, применительно к сличениям.

Применённая в ГЭТ 55 автоматизированная система прецизионного позиционирования преобразователей позволила изменять расстояние между излучателем и приёмником в процессе измерений в больших пределах с точно известным и мелким шагом. Усовершенствованные системы приёма и позиционирования позволили получать детальные зависимости, которые обычно используют для определения расстояния дальнего поля при калибровке гидрофона. На этих зависимостях были выявлены осцилляции, характер которых зависел от конструкций корпуса и крепления гидрофона. В результате исследований было выяснено, что наличие, размах и период этих осцилляций определяются наличием, силой и расстоянием от источника рассеяния падающей на гидрофон звуковой волны до чувствительного элемента гидрофона. Конструкция современного гидрофона хорошо отработана, и рассеяние звука на его корпусе слабо влияет на результаты рутинных калибровок, однако это влияние необходимо учитывать при выполнении международных сличений, что и показали результаты первых ключевых сличений МКМВ. Это приводит к необходимости пересмотра определений гидрофона и его чувствительности при сличениях: гидрофон — это только активный (чувствительный) элемент и его акустический центр, активный элемент и источники рассеяния на корпусе гидрофона, активный элемент и источники рассеяния на корпусе и креплении гидрофона.

Другие участники сличений не обратили внимания на эффекты, связанные с рассеянием. На вопрос «что такое гидрофон?» пилотная лаборатория закономерно дала ответ, на первый взгляд, неожиданный, но на самом деле продиктованный сложившейся ситуацией: «Гидрофоном следует считать то, что Вы извлекли из упаковки». Это определение и было принято в качестве рабочего определения гидрофона для сличений.

При ключевых сличениях в качестве опорной величины выбирают такую, которая обеспечивает наилучшие показатели стабильности, повторяемости и воспроизводимости. Для гидрофона предстоит выбрать такую величину и в соответствии с этим выбором дать определение гидрофона и его чувствительности. Эти исследования до сих пор не завершены, однако удалось стандартизовать крепление гидрофона. Тем самым можно уменьшить расхождение результатов калибровок при сличениях, но одновременно это увеличивает расстояние дальнего поля, то есть необходимые размеры бассейна.

Вкладом ВНИИФТРИ в решение задачи выбора опорной величины стала предложенная модифицированная процедура калибровки по полю методом взаимности [5]. Эта процедура была разработана на основе применения методов акустической голографии и позволяет определять чувствительность активного элемента с учётом рассеяния звуковой волны корпусом и креплением гидрофона.

В левой (а) и правой (б) частях рисунков 1–3 точками пересечения лучей и графиками показаны наличие, положение и сила источников рассеяния на корпусе и креплении гидрофона на разных частотах.

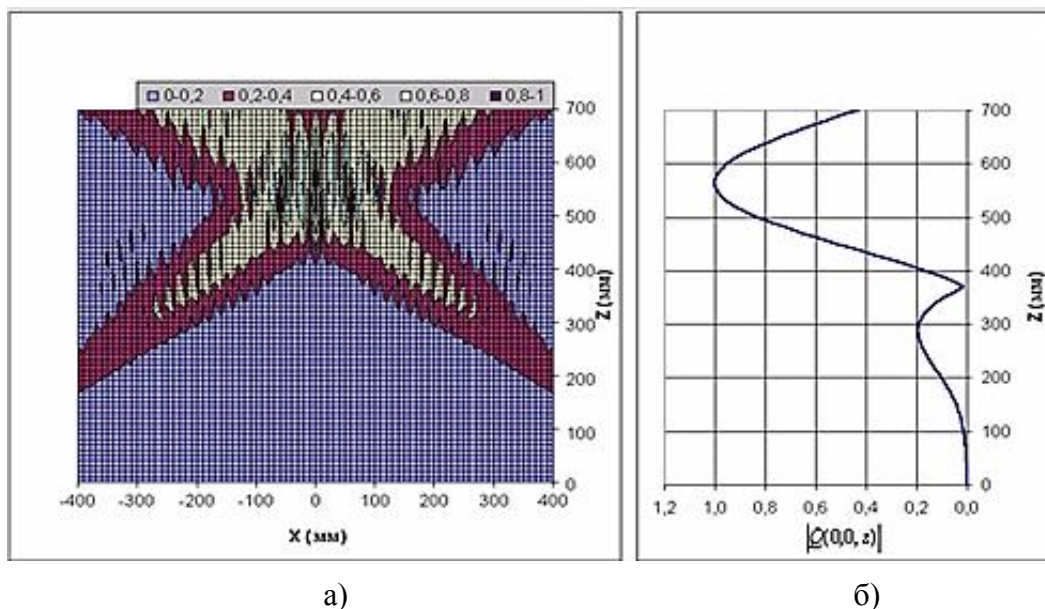


Рис. 1. Изображение источника рассеяния на креплении гидрофона на частоте 40 кГц

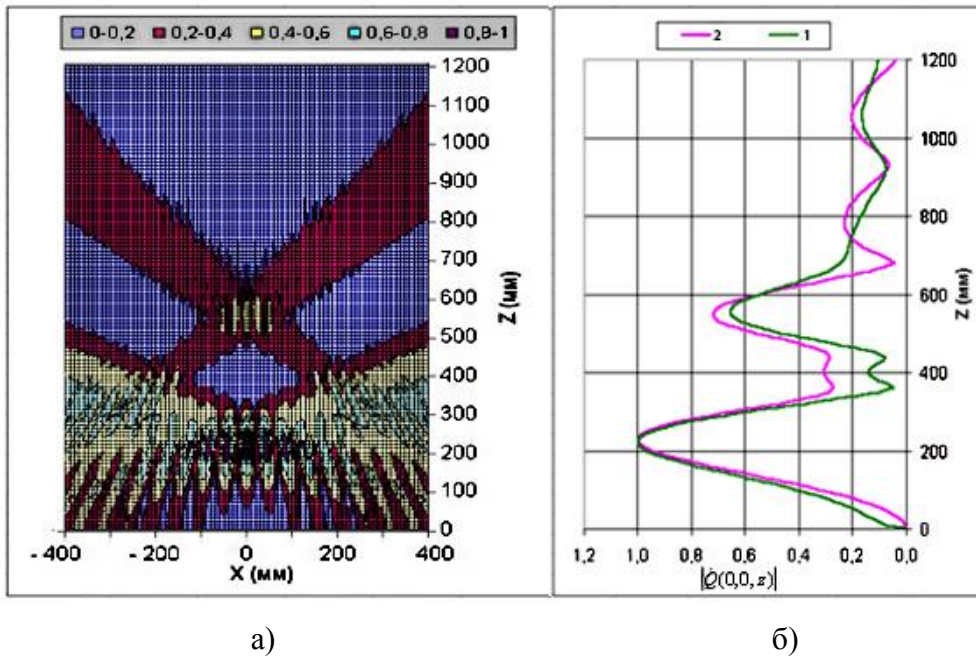


Рис. 2. Изображения источников рассеяния на корпусе и креплении гидрофона на частоте 60 кГц с использованием взвешивающего (1) и прямоугольного (2) окон

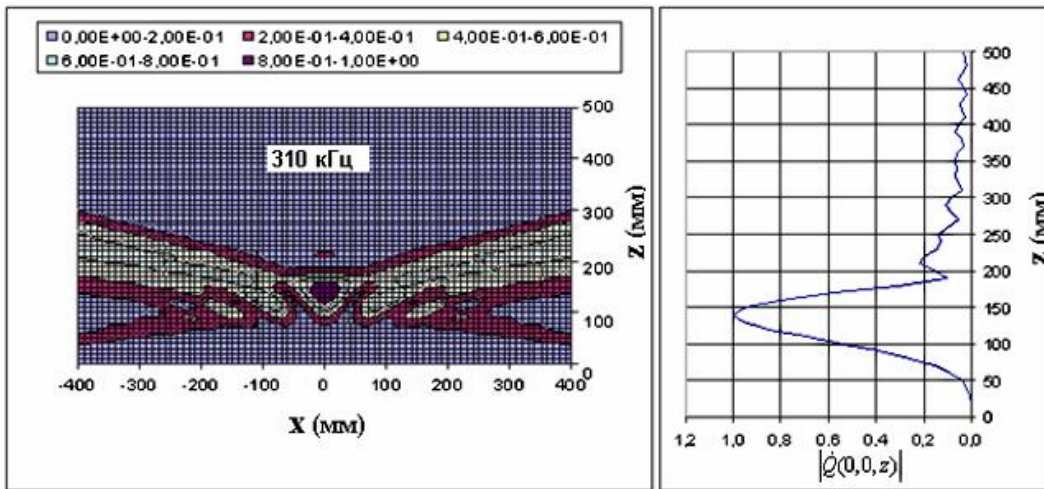


Рис. 3. Изображение источника рассеяния на корпусе гидрофона на частоте 310 кГц

Используя эту информацию, можно вычислить чувствительность активного элемента гидрофона, чувствительность гидрофона с учётом рассеяния на корпусе и чувствительность гидрофона с учётом рассеяния на корпусе и креплении. Чувствительность активного элемента обеспечивает наилучшие показатели стабильности, повторяемости и воспроизводимости. Чувстви-

тельность гидрофона с учётом рассеяния на корпусе соответствует тому рабочему определению гидрофона, которое использовали на первых ключевых сличениях.

Чувствительность гидрофона с учётом рассеяния на корпусе и креплении соответствует использованию на сличениях стандартизованного крепления гидрофона. Решение использовать стандартное крепление стало первым шагом по стандартизации характеристик гидрофона, используемого при сличениях, как это сделано в воздушной акустике. Другим последствием решения стало признание влияния рассеяния на чувствительность гидрофона не только при сличениях, но и во всех условиях его применения: гидрофон при калибровке, гидрофон в составе приёмной системы, гидрофон в обтекателе рекордера подводного звука и т.д.

Значения заявленных участниками стандартных неопределённостей измерений приведены в таблице 1.

Таблица 1

Неопр. ($k = 1$)	NPL Велико- британия	PTB Герма- ния	URSD-NIST США	ВНИИФТРИ Россия	NIM КНР	DRDC Канада	CSIR ЮАР
%	2.5–3.9	5.0	2.0–4.6	2.2–3.5	2.7–4.1	3.6–6.3	5.9–28.8
дБ	0.21–0.33	0.43	0.18–0.39	0.19–0.30	0.23–0.35	0.31–0.53	0.5–2.2

Выполненные исследования позволили ВНИИФТРИ:

- формализовать измеряемый параметр (чувствительность) вне зависимости от конструкции гидрофона, силы и положения источников рассеяния;
- исключать из рассмотрения составляющую неопределённости измерений, обусловленную свойствами гидрофона, который не входит в состав сличаемых эталонных установок;
- преодолеть неоднозначность того, что следует понимать под гидрофоном, чувствительность которого измеряется при сличениях: активный элемент, активный элемент и корпус гидрофона, часть либо всю конструкцию, объединяющую в себе гидрофон, подводный узел позиционирующего устройства эталона и элемент крепления гидрофона;
- обосновать и подтвердить бюджет составляющих неопределённости калибровки гидрофонов по полю с наименьшей среди участников ключевых сличений стандартной расширенной неопределённостью [6].

Сличения в области низких частот

В описанных сличениях выполняли калибровки гидрофонов по полю, при этом нижняя граница диапазона частот у разных лабораторий составляла

от 1 до 3 кГц. На низких частотах вместо чувствительности гидрофона по полю применяют чувствительность по давлению, поскольку влиянием дифракции звуковой волны на чувствительность гидрофона можно пренебречь. Калибровку по давлению выполняют в поле стоячей звуковой волны камеры малого объёма на частотах вплоть до долей герца.

В 2003–2008 гг. были выполнены сличения результатов низкочастотных калибровок гидрофонов между ВНИИФТРИ и Ханчжоусским институтом прикладной акустики (HAARI, КНР) [7] и между ВНИИФТРИ и ДП НДИ «Система» (Украина) — сличения КОOMET 405/RU/07.

Особенность сличений КОOMET 405/RU/07 состояла в том, что национальный эталон Украины получал единицу от ГЭТ 55. Это обстоятельство позволило выявить особенность передачи единицы звукового давления на низких частотах при использовании герметичной камеры малого объёма.

Размер единицы эталону ДП НДИ «Система» передавали с помощью гидрофона — эталона 1 разряда, при этом определяли поправки к воспроизводимому в камере малого объёма звуковому давлению. При сличениях использовали три гидрофона, один из которых был того же типа, что и гидрофон, использованный для передачи единицы. В результате сличений было выяснено, что использование поправок улучшает сопоставимость результатов калибровок однотипных гидрофонов и ухудшает сопоставимость для гидрофонов разных типов. Одной из причин этого является зависимость передаточного импеданса герметичной камеры малого объёма от различных конструкций уплотнения, используемых при постановке в камеру разных типов гидрофонов. Это стало причиной использования в ГЭТ 55 камер малого объёма открытого типа, что показывает, как сличения, помимо своего основного назначения, могут способствовать совершенствованию эталона.

Новые задачи

Развитие гидроакустических измерений привело к расширению круга задач, которые решают с помощью эталонов. Например, для гидрофона известны границы применимости чувствительности по давлению и по полю. С появлением разнообразных средств измерений подводного звука, используемых как при сертификационных испытаниях коммерческих судов, так и при мониторинге шумового загрязнения морской среды, потребовалось устанавливать границы применимости чувствительности по полю и по давлению для этих средств измерений. Для этого стало необходимым расширить частотный диапазон калибровок гидроакустического приёмника по полю в область низких частот. Возможность таких калибровок в рамках стандартизованных методов отсутствовала.

Качественный скачок в улучшении характеристик и расширении возможностей эталона произошёл в результате внедрения разработанного во

ВНИИФТРИ метода скользящего комплексного взвешенного усреднения (СКВУ) [8–10]. Метод СКВУ позволяет получать частотные характеристики чувствительности гидроакустического приёмника по полю обработкой частотных зависимостей, измеренных в реверберационном звуковом поле бассейна. Применение СКВУ в качестве первичного метода калибровки потребовало обоснования путём проведения сличений. Такие сличения были выполнены в период с 2010 по 2015 г. в рамках тем КОOMET 473/RU/09, 531/RU/11 и 561/RU/12. Помимо ВНИИФТРИ, НААРИ и Военно-Технического Центра судостроения и морского оружия Бундесвера (WTD 71, Германия) — участников первых ключевых сличений CCAUV.W K1 — в этих сличениях принял участие Национальный институт морских технологий (НИОТ, Индия) [11, 12].

Метод СКВУ позволяет значительно расширить в область низких частот диапазон калибровки по полю гидрофонов и других гидроакустических приёмников. Чтобы подтвердить и закрепить эти возможности в базе СМС-данных МБМВ Техническим комитетом ТК 1.2 «Акустика. Ультразвук. Вибрация» КОOMET были инициированы дополнительные сличения в диапазоне частот от 250 Гц до 8 кГц COOMET.AUV.W S1 — регистрационный идентификатор сличений в Комитете CCAUV МКМВ [13]. Во ВНИИФТРИ калибровку выполняли методом СКВУ вплоть до самых низких частот, в ХААРИ — на частотах ниже 1 кГц в камере малого объёма.

Выбор гидрофона сличений

Для передачи единицы внутри поверочной схемы используют эталонный гидрофон с плоской частотной характеристикой, круговой характеристикой направленности, высокой чувствительностью [14].

Как было упомянуто, в качестве опорной величины на сличениях выбирают такую, которая обеспечивает наилучшие показатели стабильности, повторяемости и воспроизводимости. Поэтому носителем опорной величины является гидрофон, соответствующий этим требованиям. Другие свойства гидрофона выбирают исходя из задач, решаемых на сличениях. Часто оказывается так, что эти свойства противоречат требованиям к эталонному гидрофону. Например, чтобы оценить помехозащищённость используемых методов калибровки и влияние отношения сигнал/шум на неопределённость результатов, на сличениях 473/RU/09 использовали гидрофоны, чувствительности которых различаются на 30 дБ.

Необоснованное использование на сличениях гидрофонов, которые полностью соответствуют требованиям к эталонным гидрофонам, без учёта специфических условий сличений может иметь негативные последствия. Особенностью сличений 561/RU/12 стала большая разница в температуре воды: Индия — от 27,6° до 31,5 °С; Германия — от 9,1° до 18,0 °С. На сличениях использовали гидрофоны типов V&K8104 и TC4034, которые удовлетворяют требованиям к эталонным гидрофонам, но имеют значительную

зависимость чувствительности от температуры. Это свойство гидрофонов привело к необходимости применять дополнительные поправки до 1 дБ, учитывающие зависимость температурного коэффициента от частоты.

Иногда заведомо ухудшают характеристики гидрофона для решения задачи сличений. Для всех методов калибровки по полю, используемых при сличениях, большая неравномерность частотных зависимостей — один из доминирующих источников составляющей неопределённости, особенно на низких частотах и в области резонансов. Для оценки этой составляющей на сличениях 473/RU/09 дополнительно использовали гидрофон с характеристикой чувствительности, специальным образом искажённой на низких частотах. Несмотря на то, что метод СКВУ основан на усреднении частотной зависимости, именно с помощью этого гидрофона были наиболее наглядно показаны преимущества метода. Для измерений на участках со значительной неравномерностью характеристики метод дополнен операциями редактирования экспериментальных частотных зависимостей. Редактирующие функции строят на основе априорной (на низких частотах) и апостериорной (в области резонансов) информации о поведении искомой зависимости [15].

На рис. 4 представлены результаты калибровки гидрофона с искажённой частотной характеристикой. Обратим внимание на результаты в диапазоне от 250 Гц до 5 кГц. На этом участке видны существенные расхождения результатов, полученных тонально-импульсным методом и в камере малого объёма. Эти расхождения обусловлены большими неопределённостями калибровки гидрофона по давлению на частотах выше 500 Гц и калибровки по полю тонально-импульсным методом на частотах ниже 3 кГц. На частотах ниже и выше рассматриваемого участка тонально-импульсный метод и камера малого объёма обеспечивают высокую точность калибровки. Результаты, полученные методом СКВУ, наилучшим образом «сшивают» частотные характеристики, полученные этими методами.

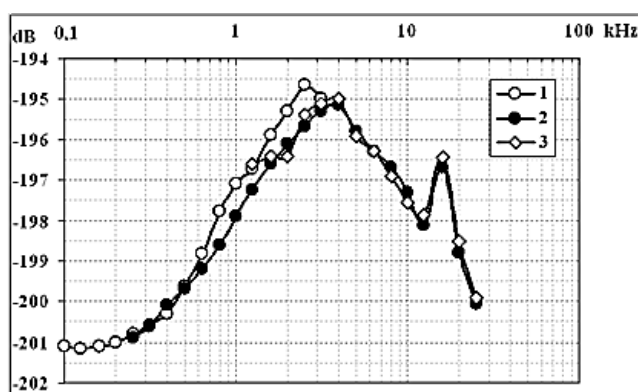


Рис. 4. Результаты калибровки гидрофона с частотной характеристикой, искажённой на низких частотах: 1 — по давлению в камере малого объёма; 2 — по полю с использованием техники СКВУ; 3 — тонально-импульсным методом

Сличения подтвердили возможности метода СКВУ, в том числе при калибровке приёмников звука со значительной неравномерностью частотной характеристики на низких частотах. По результатам сличений на 7 сессии ССАUV МКМВ метод СКВУ был признан первичным методом калибровки и применяется на международных сличениях [16].

Вторые ключевые сличения МКМВ

Решение проблем экологии моря потребовало проведения постоянного мониторинга шумового загрязнения морских акваторий. Сертификационные испытания судов проводят на специальных полигонах, на которых измерения можно выполнить с помощью гидрофонов. Задачи мониторинга невозможно решать с помощью одних гидрофонов, поскольку для этого требуется большое количество мобильных автономных средств регистрации подводного звука (рекордеров). Помимо гидрофона, рекордеры оснащают электронными устройствами обработки, регистрации и хранения принятого сигнала, автономными источниками питания и т.п. В результате этого габариты корпуса рекордера значительно увеличиваются, и он становится мощным источником рассеяния падающей звуковой волны. По данным зарубежных источников, искажения частотной характеристики гидрофона рассеянием звука на корпусе рекордера могут достигать 18 дБ [17]. В этой ситуации недопустимо заменять частотную характеристику рекордера характеристикой гидрофона и применять вместо частотной характеристики по полю характеристику по давлению.

Рамочной директивой ЕС по морской стратегии частоты от 63 до 125 Гц признаны наиболее губительными для морской фауны [18, 19], и поставлена задача измерений подводного шума в этом диапазоне частот. Тем самым задача мониторинга подводного звука была заменена задачей измерений, что потребовало калибровки рекордеров.

Большинство национальных эталонов используют тонально-импульсный метод измерений и не обеспечивают калибровку по полю на частотах ниже 1 кГц. Чтобы определить возможности национальных эталонов по выполнению низкочастотных калибровок на ключевых сличениях МКМВ ССАUV.W K2 (2015–2018 гг.), одной из основных задач стало установление предельной нижней частоты калибровки гидрофона по полю. В качестве ориентира Техническим протоколом сличений была установлена частота 250 Гц, которой удалось достичь трём из семи лабораторий, участвующих в сличениях. ВНИИФТРИ выполнил калибровки на частотах 100 Гц – 1 кГц с неопределённостью 0,4 дБ ($k = 2$). Такой результат получили, используя для обработки по методу СКВУ частотные зависимости, расположенные справа и слева от нуля оси частот. Частотную зависимость в области отрицательных частот получали, рассматривая частоту излучаемого сигнала как производную фазы

сигнала по времени. Эти исследования показали, что нижнюю частоту калибровки по полю в бассейне определяет не ограничение, накладываемое конечным разрешением измерений по частоте тонально-импульсным методом, а соотношение сигнал/шум в эксперименте, и позволили получать результат калибровки по полю на частотах, начиная с десятков герц [20].

Другим результатом ключевых сличений CCAUV.W K2 стало подтверждение точности разработанного во ВНИИФТРИ метода калибровки гидроакустического приёмника по полю в реверберационном звуковом поле бассейна при излучении шумового сигнала, а также эквивалентности результатов калибровки на ЛЧМ, шумовом и тонально-импульсном сигналах [21–23].

До этого времени считали, что вследствие реверберации звука при излучении шумового сигнала в бассейне формируется диффузное поле, однако погрешность калибровки по диффузному полю достигает 3 дБ [24]. Достоинство шума при калибровке — использование стационарного (в отличие от тонального импульса и ЛЧМ) сигнала, который аналогичен по свойствам сигналам, принимаемым в море. Тем самым появилась возможность следовать одному из основных правил метрологии — калибровку средства измерений предпочтительно выполнять на тех сигналах, которые с его помощью предстоит измерять. Поясним это правило на примере вольтметра переменного напряжения, который вследствие калибровки исключительно на гармонических сигналах является «синусометром». В этом нетрудно убедиться, попытавшись измерить напряжение, изменяющееся по негармоническому закону, например, состоящее из двух гармоник, отличающихся по частоте менее чем на сотую герца (частота третьоктавного ряда 50 Гц и частота электрической помехи от питающей сети 49,99 Гц). В то же время шумомер такие измерения выполнит с нормированной погрешностью.

Планируемые сличения

Одна из задач, решаемых национальными метрологическими центрами, — поддержание эталонной базы на высоком международном уровне. С учётом того, что этот уровень непрерывно растёт, «поддержание» означает непрерывное совершенствование эталонов. Совершенствование подразумевает как повышение точности, так и расширение возможностей эталона. Расширение возможностей — это не только увеличение диапазонов эталона, но и обеспечение возможностей измерения новых величин, для чего нужно получать характеристики гидроакустического приёмника, которые ранее считали неинформативными. Например, пока гидрофоном измеряли среднее квадратическое значение (СКЗ) шума корабля, на фазочастотную характеристику (ФЧХ) гидрофона не обращали внимания, поскольку для таких измерений она не является информативной. С появлением необходимости оценивать влияние звука на подводных обитателей стали измерять пиковые значе-

ния звукового давления, для которых важно, чтобы гидрофон не изменял форму сигнала. Метрологическое обеспечение таких измерений требует контроля ФЧХ гидрофона. К информативному параметру измеряемого звукового давления — СКЗ, добавился считавшийся ранее неинформативным параметр — фаза звуковой волны. Проведённые исследования показали, что многие представители подводной фауны реагируют не только на звуковое давление, но и на колебательную скорость. Появилась необходимость в эталоне колебательной скорости.

Измерение ФЧХ гидрофона включено в классификатор СМС-данных МБМВ (http://kcdb.bipm.org/appendixC/AUV/AUV_services.pdf). Лаборатории стран, лидирующих в области гидроакустических измерений, разрабатывают методы фазовой калибровки акустических преобразователей. В 2010 г. были проведены сличения между NPL и HAARI [25], на которых опробовали различные методы измерений ФЧХ и саму возможность выполнять точное сравнение результатов измерения ФЧХ.

NPL выполнял измерения методом взаимности в свободном поле, за фазовый угол чувствительности принимали аргумент комплексной чувствительности гидрофона на частоте. При измерениях фазового угла методом взаимности необходимо определять комплексную чувствительность гидрофона для акустического центра гидрофона, то есть (как было упомянуто) за гидрофон следует принимать его чувствительный элемент. Фактически в NPL определяли ФЧХ для геометрического центра гидрофона. HAARI применял метод оптической интерферометрии и получал ФЧХ для акустического центра гидрофона. Полученные участниками результаты будут согласованы в случае, если акустический и геометрический центры гидрофона совпадают. В том, что такое предположение выполняется не всегда, показало расхождение ФЧХ, представленных на рис. 5.

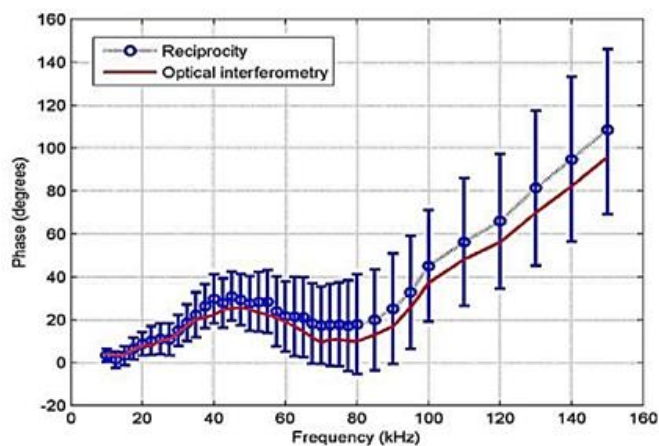


Рис. 5. Фазочастотные характеристики, измеренные методом взаимности и методом оптической интерферометрии

Причина — активный элемент гидрофона был смещён относительно оси симметрии гидрофона на 1 мм. Такое смещение вызвало частотно зависимое изменение фазы, которое достигло 18° на частоте 150 кГц.

Наличие и положение акустического центра характеризуют акустические свойства гидрофона, геометрический центр — параметр, получаемый при изготовлении гидрофона, который не связан с акустическими свойствами гидрофона, но обеспечивает получение информации о фазе звуковой волны в точке поля, в которой располагался гидрофон. Идеальная ситуация, когда геометрический центр приёмника совпадает с акустическим. Изготовитель гидрофона указывает положение акустического центра, опираясь на симметрию конструкции и геометрические размеры чувствительного элемента. До тех пор, пока не потребовалось измерять ФЧХ, никто не обращал внимания на возможные малые смещения чувствительного элемента и неоднородность герметизирующего покрытия активного элемента. Обнаруженные на сличениях смещения показали необходимость ужесточения требований к технологии изготовления гидрофона. Это ужесточение тем более важно для ультразвуковых преобразователей, используемых в медицине. На частотах в десятки мегагерц смещение акустического центра на несколько микрон приведёт к неприемлемой погрешности фазовой калибровки. Таким образом, результаты сличений оказались важными не только для метрологии, но и технологии.

На совещании ТК 1.2 КОOMET в 2018 г. по инициативе НАARI принято решение о подготовке сличений в области фазовой калибровки гидрофонов. ВНИИФТРИ не располагает установкой оптической интерферометрии, аналогичной используемой в НАARI, тем не менее ГЭТ 55 примет участие в этих сличениях.

Во ВНИИФТРИ разработаны оригинальные способы фазовой калибровки для акустического центра гидрофона с использованием измерений по методу взаимности [26–28]. Способы позволяют исключить погрешность, обусловленную несовпадением геометрического и акустического центров, при следующем ограничении: положение акустического центра калибруемого гидрофона относительно его геометрического центра неизменно. Этому ограничению удовлетворяет широкий класс гидроакустических преобразователей с симметричным активным элементом, включая приёмники векторных величин. Преимуществами предложенных способов являются как возможность определять фазовый угол чувствительности для акустического центра гидрофона без использования расстояний между акустическими центрами излучателя и приёмника (само положение акустического центра в процессе измерений остаётся неизвестным), так и возможность вычислять смещение акустического центра гидрофона относительно его геометрического центра [28]. На рис. 6 представлены результаты фазовой калибровки гидрофона для геометрического — кривая 1, и акустического — кривая 2, центров на частотах от 160 до 500 кГц.

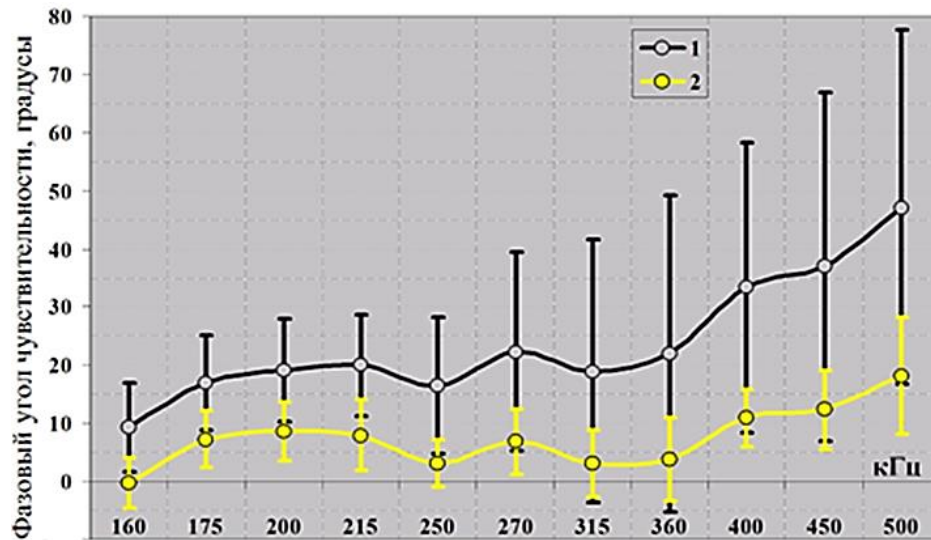


Рис. 6. Фазочастотные характеристики, измеренные для геометрического (1) и акустического (2) центров гидрофона

По результатам калибровки было установлено, что у участвовавшего в эксперименте гидрофона акустический центр смещён относительно геометрического на 100 мкм. Представленные данные позволяют сделать вывод о том, что предложенный во ВНИИФТРИ способ калибровки обеспечивает значительно меньшие разброс результатов и зависимость разброса от частоты измерений.

Сличения эталонов векторных величин

Не всегда развитие метрологии опережает технологии. Иногда достижения технологий стимулируют развитие метрологии. На протяжении долгого времени рабочий диапазон приёмников векторных величин гидроакустического поля (градиент звукового давления, колебательная скорость частиц водной среды и т.п.) был ограничен сверху частотами 1–2 кГц. Калибровку таких приёмников выполняли в поле стоячей звуковой волны камеры малого объёма. Развитие технологий позволило расширить частотный диапазон приёмников векторных величин до десятков килогерц, что обусловило необходимость разработки методов калибровки этих приёмников по полю.

Традиционно метод взаимности использовали только для определения чувствительности приёмника звукового давления (скалярной величины акустического поля). Впервые в мировой практике во ВНИИФТРИ техника измерений методом взаимности была применена для калибровки приёмников векторных величин [29, 30]. Ноу-хау разработанного подхода заключено в использовании обратимого преобразователя звукового давления и выполнении

измерений векторных величин по полю в реверберационном звуковом поле, формирующемся при излучении в бассейне сигналов с распределённой по частоте мощностью. Возможность выделять векторную величину прямой волны излучателя в реверберационном поле бассейна потребовала экспериментального подтверждения. Для этого был использован оригинальный приём.

В отсутствие возможности сравнить результат калибровки предложенным методом с результатами, полученными другими первичными методами, в прямую волну излучателя вносили искажение с точно известными параметрами. Источником искажения являлась звуковая волна, отражённая от границы раздела вода—воздух, направление распространения которой не совпадало с направлением распространения прямой волны излучателя. Измеренные параметры с высокой точностью совпали с параметрами внесённого искажения.

Метод калибровки был реализован в ГЭТ 55, метрологические характеристики эталонной установки были подтверждены пилотными сличениями КООМЕТ 646/RU/14, которые успешно завершены в 2019 г. Таким образом, решение задачи обеспечения единства измерений векторных величин гидроакустического поля было начато не традиционным путём — постепенным повышением точности калибровок вплоть до уровня первичных эталонов [31, 32], а созданием первичного эталона, реализующего абсолютный метод измерений.

Заключение

В заключительной части статьи зададимся вопросом — что такое эталон? Вернее, что означает этот термин при выполнении сличений? На международных сличениях мы вынуждены пользоваться тем понятием эталона, которым пользуются зарубежные участники. Используемое внутри некоторых стран понятие первичного эталона совпадает с нашим — средство измерений с установленными метрологическими характеристиками, официально признанное эталоном. На международных сличениях используют понятие национальный эталон, смысловая нагрузка которого значительно шире и может меняться в зависимости от цели сличений. На ключевых сличениях МКМВ подтверждают калибровочные и измерительные возможности, поэтому понятие национального эталона включает методы, средства и персонал. Всё это вместе определяет квалификацию лаборатории, которую и подтверждают сличения.

К национальным эталонам не предъявляют требований, чтобы он имел статус государственного первичного эталона (ГПЭ) либо был зарегистрирован в реестре МБМВ. В сличениях участвуют лаборатории, подтвердившие высокую квалификацию, и специально подготовленный лабораторией для сличений комплекс средств, который реализует первичные методы и вопло-

щает последние достижения в данной области измерений. Это даёт возможность «обкатать» на сличениях самые новые технические решения — аппаратуру и методы. Пилотные сличения идеально подходят для этих целей. Когда все решения проверены и эталон создан, ему можно придавать официальный статус или вносить в реестр, проводить ключевые сличения.

Работы по совершенствованию эталона инициируют, имея готовые, пусть не окончательно отработанные, технические решения. Поиск таких решений — это широкий круг исследований, которые выполняют постоянно, независимо от того, финансируются они в рамках поставленной работы или нет.

В РФ под национальным эталоном принято понимать ГПЭ. Из-за этого возникает парадоксальная ситуация. Если в сличениях участвует ГПЭ, то результатом этого участия может быть только подтверждение нормированных метрологических характеристик ГПЭ. Это приводит к тому, что ГПЭ в лучшем случае оказывается в роли постоянно «догоняющего». Если использовать понятие национального эталона и на сличениях применять самые современные решения, то метрологические характеристики национального эталона всегда будут лучше характеристик ГПЭ. Так, при проведении первых ключевых сличений МКМВ нижняя частота калибровки по полю составляла 1 кГц, тогда как официально нижним пределом ГЭТ 55 была частота 3,15 кГц. Кроме того, установленные Техническим протоколом сличений частоты калибровки не совпадали с третьоктавным рядом, реализованным в ГЭТ 55. Если бы в заявке на участие в сличениях были указаны характеристики ГЭТ 55, Россия не была бы допущена к ключевым сличениям со всеми вытекающими последствиями. Эта ситуация типична почти для всех описанных сличений. На проходящих в настоящее время вторых ключевых сличениях МКМВ национальный эталон РФ выполнил калибровки по полю начиная с частоты 100 Гц. В очередной раз национальный эталон оказался более совершенным, чем только что утверждённый ГЭТ 55. Однако внедрить в ГЭТ 55 разработанные и подтверждённые ключевыми сличениями методы можно будет только после выполнения очередных работ по совершенствованию эталона.

Завершим статью обсуждением вопроса, с которого она должна бы начинаться, — с чего начинают сличения? Если сличения очередные, то отбор участников и организацию сличений берёт на себя соответствующий международный комитет. Но иногда приходится сталкиваться с противоположной проблемой — найти партнёров для сличений. Например, если необходимо организовать сличения единиц, для которых не существовало эталонов. Несмотря на востребованность единицы, отсутствие аналогичных национальных эталонов ставит под сомнение целесообразность создания ГПЭ. В Хабаровском филиале ВНИИФТРИ был создан ГПЭ единиц скоростей распространения и коэффициента затухания ультразвуковых волн в твёрдых

средах ГЭТ 189-2014. Попытка сличений по результатам создания эталона успехом не увенчалась, метрологические характеристики ГПЭ на протяжении длительного времени оставались не подтверждёнными, несмотря на меры по «стимулированию» поиска партнёров по сличениям. В рамках КОOMET не удалось найти национальные метрологические институты, заинтересованные в сличениях в этом виде измерений. Выход из сложившейся ситуации удалось найти только на 11-м совещании Консультативного комитета по акустике, ультразвуку и вибрации МКМВ в Париже в сентябре 2017 г. Проблема в том, что во многих странах измерения скорости звука в твёрдом теле относят к дефектоскопии и для калибровки дефектоскопов используют испытательные установки фирм-изготовителей. Благодаря возможности непосредственного общения специалистов ВНИИФТРИ с широким кругом экспертов на самых представительных международных метрологических форумах удалось решить нестандартную задачу — в настоящее время сличения ГЭТ 189-2014 идут полным ходом.

Литература

1. Enyakov A.M., Likhatchev S.M., Platonov V.A., Yuan W.J., Wang Y.B. and Li J.Q. A Russian-Chinese international comparison of hydrophone calibration methods // *Metrologia-BIPM*. 1999. V. 36. № 4. P. 297–303.
2. Еняков А.М., Лихачев С., Платонов В., Вэнчжун Ю., Юбинь В., Чжун Л. Сличения результатов градуировок гидрофонов на эталонах России и Китая // *Измерительная техника*. 2000. № 6. С. 63–67.
3. Исаев А.Е. Проблемы метрологии гидрофизических измерений / Тез. докл. конф. ПМГИ-92. М.: ВНИИФТРИ, 1992. С. 56–57.
4. Исаев А.Е., Черников И.В., Буренков Ю.А., Смелов В.А. Рабочие эталоны второго разряда для градуировки измерительных гидрофонов. Пути улучшения метрологических характеристик / Проблемы измерения параметров гидроакустических полей и обработки информации: Сб. науч. трудов ВНИИФТРИ. М.: ВНИИФТРИ, 1999. С. 95–107.
5. Исаев А.Е. Модифицированная процедура метода взаимности в свободном поле // *Измерительная техника*. 2007. № 12. С. 48–52.
6. Исаев А.Е., Сильвестров С.В. Результаты участия ВНИИФТРИ в первых международных ключевых сличениях эталонов в области гидроакустических измерений // *Измерительная техника*. 2006. № 3. С. 65–70.
7. Лихачев С.М., Еняков А.М., Вэнчжун Юань, Джи Чэн. Сличения национальных эталонов России и Китая в инфразвуковом диапазоне частот // *Измерительная техника*. № 7. 2004. С. 67–70.
8. Исаев А.Е. Точная градуировка приёмников звукового давления в водной среде в условиях свободного поля. Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2008. 369 с.

9. Исаев А.Е. Градуировка гидрофона при наличии отражающих элементов с использованием согласованной пространственной фильтрации // *Акустический журнал*. 2008. Т. 54. № 3. С. 1–8.
10. Исаев А.Е., Матвеев А.Н. Градуировка гидрофонов по полю при непрерывном излучении в реверберирующем бассейне // *Акустический журнал*. 2009. Т. 55. № 2. С. 1–10.
11. Маларкоди А., Лата Г., Атмананд М.А., Исаев А.Е., Матвеев А.Н., Щерблюк Н.Г., Манн Ф., Янсен С., Милкерт Д. Межлабораторные сличения эталонов в области гидроакустических измерений в частотном диапазоне 3–500 кГц // *Измерительная техника*. 2016. № 1. С. 69–72.
12. Yi Chen, Isaev A.E., Yuebing Wang, Enyakov A.M., Teng Fei, Matveev A.N. 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.
13. Isaev A.E., Yi Chen, Matveev A.N., Zihong Ping COOMET.AUV.W-S1 supplementary comparison of free-field hydrophone calibrations in the frequency range 250 Hz to 8 kHz // *Metrologia Tech. Suppl.* 2015. V. 52. 09001.
14. IEC 60500:2017 Underwater acoustics – Hydrophones – Properties of hydrophones in the frequency range 1 Hz to 500 kHz.
15. Исаев А.Е., Матвеев А.Н. Применение метода скользящего комплексного взвешенного усреднения для восстановления неравномерной частотной характеристики приёмника // *Акустический журнал*. 2010. Т. 56. № 5. С. 651–654.
16. Isaev A.E., Enyakov A.M., Matveev A.N., Yuebing Wang, Yi Chen, Teng Fei COOMET Pilot Comparison 473/RU/09: Calibration of hydrophones in frequency range from 250 Hz to 200 kHz [Electronic resource]. 2010. URL: www.bipm.org.
17. Hayman G., Lepper P., Robinson S. The calibration and characterization of autonomous underwater recorders / Proc. of the 2-nd International Conference and Exhibition on Underwater Acoustics UA2014: ed. J.S. Papadakis, L. Bjorno. Rhodes, Greece, 2014. P. 1103–1108.
18. Directive 2008/56/EC of the European Parliament and of the Council of 17 June 2008 establishing a framework for community action in the field of marine environmental policy (Marine Strategy Framework Directive).
19. Council Directive 92/43/EEC of 21 May 1992 on the conservation of natural habitats and of wild fauna and flora.
20. Исаев А.Е., Николаенко А.С. Лабораторная калибровка гидроакустического приёмника по полю на низких частотах // *Измерительная техника*. 2018. № 1. С. 54–59.
21. Исаев А.Е., Черников И.В. Лабораторная градуировка гидроакустического приёмника в реверберационном поле шумового сигнала // *Акустический журнал*. 2015. Т. 61. № 5. С. 1–9.

22. Исаев А.Е., Поликарпов А.М., Черников И.В. Акустические сигналы и поля для метрологических работ в лабораторном гидроакустическом бассейне // Альманах современной метрологии. ФГУП «ВНИИФТРИ». 2015. № 2. С. 76–102.
23. Исаев А.Е., Черников И.В., Щерблюк Н.Г. Инновационная технология измерений для градуировки гидроакустических преобразователей в реверберационном поле лабораторного бассейна // Альманах современной метрологии. ФГУП «ВНИИФТРИ». 2015. № 2. С. 103–132.
24. Лопашев Д.З. Исследование звукового поля в большом измерительном бассейне / Исследования в области акустических и гидроакустических измерений / Труды институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов СССР. Выпуск 73 (133). М.: Стандартгиз, 1963. С. 31–40.
25. Nauman G., Robinson S. Phase calibration of hydrophones by the free-field reciprocity method / Proc. of the 11th European Conference on Underwater Acoustics. Edinburgh, 2012. P. 1437–1444.
26. Исаев А.Е., Матвеев А.Н., Поликарпов А.М., Щерблюк Н.Г. Измерение фазочастотной характеристики чувствительности гидрофона по полю методом взаимности // Измерительная техника. 2013. № 6. С. 56–58.
27. Исаев А.Е. Патент № 2509441 Способ определения фазового угла комплексной чувствительности гидрофона методом взаимности. Опубликовано 10.03.2014. БИ № 7.
28. Исаев А.Е. Патент № 2516607 Способ определения пространственного смещения акустического центра гидрофона относительно его геометрического центра. Опубликовано 20.05.2014. БИ № 14.
29. Исаев А.Е. Патент № 2513446 Способ определения амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик чувствительности по полю гидроакустического приёмника. Опубликовано 20.01.2016. БИ № 2.
30. Исаев А.Е., Матвеев А.Н., Некрич Г.С., Поликарпов А.М. Комплексная градуировка приёмника градиента давления с использованием процедуры метода взаимности // Акустический журнал. 2014. Т. 60. № 1. С. 48–55.
31. Гордиенко В.А. Векторно-фазовые методы в акустике. М.: Физматлит, 2007. 480 с.
32. Гордиенко В.А., Гончаренко Б.И., Задорожный С.С., Старкова М.В. Расширение диапазона градуировки векторных приёмников в неоднородном поле измерительных камер в сторону высоких частот // Акустический журнал. 2012. Т. 58. № 5. С. 623–627.