

УДК 534.6.08

**КООМЕТ 786/RU-A/19:
РЕЗУЛЬТАТЫ ПИЛОТНЫХ СЛИЧЕНИЙ АМПЛИТУДНО-
ФАЗОВЫХ КАЛИБРОВОК ГИДРОФОНОВ ПО ПОЛЮ
В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ ОТ 10 ДО 500 кГц**

**А.Е. Исаев¹, Чен И², А.Н. Матвеев¹, Цзя Гуанхуэй²,
Б.И. Хатамтаев¹, Ванг Шигуан², Н.Г. Щерблюк¹**

¹ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл., Россия,

²Научно-исследовательский институт прикладной акустики Ханчжоу (HAARI),
Ханчжоу, Чжэцзян, КНР,
isaev@vniiftri.ru

Аннотация. Описан проект КООМЕТ 786/RU-a/19: двусторонние пилотные сличения результатов амплитудно-фазовых калибровок гидрофонов по полю на частотах от 10 до 500 кГц между Ханчжоусским научно-исследовательским институтом прикладной акустики (HAARI) и Всероссийским научно-исследовательским институтом физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ — лаборатория пилот). Выполнены измерения, составлены и подтверждены сличениями бюджеты неопределённостей результатов измерений модуля и аргумента комплексной чувствительности опорного гидрофона RHS-6. Типичные различия результатов, полученных участниками в частотном диапазоне сличений, составили 1,2–1,3 дБ для модуля и 0,14–0,16 радиан для аргумента чувствительности гидрофона. Подтверждена корректность методик, применённых для амплитудно-фазовых калибровок гидрофонов по полю, в том числе метода расчёта частотной зависимости аргумента по частотной зависимости модуля чувствительности гидрофона.

Ключевые слова: метрология измерений подводного звука, пилотные сличения КООМЕТ, амплитудно-фазовая калибровка гидрофона.

**COOMET 786/RU-A/19:
RESULTS OF PILOT COMPARISONS OF HYDROPHONES
AMPLITUDE-PHASE FREE-FIELD CALIBRATIONS
IN THE FREQUENCY RANGE FROM 10 TO 500 kHz**

**A.E. Isaev¹, Ghen Yi², A.N. Matveev¹, Jia Guanghui²,
B.I. Khatamtaev¹, Wang Shiquan², N.G. Shcherblyuk¹**

¹FSUE “VNIIFTRI”, Mendeleevo, Moscow region, Russia,

²HAARI, Hangzhou, Fuyang Zhejiang, China,
isaev@vniiftri.ru

Abstract. The described COOMET project 786/RU-a/19: bilateral experimental comparisons of the calculated phase calibrations of hydrophones in the field at a frequency from 10 to 500 kHz between the Hangzhou Applied Acoustics Research Institute (HAARI) and the Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering (VNIIFTRI — pilot laboratory). The measurements were made, compiled and confirmed by comparing the uncertainty budgets of the measurement

results of the module and the argument of the complex sensitivity of the reference hydrophone RHS-6. Typical results obtained in the frequency range of comparisons were 1.2–1.3 dB for the module and 0.14–0.16 radians for the hydrophone sensitivity index. The correctness of the methods used to evaluate the phase-phase calibrations of hydrophones in the field, including the method for calculating the frequency dependence of the indicator from the frequency dependence of the hydrophone sensitivity, has been confirmed.

Keywords: metrology of underwater sound measurements, COOMET pilot comparisons, amplitude-phase hydrophone calibration.

*«Пессимист видит трудности при каждой возможности;
оптимист в каждой трудности видит возможности»*

У. Черчилль

Введение

Пилотные сличения амплитудно-фазовых калибровок гидрофонов по полю были инициированы ТК1.2 «Акустика, ультразвук, вибрация» КООМЕТ. Сличения организованы и проведены как двусторонние между Всероссийским научно-исследовательским институтом физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ, Россия) и Ханчжоуским научно-исследовательским институтом прикладной акустики (НААРИ, КНР). Идентификационный номер сличений — КООМЕТ 786/RU-a/19. Функции лаборатории-пилота были возложены на ВНИИФТРИ. Цели, задачи, порядок и сроки сличений были установлены Техническим протоколом сличений, подготовленным лабораторией-пилотом и согласованным с НААРИ. Опорные гидрофоны сличений подготовил и предоставил НААРИ. Первоначально поставленные цели сличений — предоставление участниками сличений технических данных для оценки корректности применённых методик измерений, правильности выполнения амплитудно-фазовых калибровок гидрофонов, подтверждение бюджетов и неопределённостей результатов калибровок. В процессе подготовки эталонной установки к калибровкам ВНИИФТРИ расширил свои задачи, включив проверку корректности математической модели гидрофона, состоящей из «линии опережения» и минимально-фазовой части, учитывающей дифракцию звука и резонансные свойства гидрофона. Предложенная ВНИИФТРИ модель позволяет, используя преобразование Гильберта, получать частотную зависимость аргумента по экспериментальной частотной зависимости модуля чувствительности гидрофона и выполнять обратную операцию.

Калибровки были выполнены с октября по декабрь 2020 г. в НААРИ и с февраля по май 2021 г. во ВНИИФТРИ. В отчёте приведены характеристики опорных гидрофонов, сведения об эталонных установках и методах калибровки, результаты калибровок, оценки опорных уровней сличений, выводы; упомянуты проблемы, повлиявшие на результаты сличений.

Опорные гидрофоны, использованные в сличениях

Для использования на сличениях в качестве опорных НААРИ подготовил два гидрофона: гидрофон TC4033 производства фирмы Teledyne RESON A/S (Дания) на частотный диапазон от 10 до 100 кГц и гидрофон RHS-6 производства НААРИ на частотный диапазон от 10 до 500 кГц.

Внешний вид опорных гидрофонов представлен на рис. 1 и 2. Основные характеристики гидрофонов приведены в таблицах 1 и 2.

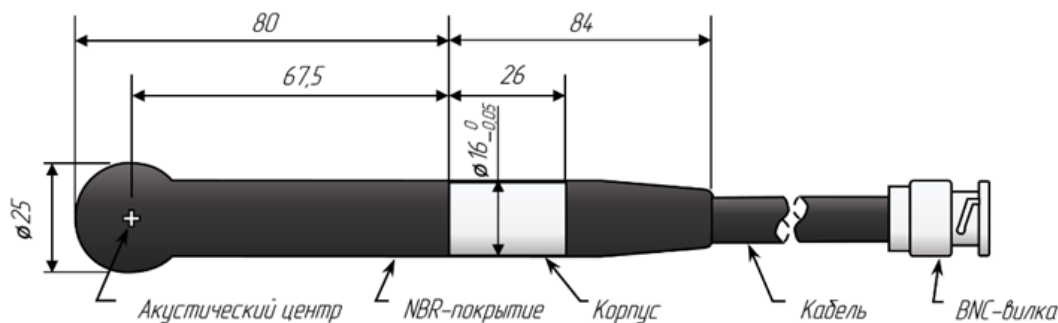


Рис. 1. Внешний вид гидрофона TC4033

Таблица 1

Основные характеристики гидрофона TC4033

Параметр	Значение
Рабочий диапазон частот	от 1 Гц до 140 кГц
Диапазон плоского участка частотной зависимости чувствительности	от 1 Гц до 80 кГц
Уровень чувствительности на приём (на частоте 250 Гц)	(-203 ± 2) дБ отн. 1 В/мкПа
Направленность (на частоте 100 кГц): по горизонтали по вертикали	в угловом секторе $\pm 180^\circ \pm 2$ дБ в угловом секторе $\pm 135^\circ \pm 2$ дБ
Электрическая ёмкость с кабелем, нФ	7,8
Рабочая глубина, м	900
Диапазон рабочих температур, °C	от -2 до +80
Кабель (длина и тип)	встроенный, стандартная экранированная пара 10 м DSS-2/MIL-C-915
Тип разъёма	BNC
Корпус	алюминиевая бронза AlCu10Ni5Fe4
Вес с кабелем, кг	1,5

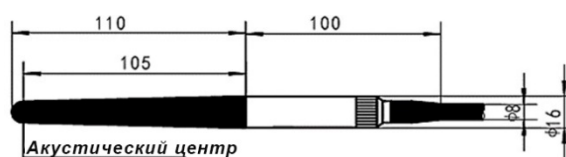


Рис. 2. Внешний вид гидрофона RHS-6

Таблица 2

Основные характеристики гидрофона RHS-6

Параметр	Значение
Рабочий диапазон частот	от 1 Гц до 500 кГц
Уровень чувствительности на приём (на частоте 250 Гц)	–220 дБ относительно 1 В/мкПа
Электрическая ёмкость с кабелем, нФ	3,0
Рабочая глубина, м	300
Диапазон рабочих температур, °C	от –2 до +80
Кабель (длина и тип)	встроенный, водонепроницаемый малошумящий кабель 10 м ZMFJ-3×0,5
Тип разъёма	BNC
Вес с кабелем, кг	1,6

При подготовке и отборе опорных гидрофонов основное внимание было уделено их временной стабильности.

Стандарт [1] определяет чувствительность гидрофона по полю на приём на заданной частоте и для заданного направления падения плоской звуковой волны, распространяющейся в невозмущённом свободном поле, как отношение преобразования Фурье сигнала выходного напряжения холостого хода гидрофона и преобразования Фурье сигнала звукового давления в точке расположения опорного центра гидрофона в отсутствие гидрофона.

Чувствительность гидрофона по полю — комплексная величина. Модуль этой чувствительности имеет размерность $\text{В} \cdot \text{Па}^{-1}$, аргумент (фазовый угол чувствительности) — разность фаз между электрическим напряжением на выходе гидрофона и звуковым давлением в точке расположения его опорного (акустического) центра имеет размерность радиан. В настоящих сличениях результаты измерений модуля чувствительности гидрофона представляли в $\text{В} \cdot \text{мкПа}^{-1}$ и/либо в уровнях чувствительности — в дБ относительно $1 \text{ В} \cdot \text{мкПа}^{-1}$. При выполнении калибровок участники сличений определяли модуль и аргумент чувствительности на приём по полю каждого опорного гидрофона.

При измерениях модуля чувствительности малые погрешности в расстояниях между преобразователями не приводят к существенным неопределённостям результатов. Особенность, осложняющая измерения аргумента чувствительности, состоит в том, что любая погрешность в расстояниях между преобразователями приводит к неопределённости результата, которая увеличивается пропорционально частоте измерений. Это вынуждает точно определять положение акустического центра калибруемого преобразователя либо применять меры, исключая влияние ошибки в положении акустического центра.

Методы калибровки и эталонные установки

Эталонные установки и методы калибровки, применённые в НААРИ

Калибровку выполняли абсолютным методом на основе оптической интерферометрии. Этот метод в основном используется в диапазоне частот от 100 кГц до 1 МГц и может быть распространён на частоты до десятков килогерц [1–3]. В этом методе скорость звуковых колебаний частиц водной среды в дальнем поле излучателя определяют путём измерения движения подвешенной в водной среде оптически отражающей и акустически прозрачной мембраны, на которой фокусируют луч лазера. Калибруемый гидрофон располагают в той же точке, где была расположена мембрана. Звуковое давление в точке расположения гидрофона получают через соотношение между скоростью звуковых колебаний частиц водной среды и звуковым давлением. Чувствительность гидрофона рассчитывают как отношение выходного напряжения гидрофона к звуковому давлению. Метод был использован для измерения комплексной чувствительности гидрофона в свободном поле.

Измерения выполняли в небольшом водном безэховом резервуаре размерами 1,8 м в длину и 1,2 м в диаметре. Принципиальная схема установки оптической калибровки показана на рис. 3. Установка состояла из генератора сигналов, усилителя мощности, вспомогательного преобразователя, фильтра, предусилителя, цифрового осциллографа и лазерного интерферометра. В диапазоне частот от 10 до 100 кГц использовали излучатель типа ST-50 производства НААРИ, а в диапазоне частот от 100 до 500 кГц излучали гидрофоном типа RHS-5 производства НААРИ. Калибровку выполняли при температуре воды $(17,6 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$. Смотровое окно со шкалой на резервуаре использовали для наблюдения и регулировки положений излучателя и мембраны.

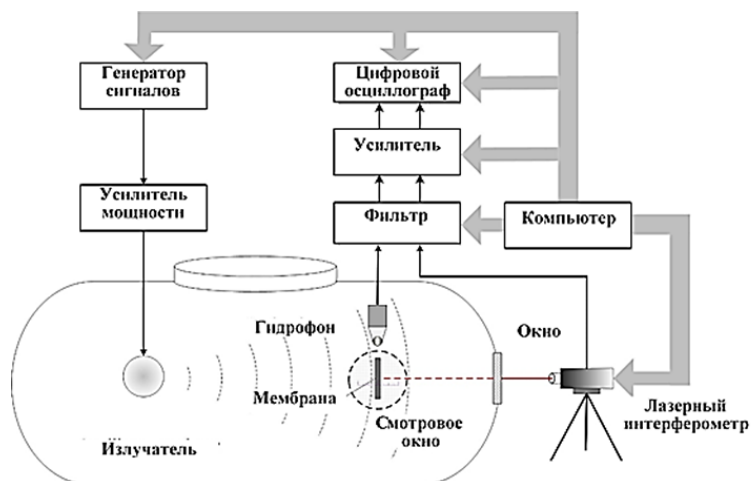


Рис. 3. Структурная схема установки для калибровки гидрофонов с использованием оптической интерферометрии

При измерениях излучатель располагали в безэховом резервуаре на глубине 0,6 м. Оптически отражающая и акустически прозрачная мембрана была подвешена в дальней зоне излучателя, расстояние между мембраной и излучателем составляло 0,45 м. Для измерения скорости звуковых колебаний мембраны луч лазера пропускали через окно резервуара и фокусировали на мембране, от которой луч отражался в приёмник интерферометра. Мембрана была достаточно тонкой, чтобы её движение совпадало по фазе со скоростью звуковых колебаний частиц воды. Чтобы разделить во времени звуковую волну излучателя и волны, отражённые стенками резервуара, использовали тональные импульсы. Скорость звуковых колебаний частиц воды в дальнем поле излучателя определяли путём измерения движения мембраны с помощью лазерного интерферометра. Для получения амплитуды и относительной фазы выходное напряжение лазерного интерферометра анализировали с помощью дискретного преобразования Фурье (ДПФ).

После измерений звуковых колебаний частиц воды методом лазерной интерферометрии мембрану снимали с системы позиционирования. Сохраняя положение излучателя неизменным в место расположения мембраны помещали калибруемый гидрофон. Расстояние между излучателем и гидрофоном регулировали до тех пор, пока временная задержка выходного сигнала гидрофона не совпадала с задержкой при измерениях оптическим интерферометром. Чтобы избежать рассеяния звуковых волн для крепления излучателя и калибруемого гидрофона использовали стержни из углеродного волокна. Для получения амплитуды и относительной фазы выходное напряжение гидрофона анализировали с помощью ДПФ.

Модуль комплексной чувствительности определяли по отношению амплитуд выходного напряжения гидрофона и звукового давления. Аргумент чувствительности определяли по разнице между относительными фазами выходного напряжения гидрофона и акустического давления. Фазовый отклик корректировали относительно центра гидрофона, учитывая время задержки сигнала оптического интерферометра и время распространения звуковой волны на расстояние, равное радиусу гидрофона.

Эталонные установки и методы калибровки, применённые во ВНИИФТРИ

Для калибровки использовали метод взаимности в поле свободно распространяющихся сферических звуковых волн с тремя преобразователями в соответствии с [1]. Были использованы два гидроакустических бассейна. Для калибровки на частотах от 100 до 500 кГц измерения выполняли в малом бассейне с прозрачными стенками размерами $1,5 \times 1,0$ м и глубиной 1 м; на частотах от 10 до 200 кГц использовали большой бассейн размерами 10×6 м и глубиной 6 м с бетонными стенами. Для юстировки гидрофонов по глубине, выравнивания по осям опорных направлений и установки расстояния между преобразователями использовали прецизионную систему позиционирования. В малом бассейне прецизионная система позиционирования дополнена лазерной системой юстировки (рис. 4).

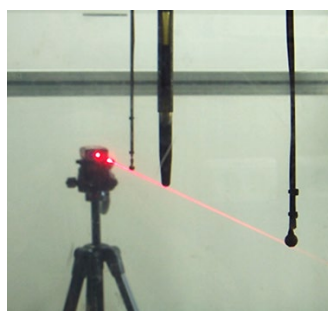


Рис. 4. Лазерная система для юстировки преобразователей под водой в малом бассейне

Температура воды и глубина погружения преобразователей в большом бассейне составляли соответственно $(17,5 \pm 0,4)^\circ\text{C}$ и 2,88 м; в малом бассейне — от $(18,0 \pm 0,5)$ до $(21,0 \pm 0,5)^\circ\text{C}$ и 0,4 м. Изменение расстояния между преобразователями контролировали по задержке принятого импульса. Для учёта зависимости скорости звука от температуры воды использовали табличные значения.

При измерениях излучали квадратурно-дополненные пары тональных импульсов и непрерывных линейно-частотно-модулированных (ЛЧМ) сигналов. Условия свободного поля обеспечивали обработкой частотных зависимостей по методу комплексного скользящего взвешенного усреднения (СКВУ) и временной селекцией тональных импульсов. Для улучшения отношения «сигнал / шум» применяли когерентное накопление.

Структурные схемы эталонных установок для калибровки гидрофонов в большом и малом бассейнах приведены на рис. 5.

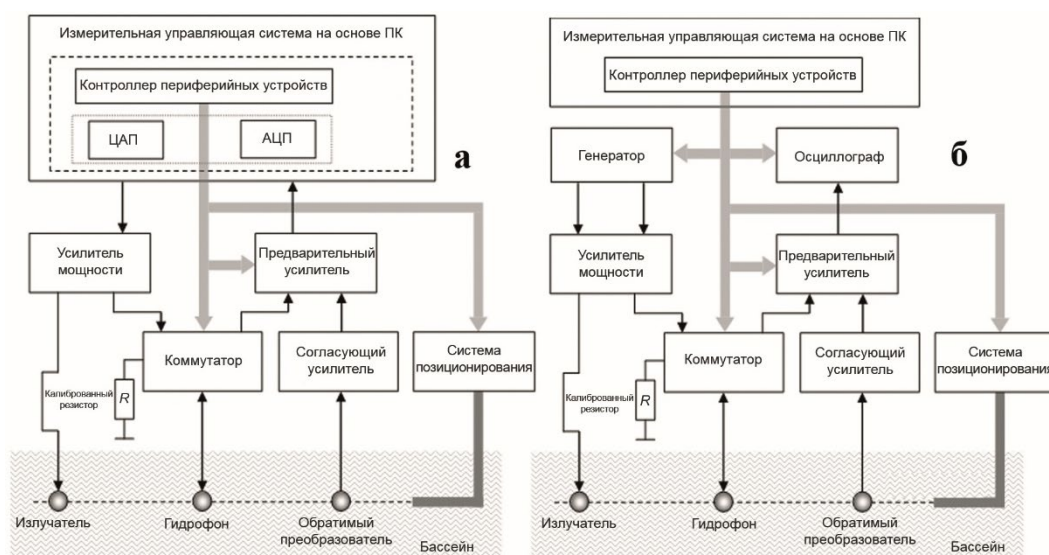


Рис. 5. Структурные схемы эталонных установок для калибровки гидрофонов в большом (а) и малом (б) бассейнах

Цифровой осциллограф и аналого-цифровой преобразователь использовали только для преобразования принимаемого сигнала в цифровую форму и получения осциллограммы. Обработку измерительных данных выполняли на компьютере с использованием самостоятельно разработанных программных продуктов. Измеряли отношения электрических напряжений, а не их абсолютные значения. Силу электрического тока оценивали по отношению напряжения, падающего на резисторе в цепи излучающего преобразователя, к величине сопротивления резистора. Дополнительных удлинительных кабелей не использовали.

При калибровке в качестве излучателей использовали гидрофоны разработки ВНИИФТРИ, в качестве обратимых преобразователей — гидрофон TC4033 фирмы RESON и гидрофон B&K 8103 производства фирмы Brüel & Kjær. Для крепления опорных гидрофонов при их позиционировании в большом бассейне использовали тонкие стержни из стали, в малом бассейне — тонкие стержни из углепластика. Перед погружением влагонепроницаемые оболочки корпусов и активных элементов гидрофонов очищали и увлажняли жидким мылом. Время замачивания гидрофонов на глубине измерений перед началом калибровочных работ составляло не менее суток.

Чтобы уменьшить погрешность измерений фазового угла чувствительности преобразователя размещали на одной прямой линии по схеме Люкера — Ван Бюррена [1, 4], в центре располагали калибруемый гидрофон, как это показано на рис. 5. В качестве опорного центра гидрофона обычно принимают геометрический центр его активного элемента. При калибровке по схеме Люкера — Ван Бюррена гидрофон необходимо поворачивать на 180° , при этом положение акустического центра гидрофона относительно излучателя и обратимого преобразователя должно оставаться неизменным. Однако различие в положениях акустического и опорного центров калибруемого гидрофона либо смещение акустического центра при повороте гидрофона на 180° приводят к ошибке в измерениях фазового угла чувствительности, которая увеличивается пропорционально частоте. Чтобы ослабить влияние этих источников неопределённости, положение опорной точки контролировали по лучу лазера и вводили поправку на смещение акустического центра [5].

При каждой калибровке опорного гидрофона дополнительно определяли частотные зависимости модуля и аргумента чувствительности обратимого преобразователя. По повторяемости характеристик обратимого преобразователя контролировали стабильность эталонных установок. С результатами контрольных калибровок можно ознакомиться в [6].

Проблемы, возникшие в процессе сличений

При выполнении калибровок было обнаружено, что опорный гидрофон ТС4033 вышел из строя, а результаты измерений с гидрофоном RHS-6 выявили его кратковременную нестабильность. Время проведения сличений совпало с самым разгаром пандемии COVID-19. Вследствие логистических и санитарно-эпидемиологических ограничений заменить опорные гидрофоны не представлялось возможным. Поскольку частотный диапазон гидрофона RHS-6 покрывает весь частотный диапазон сличений, было принято решение о продолжении сличений с использованием одного гидрофона.

Результаты калибровок

Результаты калибровок гидрофона RHS-6 в диапазоне частот от 10 до 500 кГц представлены графически на рис. 6 и 7 и сведены в таблицы 3–6.

Различие частотных зависимостей модуля чувствительности на частотах ниже 350 кГц значительно настолько, что не может быть объяснено различием температуры воды в бассейнах участников. Это различие демонстрирует систематическое смещение одной частотной зависимости относительно другой. По форме обе зависимости очень схожи. В [6] показано, что частотную зависимость аргумента чувствительности гидрофона определяет относительная частотная зависимость модуля чувствительности. Схожесть форм зависимостей на рис. 6 даёт основание ожидать близость сличаемых частотных зависимостей аргумента чувствительности гидрофона. Это демонстрируют частотные зависимости на рис. 7.

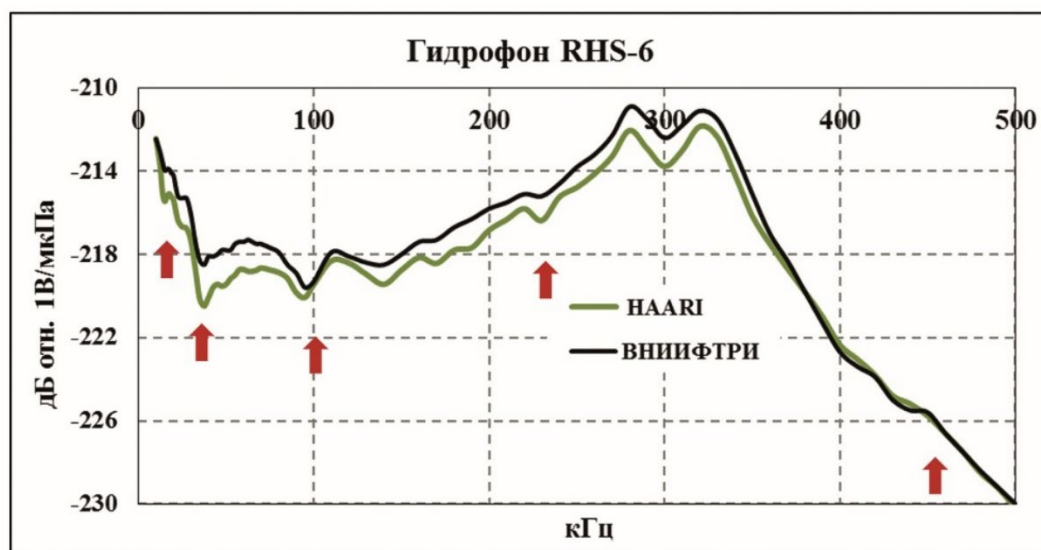


Рис. 6. Частотные зависимости модуля чувствительности

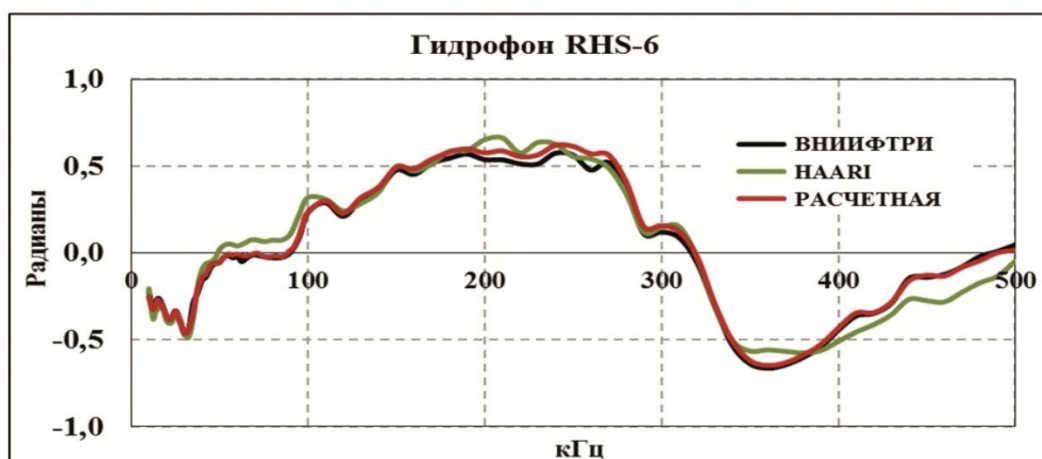


Рис. 7. Частотные зависимости аргумента чувствительности

Частотные зависимости аргумента чувствительности показали наибольшие различия на частотах выше 350 кГц, где частотные зависимости модуля практически неразличимы. Этот, казалось бы, парадокс легко объясним, если рассматривать на рис. 6 формы зависимостей, а не их совпадение. Совпадение на частотах выше 350 кГц зависимостей, смещённых одна относительно другой на частотах ниже 350 кГц, означает, что формы зависимостей, повторяющиеся на низких частотах, различаются на высоких частотах, на которых и наблюдаются расхождения аргументов чувствительности. Кривой красного цвета на рис. 7 представлена расчётная частотная зависимость аргумента чувствительности, полученная с использованием преобразования Гильберта относительной частотной зависимости модуля чувствительности, измеренной ВНИИФТРИ. В высокочастотной области расчётная зависимость лежит на экспериментальной кривой, что является подтверждением не только корректности методик измерений, использованных обоими участниками, но и правильности выполнения измерений. О пользе выполнения сличений свидетельствуют также сами расхождения результатов калибровок.

Таблица 3

Результаты измерений аргумента чувствительности
гидрофона RHS-6 в диапазоне частот от 10 до 100 кГц

Частота, кГц	ВНИИФТРИ		НААРИ		Опорные значения		Степени эквивалентности			
	φ_{RU} , рад	U_{RU} , рад	φ_{CN} , рад	U_{CN} , рад	φ_{ref} , рад	u_{ref} , рад	d_{RU} , рад	$U(d_{RU})$, рад	d_{CN} , рад	$U(d_{CN})$, рад
10,00	-0,173	0,062	-0,155	0,068	-0,165	0,023	-0,008	0,042	0,010	0,051
11,25	-0,213	0,060	-0,248	0,069	-0,228	0,023	0,015	0,039	-0,020	0,052
12,50	-0,236	0,072	-0,318	0,069	-0,278	0,025	0,043	0,052	-0,039	0,048
13,75	-0,223	0,081	-0,271	0,069	-0,251	0,026	0,027	0,062	-0,020	0,045
15,00	-0,185	0,072	-0,248	0,070	-0,218	0,025	0,033	0,052	-0,030	0,048
16,25	-0,185	0,060	-0,216	0,069	-0,198	0,023	0,013	0,039	-0,018	0,052
17,50	-0,204	0,068	-0,204	0,070	-0,204	0,024	0,000	0,048	0,000	0,050
18,75	-0,232	0,068	-0,244	0,070	-0,238	0,025	0,006	0,047	-0,006	0,051
20,00	-0,262	0,068	-0,288	0,070	-0,275	0,024	0,013	0,048	-0,013	0,050
22,50	-0,272	0,062	-0,290	0,070	-0,280	0,023	0,008	0,041	-0,010	0,052
25,00	-0,204	0,065	-0,230	0,070	-0,216	0,024	0,012	0,044	-0,014	0,052
27,50	-0,243	0,065	-0,260	0,071	-0,250	0,024	0,008	0,044	-0,010	0,053
30,00	-0,305	0,086	-0,314	0,072	-0,311	0,028	0,005	0,066	-0,004	0,046
32,50	-0,277	0,060	-0,319	0,072	-0,295	0,023	0,017	0,039	-0,025	0,055
35,00	-0,112	0,062	-0,199	0,073	-0,149	0,024	0,037	0,041	-0,050	0,055
37,50	-0,040	0,068	-0,010	0,073	-0,026	0,025	-0,014	0,047	0,016	0,054
40,00	0,044	0,091	0,106	0,074	0,081	0,029	-0,038	0,071	0,025	0,047
42,50	0,082	0,067	0,157	0,075	0,115	0,025	-0,033	0,044	0,042	0,056
45,00	0,147	0,067	0,178	0,076	0,160	0,025	-0,014	0,044	0,018	0,057
47,50	0,182	0,072	0,213	0,077	0,196	0,026	-0,015	0,050	0,017	0,056
50,00	0,201	0,077	0,276	0,077	0,238	0,027	-0,037	0,054	0,038	0,055
52,50	0,246	0,075	0,312	0,079	0,278	0,027	-0,032	0,052	0,035	0,057
55,00	0,267	0,069	0,333	0,080	0,295	0,026	-0,028	0,045	0,038	0,061
57,50	0,267	0,067	0,342	0,081	0,297	0,026	-0,030	0,043	0,045	0,062
60,00	0,286	0,069	0,347	0,081	0,312	0,026	-0,026	0,045	0,035	0,062
62,50	0,271	0,069	0,368	0,083	0,311	0,026	-0,040	0,044	0,057	0,063
65,00	0,300	0,072	0,394	0,084	0,340	0,027	-0,040	0,047	0,054	0,063
67,50	0,330	0,072	0,419	0,084	0,367	0,027	-0,038	0,047	0,051	0,064
70,00	0,347	0,072	0,435	0,086	0,384	0,028	-0,036	0,047	0,051	0,065
75,50	0,365	0,072	0,452	0,089	0,400	0,028	-0,035	0,046	0,052	0,069
80,00	0,382	0,073	0,483	0,093	0,421	0,029	-0,039	0,045	0,063	0,073
85,00	0,410	0,069	0,510	0,094	0,445	0,028	-0,035	0,041	0,065	0,076
90,00	0,462	0,092	0,569	0,097	0,513	0,033	-0,051	0,063	0,056	0,070
95,00	0,574	0,073	0,707	0,098	0,622	0,029	-0,047	0,044	0,085	0,079
100,0	0,745	0,070	0,831	0,101	0,773	0,029	-0,028	0,040	0,058	0,083

Таблица 4

Результаты измерений аргумента чувствительности
гидрофона RHS-6 в диапазоне частот от 110 до 500 кГц

Частота, кГц	ВНИИФТРИ		НААРИ		Опорные значения		Степени эквивалентности			
	φ_{RU} , рад	U_{RU} , рад	φ_{CN} , рад	U_{CN} , рад	φ_{ref} , рад	u_{ref} , рад	d_{RU} , рад	$U(d_{RU})$, рад	d_{CN} , рад	$U(d_{CN})$, рад
110,0	0,853	0,078	0,873	0,107	0,031	0,031	-0,007	0,013	0,046	0,087
120,0	0,825	0,071	0,857	0,104	0,029	0,029	-0,010	0,021	0,040	0,086
130,0	0,976	0,100	0,951	0,109	0,037	0,037	0,011	-0,013	0,068	0,080
140,0	1,082	0,076	1,068	0,108	0,031	0,031	0,005	-0,009	0,043	0,088
150,0	1,246	0,074	1,267	0,111	0,031	0,031	-0,006	0,014	0,041	0,093
160,0	1,272	0,072	1,291	0,124	0,031	0,031	-0,005	0,014	0,036	0,107
170,0	1,387	0,074	1,382	0,118	0,031	0,031	0,001	-0,004	0,040	0,100
180,0	1,468	0,072	1,508	0,131	0,032	0,032	-0,009	0,031	0,035	0,115
190,0	1,543	0,073	1,564	0,134	0,032	0,032	-0,005	0,016	0,035	0,118
200,0	1,562	0,121	1,677	0,127	0,044	0,044	-0,055	0,061	0,083	0,092
210,0	1,613	0,113	1,738	0,129	0,042	0,042	-0,055	0,071	0,074	0,097
220,0	1,640	0,107	1,703	0,131	0,042	0,042	-0,025	0,038	0,068	0,102
230,0	1,691	0,116	1,815	0,138	0,044	0,044	-0,051	0,073	0,074	0,106
240,0	1,805	0,121	1,857	0,145	0,046	0,046	-0,021	0,031	0,077	0,111
250,0	1,845	0,120	1,836	0,150	0,047	0,047	0,003	-0,005	0,075	0,117
260,0	1,810	0,134	1,874	0,159	0,051	0,051	-0,027	0,038	0,086	0,122
270,0	1,906	0,153	1,874	0,167	0,056	0,056	0,014	-0,017	0,103	0,123
280,0	1,808	0,168	1,777	0,169	0,060	0,060	0,016	-0,016	0,119	0,120
290,0	1,597	0,154	1,606	0,149	0,053	0,053	-0,004	0,004	0,110	0,104
300,0	1,660	0,137	1,686	0,128	0,047	0,047	-0,014	0,012	0,100	0,088
310,0	1,677	0,131	1,740	0,132	0,047	0,047	-0,031	0,031	0,093	0,093
320,0	1,588	0,132	1,614	0,137	0,048	0,048	-0,013	0,014	0,092	0,099
330,0	1,389	0,141	1,384	0,139	0,049	0,049	0,003	-0,003	0,100	0,097
340,0	1,215	0,141	1,239	0,144	0,050	0,050	-0,012	0,013	0,098	0,103
350,0	1,157	0,146	1,230	0,148	0,052	0,052	-0,036	0,037	0,103	0,105
360,0	1,183	0,170	1,288	0,153	0,057	0,057	-0,058	0,047	0,126	0,102
370,0	1,253	0,185	1,332	0,159	0,060	0,060	-0,045	0,033	0,140	0,103
380,0	1,347	0,183	1,373	0,163	0,061	0,061	-0,015	0,012	0,137	0,108
390,0	1,459	0,193	1,438	0,166	0,063	0,063	0,012	-0,009	0,146	0,109
400,0	1,607	0,187	1,543	0,167	0,062	0,062	0,036	-0,029	0,140	0,111
450,0	2,168	0,174	2,033	0,185	0,063	0,063	0,063	-0,071	0,119	0,135
500,0	2,611	0,186	2,517	0,207	0,069	0,069	0,042	-0,052	0,124	0,154

Таблица 5

Результаты измерений модуля чувствительности
гидрофона RHS-6 в диапазоне частот от 10 до 100 кГц

Частота, кГц	ВНИИФТРИ		НААРИ		Опорные значения		Степени эквивалентности			
	M_{RU} , дБ	U_{RU} , дБ	M_{CN} , дБ	U_{CN} , дБ	M_{ref} , дБ	u_{ref} , дБ	d_{RU} , дБ	$U(d_{RU})$, дБ	d_{CN} , дБ	$U(d_{CN})$, дБ
10,00	-212,5	0,88	-212,4	0,96	-212,45	0,34	-0,01	0,60	0,02	0,72
11,25	-212,8	0,90	-213,0	0,93	-212,89	0,33	0,13	0,65	-0,14	0,67
12,50	-213,1	0,89	-213,8	0,93	-213,48	0,33	0,37	0,65	-0,36	0,66
13,75	-213,6	0,88	-215,0	0,94	-214,35	0,33	0,78	0,66	-0,69	0,64
15,00	-214,0	0,91	-215,5	0,94	-214,78	0,34	0,81	0,70	-0,67	0,63
16,25	-213,9	0,91	-215,2	0,94	-214,62	0,34	0,72	0,69	-0,60	0,63
17,5	-213,9	0,90	-215,1	0,94	-214,52	0,34	0,62	0,67	-0,56	0,64
18,75	-214,1	0,89	-215,2	0,93	-214,70	0,33	0,60	0,67	-0,54	0,64
20,00	-214,2	0,88	-215,4	0,93	-214,81	0,33	0,61	0,65	-0,56	0,64
22,50	-215,2	0,88	-216,3	0,93	-215,80	0,33	0,60	0,66	-0,55	0,64
25,00	-215,3	0,88	-216,7	0,93	-216,03	0,33	0,73	0,67	-0,64	0,63
27,50	-215,3	0,83	-216,8	0,92	-216,03	0,32	0,73	0,61	-0,72	0,65
30,00	-216,1	0,88	-217,4	0,93	-216,76	0,33	0,66	0,66	-0,60	0,64
32,50	-217,4	0,89	-218,7	0,94	-218,11	0,34	0,71	0,67	-0,63	0,64
35,00	-218,3	0,89	-220,2	0,92	-219,34	0,33	1,04	0,69	-0,81	0,60
37,50	-218,5	0,93	-220,5	0,93	-219,66	0,34	1,16	0,74	-0,82	0,59
40,00	-218,1	0,88	-220,1	0,93	-219,19	0,33	1,09	0,68	-0,88	0,61
42,50	-218,1	0,89	-219,6	0,92	-218,92	0,33	0,82	0,68	-0,68	0,62
45,00	-218,0	0,88	-219,4	0,92	-218,77	0,33	0,77	0,66	-0,67	0,63
47,50	-217,8	0,89	-219,5	0,92	-218,76	0,33	0,96	0,68	-0,77	0,61
50,00	-217,8	0,88	-219,4	0,92	-218,69	0,33	0,89	0,67	-0,75	0,62
52,50	-217,8	0,88	-219,2	0,93	-218,53	0,33	0,73	0,66	-0,64	0,63
55,00	-217,5	0,88	-219,0	0,93	-218,30	0,33	0,80	0,67	-0,70	0,63
57,50	-217,4	0,88	-218,7	0,92	-218,11	0,33	0,71	0,66	-0,62	0,63
60,00	-217,4	0,92	-218,7	0,96	-218,11	0,34	0,71	0,69	-0,62	0,65
62,50	-217,3	0,92	-218,8	0,93	-218,14	0,34	0,84	0,71	-0,67	0,61
65,00	-217,4	0,92	-218,8	0,93	-218,18	0,34	0,78	0,70	-0,63	0,62
67,50	-217,5	0,92	-218,8	0,92	-218,19	0,34	0,69	0,70	-0,57	0,62
70,00	-217,5	0,89	-218,7	0,92	-218,11	0,33	0,61	0,66	-0,54	0,63
75,50	-217,7	0,80	-218,8	0,92	-218,20	0,31	0,50	0,56	-0,56	0,67
80,00	-217,9	0,81	-218,9	0,92	-218,36	0,31	0,46	0,57	-0,51	0,67
85,00	-218,5	0,80	-219,2	0,93	-218,79	0,31	0,29	0,55	-0,36	0,69
90,00	-218,9	0,80	-219,8	0,93	-219,34	0,31	0,44	0,56	-0,51	0,68
95,00	-219,6	0,81	-220,1	0,96	-219,80	0,32	0,20	0,55	-0,27	0,72
100,0	-219,3	0,82	-219,4	0,93	-219,36	0,32	0,06	0,55	-0,08	0,71

Таблица 6

Результаты измерений модуля чувствительности
гидрофона RHS-6 в диапазоне частот от 110 до 500 кГц

Частота, кГц	ВНИИФТРИ		НААРИ		Опорные значения		Степени эквивалентности			
	M_{RU} , дБ	U_{RU} , дБ	M_{CN} , дБ	U_{CN} , дБ	M_{ref} , дБ	u_{ref} , дБ	d_{RU} , дБ	$U(d_{RU})$, дБ	d_{CN} , дБ	$U(d_{CN})$, дБ
110,0	-217,9	0,80	-218,3	0,93	-218,08	0,31	0,18	0,54	-0,23	0,71
120,0	-218,1	0,87	-218,4	0,94	-218,25	0,33	0,15	0,62	-0,16	0,69
130,0	-218,4	0,82	-219,0	0,95	-218,65	0,32	0,25	0,56	-0,31	0,71
140,0	-218,5	0,81	-219,4	0,96	-218,93	0,32	0,43	0,57	-0,51	0,71
150,0	-218,0	0,81	-218,8	0,96	-218,34	0,32	0,34	0,56	-0,42	0,72
160,0	-217,4	0,81	-218,2	0,96	-217,73	0,32	0,33	0,55	-0,42	0,72
170,0	-217,3	0,81	-218,4	0,96	-217,82	0,32	0,52	0,57	-0,61	0,71
180,0	-216,7	0,86	-217,8	0,94	-217,25	0,33	0,55	0,63	-0,55	0,67
190,0	-216,3	0,95	-217,7	0,95	-217,07	0,35	0,77	0,73	-0,61	0,63
200,0	-215,8	0,91	-216,8	0,95	-216,34	0,34	0,54	0,68	-0,49	0,66
210,0	-215,5	0,91	-216,3	0,93	-215,93	0,34	0,43	0,68	-0,39	0,64
220,0	-215,1	0,88	-215,8	0,94	-215,45	0,33	0,35	0,64	-0,35	0,67
230,0	-215,2	0,89	-216,4	0,96	-215,80	0,34	0,60	0,66	-0,57	0,67
240,0	-214,6	0,90	-215,2	0,97	-214,91	0,34	0,31	0,65	-0,33	0,70
250,0	-213,8	0,89	-214,8	0,99	-214,28	0,34	0,48	0,64	-0,50	0,71
260,0	-213,2	0,92	-214,1	0,95	-213,69	0,34	0,49	0,69	-0,44	0,65
270,0	-212,3	0,90	-213,3	0,99	-212,79	0,35	0,49	0,65	-0,50	0,71
280,0	-210,9	0,86	-212,0	0,95	-211,47	0,33	0,57	0,63	-0,57	0,67
290,0	-211,5	0,95	-212,9	0,96	-212,28	0,35	0,78	0,73	-0,63	0,64
300,0	-212,4	0,96	-213,8	0,99	-213,15	0,36	0,75	0,73	-0,62	0,66
310,0	-211,8	0,86	-213,0	0,97	-212,39	0,33	0,59	0,62	-0,62	0,69
320,0	-211,1	0,83	-211,8	0,94	-211,45	0,32	0,35	0,59	-0,40	0,69
330,0	-211,5	0,82	-212,3	0,93	-211,90	0,32	0,40	0,58	-0,45	0,68
340,0	-213,1	0,82	-214,2	0,95	-213,59	0,32	0,49	0,58	-0,56	0,69
350,0	-215,1	0,89	-216,2	0,94	-215,65	0,33	0,55	0,66	-0,51	0,65
360,0	-217,0	0,88	-217,5	0,97	-217,23	0,34	0,23	0,62	-0,26	0,71
370,0	-218,3	0,89	-218,7	0,94	-218,49	0,34	0,19	0,64	-0,20	0,68
380,0	-219,8	0,86	-219,8	0,94	-219,80	0,33	0,00	0,59	0,00	0,70
390,0	-221,3	0,90	-221,0	0,99	-221,17	0,35	-0,13	0,61	0,17	0,75
400,0	-222,7	0,95	-222,4	0,96	-222,53	0,35	-0,17	0,67	0,18	0,70
450,0	-225,6	0,92	-225,8	0,96	-225,68	0,34	0,08	0,65	-0,09	0,70
500,0	-230,0	0,94	-230,2	0,92	-230,10	0,34	0,10	0,69	-0,09	0,65

В таблицах 3–6 приняты следующие обозначения:

- M_i , φ_i и U_i — соответственно результаты калибровки (модуль и аргумент чувствительности) и расширенная суммарная неопределённость результата калибровки (при $k = 2$), заявленные i -м участником, $i = \{CN, RU\}$ — индекс участника сличений (CN — НААРИ, RU — ВНИИФТРИ);
- M_{ref} , φ_{ref} и u_{ref} — соответственно опорные значения сличений для модуля и аргумента чувствительности и их стандартные неопределённости;
- d_i и $U(d_i)$ — степени (уровни) эквивалентности и их неопределённости (при $k = 2$) i -го участника сличений.

Данные в таблицах 3–6 и зависимости на рис. 8 и 9 приведены с неопределённостями, оценёнными обоими участниками по результатам выполненных калибровок. Заявленные участниками неопределённости оказались выше ожидаемых до начала калибровок. Увеличение неопределённости результатов измерений обусловила кратковременная нестабильность гидрофона во время выполнения калибровок. При сравнении результатов выяснилось, что помимо кратковременной нестабильности имел место временной дрейф модуля чувствительности, вследствие которого за время между калибровками в НААРИ и ВНИИФТРИ, которое в силу известных обстоятельств составило пять месяцев, образовалось систематическое расхождение результатов.

Зависимости на рис. 8 показывают, что согласованность результатов измерения модуля чувствительности, представленных участниками с учётом кратковременной нестабильности, находится на пределе практически во всём диапазоне частот. Это можно объяснить только временным дрейфом гидрофона, вследствие которого на некоторых частотах (выделены красными рамками) согласованность нарушена.

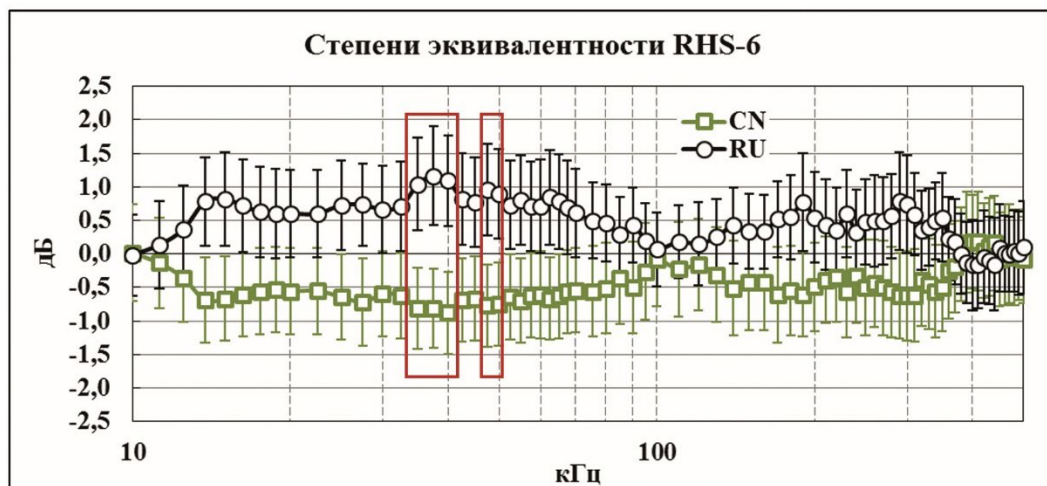


Рис. 8. Модуль чувствительности

Бóльший интерес представляют зависимости на рис. 9, по которым судили о согласованности результатов измерений аргумента чувствительности. Нарушение согласованности результатов также отмечено на рис. 9 красной рамкой. Обратим внимание, что красная рамка расположена вблизи частоты 100 кГц, где частотные зависимости модуля чувствительности сближаются, что свидетельствует о расхождении их формы. Это ещё раз подтверждает сделанный ранее вывод — там, где формы частотных зависимостей модуля различаются, там расходятся зависимости аргумента. Отмеченный рамкой участок частот даёт наиболее наглядное представление, однако подтверждения выводу можно найти почти на всех частотных участках, отмеченных стрелками, сопоставляя поведение зависимостей на рис. 6 и 9.

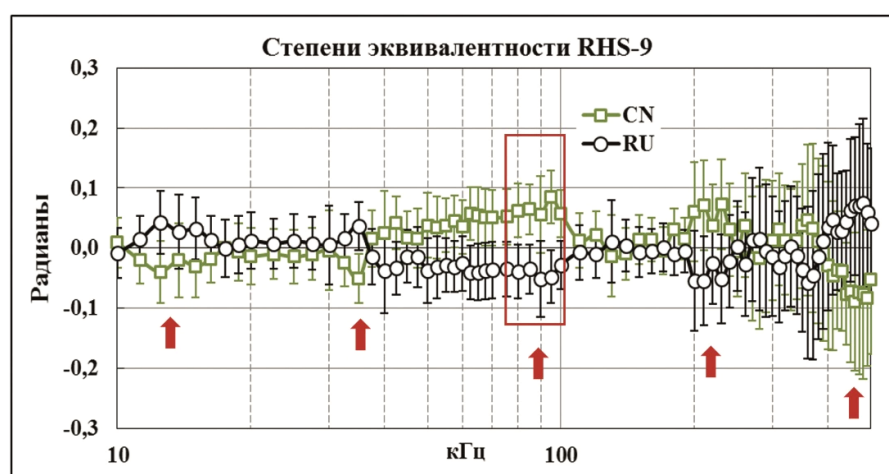


Рис. 9. Аргумент чувствительности

При рассмотрении зависимостей на рис. 9 можно сделать ещё один важный вывод. В отличие от [7, 8], где неопределённость и расхождения результатов возрастают пропорционально частоте, подобного поведения зависимостей на рис. 9 не наблюдается. Это позволяет сделать вывод, что, несмотря на проблемы с гидрофоном, методики измерений корректны и положение акустического центра гидрофона было определено правильно обоими участниками.

Выводы

Несмотря на идентичность форм представления результатов, смысл ключевых и пилотных сличений совершенно различен. Задача участника ключевых сличений — сдать экзамен, который заключается в том, чтобы подтвердить эквивалентность эталона. Задача участника пилотных сличений — подготовиться к этому экзамену. Для этого необходимо убедиться в правильности функционирования эталонной установки, отработать методики выполнения

измерений и постобработки полученных данных, выявить и дать правильную численную оценку источникам неопределённости, возможно, выявить ранее не учтённые источники неопределённости. Не редки случаи, когда наличие таких источников объясняет расхождения результатов сличений. В рассматриваемых пилотных сличениях выявлена единственная причина расхождения результатов — поведение опорного гидрофона, в то время как эталонные установки функционировали правильно, а методики выполнения измерений — корректны.

Заключение

Неопределённости измерений модуля чувствительности гидрофона эталонных установок, участвовавших в сличениях, близки и были неоднократно подтверждены предшествовавшими международными и ключевыми сличениями. В результате учёта кратковременной нестабильности опорного гидрофона, неопределённости у обоих участников увеличились также примерно одинаково. Аналогичная ситуация сложилась с неопределённостями результатов измерений аргумента чувствительности. Вместе с тем увеличение неопределённости для аргумента у обоих участников оказалось значительно меньше, чем для модуля. С одной стороны, это даёт участникам основания судить о стабильной работе своих эталонных установок по результатам измерения аргумента чувствительности. С другой — даёт информацию для выявления причин расхождения результатов сличений.

Проблемы с опорным гидрофоном не позволили исчерпывающим образом продемонстрировать измерительные возможности эталонов участников. Тем не менее задачи пилотных сличений можно считать выполненными, а сами сличения — полезными, поскольку участники приобрели необходимый опыт для организации и выполнения сличений аргумента чувствительности гидрофона.

Полученные результаты дают основания для проведения сличений результатов амплитудно-фазовых калибровок в расширенном составе участников. Соответствующее предложение будет внесено на рассмотрение при обсуждении результатов сличений 786/RU-a/19 на очередном совещании ТК1.2 «Акустика, ультразвук, вибрация» KOOMET.

Список литературы

1. МЭК 60565-1 2020. Подводная акустика. Гидрофоны. Калибровка гидрофонов. Часть 1. Процедуры калибровки гидрофонов в свободном поле.
2. Theobald P.D., Robinson S.P., Thompson A.D., Preston R.C., Lepper P.A., Wang Yuebing Technique for the calibration of hydrophones in the frequency range 10 to 600 kHz using a heterodyne interferometer and an acoustically compliant membrane // J. Acoust. Soc. Am. — 2005. — V. 118 (5). — P. 3110–3116.

3. Theobald P., Robinson S., Thompson A. The calibration of hydrophones by a novel optical technique in the frequency range 10 to 600 kHz // Proceedings of the International Conference “Underwater Acoustic Measurements: Technologies & Results”. — Heraklion, Crete, Greece, 28th June — 1st July 2005. — URL: https://www.researchgate.net/publication/266053932_THE_CALIBRATION_OF_HYDROPHONES_BY_A_NOVEL_OPTICAL_TECHNIQUE_IN_THE_FREQUENCY_RANGE_10_KHZ_TO_600_KHZ.
4. Luker L.D., Van Buren A.L. Phase calibration of hydrophones // J. Acoust. Soc. Am. — 1981. — V. 70. — P. 516–519.
5. 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.
6. Исаев А.Е., Хатамтаев Б.И. Определение фазочастотной характеристики гидрофона по амплитудно-частотной характеристике // Измерительная техника. — 2021. — № 7. — С. 48–53.
7. Hayman G., Robinson S. Phase calibration of hydrophones by the free-field reciprocity method // Proceeding 11th Europ. Conf. on Underwater Acoustics. — Edinburgh, 2012. — P. 1437–1444.
8. Hayman G., Wang Y., Robinson S.P. A comparison of two methods for phase response calibration of hydrophones in the frequency range 10–400 kHz // J. Acoust. Soc. Am. — 2013. — V. 133 (2). — P. 750–759.

Статья поступила в редакцию: 15.11.2022 г.

Статья прошла рецензирование: 10.11.2022 г.

Статья принята в работу: 21.11.2022 г.