

На правах рукописи



Николаенко Алексей Сергеевич

Разработка и исследование методов определения чувствительности
гидроакустического приёмного устройства с элементами конструкции,
рассеивающими звук на первичный преобразователь

05.11.06 Акустические приборы и системы

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений» (ФГУП «ВНИИФТРИ»).

Научный руководитель: доктор технических наук, начальник отдела 51
ФГУП «ВНИИФТРИ»
Исаев Александр Евгеньевич

Официальные
оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор,
главный научный сотрудник АО «Акустический
институт им. академика Н. Н. Андреева»
Егеров Сергей Викторович;
кандидат технических наук, заместитель
генерального директора ОАО «НПО «Гидромаш»
Брайнин Борис Павлович

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Главный научный метрологический центр Министерства обороны Российской Федерации», г. Мытищи.

Защита состоится «02» июля 2020 г. на заседании диссертационного совета Д 308.005.01 в ФГУП «ВНИИФТРИ», 141570 п/о Менделеево, Солнечногорский район, Московская обл.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГУП «ВНИИФТРИ» http://www.vniiftri.ru/images/docs/diss/nikolaenko/Nikolaenko_diss.pdf.

Автореферат разослан «___» апреля 2020 г.

Учёный секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук

М.В. Балаханов

1 ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

1.1 Актуальность темы исследования

В настоящее время проблема борьбы с шумом актуальна не только для воздушной, но и подводной акустики. Развитие судоходства и активное освоение шельфа приводит к росту шумового загрязнения моря и ухудшению экологической обстановки в прибрежных зонах мирового океана, негативно влияет на естественный ареал обитания живых организмов и нарушает их жизнедеятельность. Для объективной оценки шумового воздействия на морскую экосистему требуются метрологически обеспеченные методы и средства измерений (СИ) подводного шума (ПШ).

Погрешность прогнозирования шумового загрязнения моря с учетом неопределенности входных параметров и распространения звука не должна превышать 3 дБ (WG «Lärm/Energie» Report № M100004/64, Federal Agency for Nature Conservation of Germany). Соответственно, локальные измерения уровня шума в морской акватории необходимо выполнять с неопределенностью от 1 до 1,5 дБ. Допуска на неопределенность измерений излучаемого судном уровня ПШ – от 1,5 дБ для точного метода (grade A) до 3 дБ для инженерного (grade B) (ANSI S 12.64-2009).

При оценке шумового воздействия на морскую биологическую жизнь наиболее важным является диапазон частот ниже 1 кГц. Самыми опасными для морской фауны признаны частоты от 63 Гц до 125 Гц (Marine Strategy Framework Directive 2008/56/EC).

Для сравнения, в воздушной акустике единство измерений шума опирается на отработанные методики выполнения измерений и СИ, характеристики и конструкция которых адекватны этим методикам, методы калибровки подчинены задачам измерений. Все указанные аспекты измерений шума в воздухе отражены в системе гармонизированных стандартов. В свою очередь, единство измерений ПШ опирается только на рекомендации Международной электротехнической комиссии (МЭК; англ. International Electrotechnical Commission, IEC) по калибровке гидрофонов: на частотах выше 1 кГц – калибровка гидрофона по полю, используя гармонические сигналы; ниже 1 кГц – калибровка по давлению в камере малого объема (КМО).

В натурных условиях ПШ измеряют не гидрофоном, как таковым (по сути, первичный преобразователь), а с помощью гидроакустического приёмного устройства (ГПУ¹). Но метрологические характеристики (в первую

¹ Здесь и далее, под ГПУ подразумевается гидрофон в совокупности со вспомогательными устройствами и конструкциями, существенно превосходящими его по размерам.

очередь, речь идёт о частотных и направленных свойствах чувствительности²⁾ ГПУ могут существенно отличаться от характеристик установленного в него гидрофона. При этом, отсутствие методов определения характеристик ГПУ приводит к тому, что калибруется только гидрофон, а влияние вспомогательных устройств и конструкций ГПУ учитывается на основании расчётных методов. Для получения объективной количественной оценки (калибровки) чувствительности ГПУ необходимо определить или разработать соответствующие методы.

Сложности при определении чувствительности ГПУ по полю на частотах выше 1 кГц, в значительной степени, вызваны рассеянием звука элементами конструкции ГПУ на гидрофон, которое приводит к возникновению осцилляций – череды пиков и глубоких провалов на частотной характеристике чувствительности (ЧХЧ), обуславливающих неприемлемо большую составляющую неопределенности результата измерений ПШ. Методы калибровки гидрофонов по давлению на частотах ниже 1 кГц неприменимы к ГПУ, как минимум, из-за его габаритов.

Современные СИ, доступные вычислительные мощности и методы обработки измерительной информации (например, метод скользящего комплексного взвешенного усреднения (СКВУ), разработанный во ВНИИФТРИ) предоставляют возможность преодолеть обозначенные выше трудности. И если улучшить акустические свойства ГПУ совершенствованием методов калибровки невозможно, то целесообразно определить и корректно учесть характеристики ГПУ в результатах измерений.

Согласно законам акустики, рассеяние звука на препятствии уменьшается со снижением частоты и чувствительность ГПУ должна сходиться к чувствительности установленного в нём гидрофона. Поэтому дополнительно, для измерения ПШ важно решение задачи продления диапазона калибровки ГПУ по полю до столь низких частот, на которых влияние дифракции звука на корпусе ГПУ пренебрежимо мало, и чувствительность ГПУ совпадает с чувствительностью гидрофона.

Таким образом, актуальность работы обусловлена как отсутствием способов объективной оценки и учета частотных и направленных свойств ГПУ, так и методов низкочастотных измерений по полю, применимых для калибровки ГПУ. Это является препятствием для получения достаточно точной оценки шумового антропогенного воздействия при решении задач мониторинга и прогнозирования состояния морской экосистемы.

²⁾ Под чувствительностью понимается зависимость между значениями величин на входе и выходе СИ, полученная экспериментально.

1.2 Степень разработанности темы исследования

В 80-х годах во ВНИИФТРИ Кирилов В.А. и Бычков В.Б. обратили внимание на большую неравномерность ЧХЧ гидроакустических измерительных устройств, искажённую осцилляциями в следствии рассеяния звука элементами конструкции. В 90-е годы Платоновым В.А. и Албулом В.И. были предприняты попытки в условиях лабораторного бассейна оценить акустические свойства измерительных устройств с использованием метода спектрометрии временных задержек. Несовершенство аналоговой техники и недостаточная точность применявшихся методов, ограниченные возможности низкочастотных измерений, нарушение критерия дальнего поля на высоких частотах снижали достоверность полученных количественных оценок и не позволили внедрить комплектную калибровку гидроакустических измерительных устройств в метрологическую практику.

В начале 2000-х годов во ВНИИФТРИ Некрасов В.Н. и Кособродов Р.А. исследовали дифракцию звуковой волны на поверхности носителя аппаратуры и её влияние на результаты гидроакустических измерений. На основании результатов теоретических расчётов и экспериментов, для автономной буйковой станции в виде полый сферической оболочки, определена зависимость искажения звукового поля вблизи носителя от частоты, механических параметров корпуса носителя и места установки измерительного гидрофона. Сделан вывод о необходимости учета данного явления при проведении натурных гидроакустических измерений.

В 2005 г. в Нижегородском государственном университете Наумов С.С. опубликовал свои диссертационные исследования, в которых отметил несовершенство системы калибровки гидроакустических средств из-за недоучёта влияния обтекателя и вспомогательных конструкций на чувствительность преобразователя.

С 2015 г. под эгидой Европейской ассоциации национальных метрологических институтов (EURAMET) осуществляется научно-исследовательский проект 15RPT02 (UNAC-LOW) «Стандарты подводной акустической калибровки для частот ниже 1 кГц». Целью проекта является развитие метрологических возможностей в области подводной акустической калибровки в диапазоне частот от 20 Гц до 1 кГц для удовлетворения потребности в калибровке гидрофонов и автономных регистраторов ПШ (а это не что иное, как ГПУ). На сегодняшний день, в качестве результатов работы в рамках проекта, представлены только несколько статей в профильных журналах.

1.3 Цели и задачи

Цель исследования – определение чувствительности ГПУ в бассейне с отражающими звук границами в соответствии с задачей измерений (измерение ПШ с фиксированного направления, шума источника, перемещающегося в заданном угловом секторе, или окружающего шума).

Основная задача – разработать, реализовать и исследовать методы определения чувствительности ГПУ, обеспечивающие учёт его частотных и направленных свойств.

Поставленная задача потребовала решения ряда частных задач:

- разработать метод определения в бассейне с отражающими звук границами ЧХЧ по свободному полю приёмника на частотах ниже 1 кГц;
- подтвердить корректность разработанного метода при измерениях существенно неравномерной ЧХ;
- разработать способ определения положений доминирующих источников рассеяния звука на элементах конструкции ГПУ;
- предложить решения по уменьшению рассеяния звука элементами конструкции ГПУ и проверить их эффективность.

Объект исследования – разработка новых методов и приборов для гидроакустических измерений в научных, экологических и технологических целях.

Предмет исследования – методы определения чувствительности ГПУ с учётом его направленных и частотных свойств.

1.4 Научная новизна

а) Разработан и реализован метод определения ЧХЧ по свободному полю приёмника в бассейне с отражающими звук границами на частотах ниже 1 кГц.

б) Разработан и экспериментально проверен способ определения положений доминирующих источников рассеяния звука на элементах конструкции ГПУ.

в) Разработан и экспериментально проверен способ восстановления искомой ЧХЧ ГПУ по свободному полю, искаженной постобработкой по методу СКВУ.

г) Предложены методы определения чувствительности ГПУ для измерений шума с фиксированного направления, шума в заданном угловом секторе и окружающего шума.

д) Разработан и экспериментально проверен способ измерений частотной зависимости коэффициента отражения звука в условиях бассейна.

1.5 Теоретическая и практическая значимость работы

Результаты исследования обеспечили возможность:

- расширить частотный диапазон передачи единицы звукового давления по полю в бассейне за счёт уменьшения нижней границы диапазона с 1 кГц до 125 Гц;
- выполнить калибровки опорного гидрофона ключевых сличений ССАUV/W-K2 на частотах от 125 Гц до 1 кГц с расширенной неопределенностью 0,4 дБ ($k=2$);
- уменьшить до 0,2 дБ составляющую погрешности измерений ЧХЧ ГПУ, обусловленную отличием характеристики пропускания пространственного фильтра, применяемого для подавления влияния отражений в бассейне, от прямоугольной;
- выполнять исследования акустических свойств ГПУ, включая влияние обтекателя, на частотах ниже 1 кГц;
- предложить технические решения по уменьшению рассеяния звука элементами конструкции ГПУ;
- учитывать направленные и частотные свойства ГПУ при измерениях шума, путём использования чувствительности в полосе частот и угловом секторе, рассчитанной по набору ЧХЧ при различных углах падения звука;
- получать непрерывные частотные зависимости коэффициента отражения для различных углов падения звука, при исследованиях акустических свойств поверхностей и звукопоглощающих покрытий.

Результаты работы использованы:

- при калибровке опорного гидрофона на частотах ниже 1 кГц на ключевых сличениях ССАUV/W-K2;
- в рабочем эталоне МБ2 «Стенд для исследований влияния конструкции приёмных модулей на акустические характеристики измерительных гидрофонов»;
- при исследованиях акустических свойств обтекателя гидроакустической приёмной системы «Батарея-ТОФ»;
- при исследованиях и оценке свойств звукопоглощающих покрытий бассейна при выполнении НИР «Покрытие».

Использование результатов работы подтверждено Актом о внедрении ФГУП «ВНИИФТРИ».

Публикация с описанием разработанного метода низкочастотной калибровки гидрофона в лабораторном бассейне включена в библиографию стандарта МЭК 60565-1 FDIS.

1.6 Методология и методы исследования

В соответствии с целью исследования, на основании анализа имеющихся методических и технических возможностей (известных методов калибровки по полю приёмников в условиях, отягощенных реверберацией звука в звукомерном помещении, эталонных установок для воспроизведения и передачи единиц гидроакустических величин в условиях лабораторного бассейна), в качестве предмета исследований выбраны методы определения чувствительности ГПУ с учётом его направленных и частотных свойств.

При разработке метода измерений ЧХЧ приёмника в реверберационном звуковом поле лабораторного бассейна, для преодоления ограничений нижней частоты измерений из-за конечного разрешения измерений по частоте, было предложено:

- усовершенствовать метод СКВУ с ЛЧМ-сигналом дополнением прямой развёртки сигнала обратной, с сохранением непрерывности фазы при переходе частоты через ноль;
- рассматривать экспериментально полученную частотную характеристику (ЧХ) на всей комплексной плоскости;
- корректировать полученную ЧХ на известную частотную зависимость излучения;
- применить интерполяцию ЧХ вблизи ноля оси частот на интервале превалирования шумовой помехи.

Для проверки правильности принятых решений, лежащих в основе разработанного метода, выполнен ряд экспериментов:

- сравнение результатов низкочастотной калибровки гидрофона, полученных разработанным методом в лабораторном бассейне и стандартным методом в КМО;
- моделирование и измерение существенно неравномерной частотной зависимости с заранее определёнными параметрами;
- измерение ЧХЧ опорного гидрофона в рамках ключевых сличений;
- измерение ЧХЧ массогабаритной модели ГПУ.

На основании полученных результатов исследования, предложены методы определения чувствительности ГПУ для различных задач – измерения ПШ с фиксированного направления, шума источника, перемещающегося в угловом секторе, и окружающего шума.

1.7 Положения, выносимые на защиту

1. Разработан метод измерений ЧХЧ ГПУ по полю в условиях незаглушенного бассейна, основанный на использовании априорной информации о характеристике излучения для коррекции и интерполяции экспериментальной зависимости на низких частотах, который позволяет для

бассейна с минимальным размером 6 м расширить диапазон измерений в область низких частот от 1 кГц на 3 октавы.

2. Предложены решения по совершенствованию конструкции ГПУ, которые позволили уменьшить влияние рассеяния звука элементами конструкции на неравномерность ЧХЧ исследуемого ГПУ с 18 до 2 дБ.

3. Предложен способ восстановления экспериментальной ЧХЧ ГПУ по полю, искаженной постобработкой по методу СКВУ, основанный на коррекции характеристики пропускания пространственного фильтра и позволяющий уменьшить вносимую постобработкой составляющую погрешности до пренебрежимо малой величины 0,2 дБ.

4. Предложен метод расчёта чувствительности ГПУ, основанный на учёте его направленных и частотных свойств, который позволяет получать чувствительность ГПУ в соответствии с измерительной задачей – измерение окружающего шума, шума с фиксированного направления или в заданном угловом секторе.

1.8 Степень достоверности и апробация работы

Достоверность полученных в работе результатов подтверждена:

- малым отличием результатов сравнения калибровок гидрофона в гидроакустическом бассейне и в КМО;
- положительными результатами ключевых сличений ССАUV/W-K2;
- малым отличием измеренных значений фазового сдвига отраженной звуковой волны и коэффициента отражения звука от границ раздела вода-воздух от справочных значений;
- результатами исследований акустических свойств обтекателя приёмной системы «Батарея-ТОФ»;
- результатами исследований акустических свойств массогабаритного макета автономного регистратора ПШ «AURAL-M2».

Основные положения и результаты работы были представлены, обсуждены и одобрены:

- на научно-практической конференции «Гидроакустика», ФГУП «ВНИИФТРИ», п. Менделеево, 2015 г.;
- на IV научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и специалистов ФГУП «ВНИИФТРИ» «Метрология в XXI веке», п. Менделеево, 2016 г.;
- на 45-ом международном конгрессе и выставке «INTER-NOISE 2016», Германия, г. Гамбург, 2016 г.;
- на 11-м совещании Консультативного комитета по акустике, ультразвуку и вибрации (ССAUV CIPM), Франция, г. Париж, 2017 г.;

- на совещании технического комитета по акустике, ультразвуку и вибрации EURAMET, Великобритания, г. Теддингтон, 2018 г.;
- на 14-й всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» (ГА-2018), Концерн «Океанприбор», г. Санкт-Петербург, 2018 г.;
- опубликованы в журналах «Измерительная техника», «Акустический журнал» и «Альманах современной метрологии», рекомендованных ВАК, сборниках конференций.

2 СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения с основными результатами работы, списка цитируемой литературы.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели, задачи, объект и предмет исследования, основные положения, выносимые на защиту, отмечена научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены сведения об апробации результатов работы.

В главе 1 выполнен аналитический обзор применяемых в воздушной и подводной акустике методов калибровки по полю приёмников в условиях, отягощенных реверберацией звука в звукомерном помещении. Особое внимание уделено преимуществам и недостаткам использования для калибровки сигналов различного вида, а также способам подавления реверберационных искажений.

При калибровке гидрофона по полю в незаглушенном бассейне наиболее часто используют тонально-импульсный сигнал – обеспечивается достаточная помехозащищенность и высокая точность, однако частотный диапазон измерений по полю ограничен снизу частотой 1 кГц. Использование ЛЧМ-сигнала сочетает в себе простоту реализации, малое время измерений, высокую помехозащищенность и точность. Шумовой сигнал позволяет создать стационарное звуковое поле, в котором состав спектральных компонент не меняется в течение эксперимента, но значительно уступает тональному импульсу и ЛЧМ-сигналу по помехозащищенности.

Тонально-импульсный сигнал наименее пригоден для определения чувствительности такого габаритного устройства, как ГПУ для измерений ПШ. Если на частоте 1 кГц влияние рассеяния звуковой волны на корпусе гидрофона пренебрежимо мало, то для ГПУ это не так однозначно и требуется объективная оценка.

В отличие от тонально-импульсного сигнала ЛЧМ и шумовой сигналы позволяют измерять ЧХЧ ГПУ с приемлемой точностью, однако малая помехозащищенность шумового сигнала не позволяет использовать его на низких частотах, на которых эффективность излучателя падает.

Большое значение имеет способ обработки, применяемый для подавления искажений ЧХ, обусловленных влиянием реверберации звука в бассейне. Наиболее известные способы – тонально-импульсный метод, метод СКВУ, спектрометрия временных задержек и гомоморфная время-селективная постобработка. Среди них, именно СКВУ обеспечивает наилучшее разрешение по частоте, что является решающим фактором для измерений на низких частотах.

При разработке метода измерений ЧХЧ ГПУ на низких частотах было отдано предпочтение сочетанию излучения ЛЧМ-сигнала и обработки принятого сигнала по методу СКВУ. Наиболее важной задачей было расширить диапазон измерений по полю до таких низких частот, на которых влиянием рассеяния звука корпусом ГПУ на чувствительность можно пренебречь.

Глава 2 посвящена разработке и экспериментальной проверке метода определения ЧХЧ приёмника по полю на низких частотах в условиях незаглушенного бассейна.

Основные причины, препятствующие выполнению калибровки на низких частотах в воздушной акустике – малая излучающая способность громкоговорителя и ограничения размера клина безэховой камеры, в гидроакустике – крутой наклон измеряемой частотной зависимости пары излучатель-приёмник и конечное разрешение измерений по частоте. Наклон измеряемой ЧХ задают частотные зависимости тока излучателя (может быть определена в процессе измерений) и параметра взаимности (рассчитывается по значениям частоты, опорного расстояния и плотности воды). К тому же, участок ЧХ, прилегающий к нулю оси частот, скрыт шумовой помехой, но этот участок достаточно узкий. Что касается частотного разрешения, то улучшить его невозможно, поскольку оно определяется размерами бассейна.

Далее, изложена суть предлагаемого метода измерений ЧХЧ приёмника. Излучаются продолжительные (обеспечивая высокое разрешение по частоте) косинусный и синусный ЛЧМ-сигналы, частота которых уменьшается до нуля, а затем, сохраняя непрерывность фазы сигнала при переходе частоты через ноль, увеличивается до начального значения. Регистрируется ток излучателя и выходное напряжение приёмника. Из записей косинусного и синусного сигналов тока (рисунок 1а) и напряжения (рисунок 1б) образуются комплексные формы сигналов тока излучателя и напряжения приёмника.

Комплексным делением сигнала напряжения на сигнал тока получается комплексная частотная зависимость ПИ пары излучатель-приёмник в реверберационном звуковом поле бассейна, которая корректируется на частотную зависимость параметра взаимности. Искажения полученной частотной зависимости шумовой помехой, превалирующей над полезным сигналом в узком интервале частот (симметричном относительно нуля, на рисунке 1в выделен прямоугольником), устраняются интерполяцией.

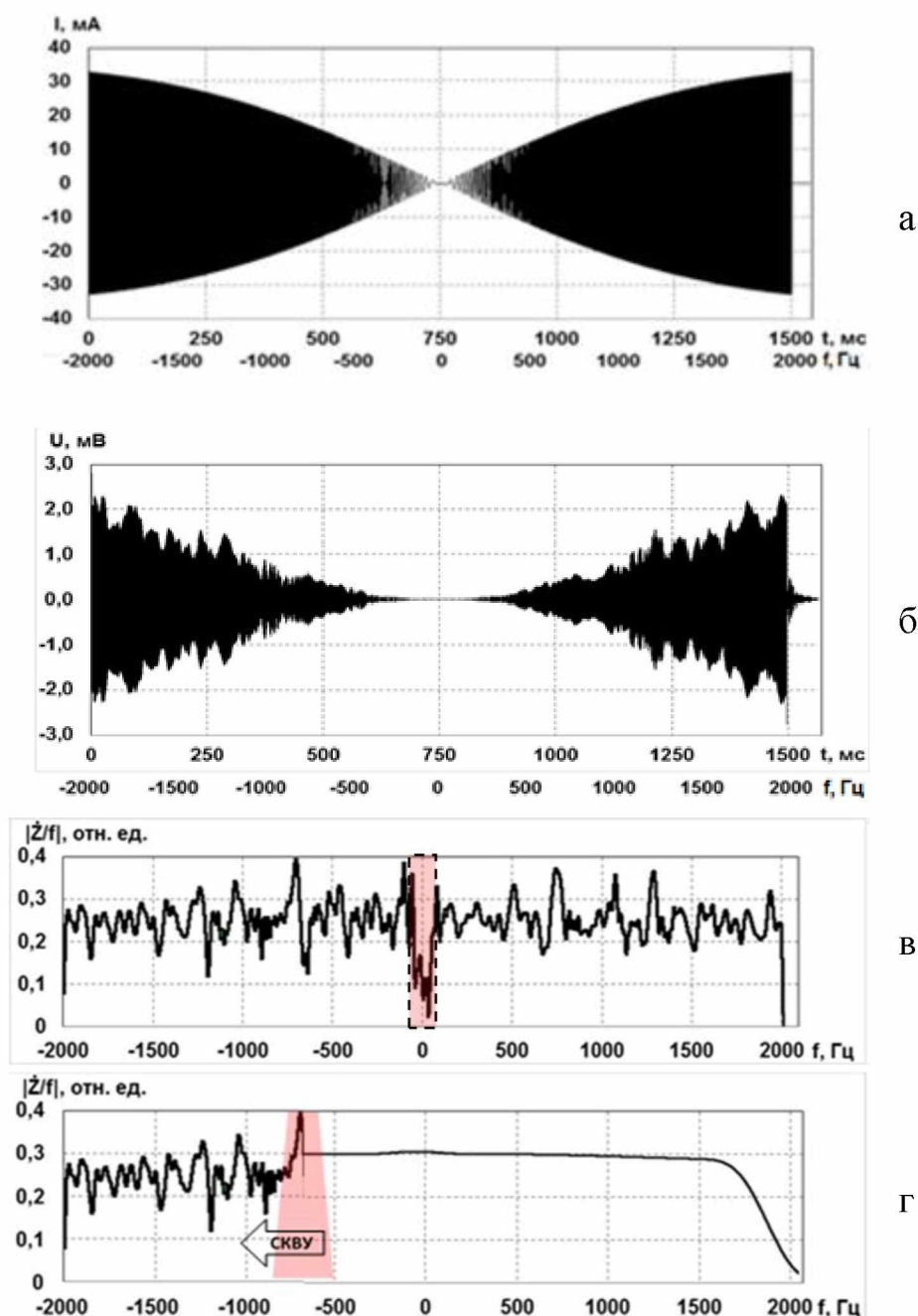


Рисунок 1 – Этапы метода измерений ЧХЧ ГПУ

Реверберационные оцилляции частотной зависимости подавляются обработкой по методу СКВУ. Обработка приводит к ухудшению разрешения

по частоте, однако, позволяет получать результат на самых низких частотах (рисунок 1г). После обработки, часть зависимости, расположенная справа от ноля на рисунке 1г, рассматривается как частотная зависимость ПИ пары излучатель-приёмник по полю и используется для расчета чувствительности приёмника.

Практическое преимущество предложенного метода – нижнюю частоту измерений по полю в бассейне определяет не разрешение по частоте, а соотношение сигнал/шум в эксперименте, что позволяет получать результат измерений на частотах до десятков герц.

Метод реализован в программно-аппаратном комплексе, включающем программные модули формирования сигнала излучения, коррекции и интерполяции экспериментальной частотной зависимости, операции с комплексными сигналами, окна пользовательского интерфейса.

Для проверки правильности принятых решений были выполнены эксперименты по низкочастотной калибровке гидрофона. В качестве излучателя применяли обратимый гидрофон ИТС1001 с активным элементом диаметром 100 мм. На рисунке 2 приведены ЧХЧ гидрофона В&К 8104, полученные в КМО ГЭТ 55-2017 (ряд 1) и в бассейне на расстояниях 3,0 и 1,5 м от ближайшей отражающей поверхности (ряды 2 и 3 соответственно).

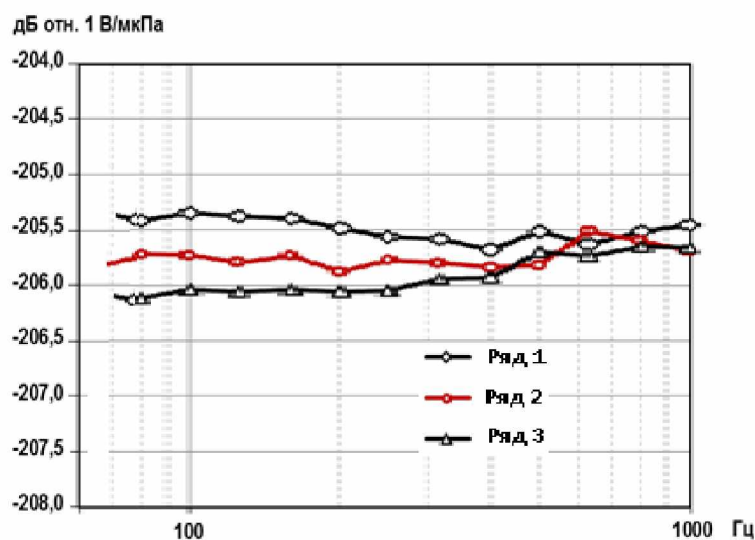


Рисунок 2 – Результаты калибровки гидрофона на низких частотах

Расхождение результатов калибровок в КМО и в бассейне не превосходят 0,3 дБ, что находится в пределах точности первичного эталона. Различия результатов калибровок в бассейне, при различающемся вдвое разрешении по частоте (ряды 2 и 3), не превысили 0,6 дБ, что существенно меньше погрешности рабочих эталонов для калибровки измерительных гидрофонов 1,0–1,5 дБ. Ухудшение частотного разрешения не сказалось на

близости результатов калибровки по полю и по давлению, что можно интерпретировать, как подтверждение возможности выполнять в бассейне малых размеров калибровку гидрофона по полю на «сверхнизких» для бассейна частотах.

Применение предложенного метода на ключевых сличениях ССАUV.W-K2 (одной из основных задач которых было установление предельной нижней частоты калибровки гидрофона по полю) позволило ВНИИФТРИ представить данные на частотах от 125 Гц, в то время как другие лаборатории – только от 250 Гц. Расширенная неопределенность результатов калибровок на частотах от 125 Гц до 1 кГц была оценена не превосходящей 0,4 дБ при коэффициенте охвата $k = 2$.

Публикация [2] с описанием разработанного способа низкочастотной калибровки гидрофона (защищён патентом РФ № 2655049) включена в библиографию стандарта МЭК 60565-1 FDIS.

Изложенные выше, результаты подтвердили возможность использования предложенного метода для гидрофона с плоской ЧХ. Однако, характеристика реального ГПУ искажена осцилляциями. Когда вблизи гидрофона находятся источники рассеяния звука и ГПУ имеет существенно неравномерную ЧХЧ, прямой путь подтверждения корректности метода – использование эталона рассеяния звука. Поскольку такого эталона не существует, чтобы количественно оценить точность разработанного метода предложено:

- вместо эталона рассеяния использовать «эталонное» отражение звука от границ раздела сред вода-воздух (значение фазы и модуля коэффициента отражения известны и не зависят от частоты);
- в измеряемую ЧХ внести искажение с заранее рассчитанными параметрами, вызванное отраженной звуковой волной;
- параметры внесенного искажения определить после подавления методом СКВУ влияния всех отражений, кроме отражения от границы вода-воздух;
- сравнить измеренные параметры искажения с расчётными.

Излучатель и гидрофон располагаются в бассейне так, чтобы первым по времени прихода отраженным сигналом был сигнал от границы вода-воздух.

Обработкой по методу СКВУ из комплексной частотной зависимости ПИ пары излучатель-приёмник в реверберационном звуковом поле бассейна получается комплексная частотная зависимость по полю $\dot{Z}_{св}(f)$ и зависимость $\dot{Z}_{отр}(f)$, в которой сохранена осцилляция отражения от границы вода-воздух

(рисунок 3). Параметры внесенного искажения $\dot{W}_{отр}(f)$ определяются по формуле (1):

$$\dot{W}_{отр}(f) = \frac{\tau_1}{\tau_0} G^{-1}(\tau_1) \left[\frac{\dot{Z}_{отр}(f)}{\dot{Z}_{св}(f)} - 1 \right] e^{j2\pi f(\tau_1 - \tau_0)}, \quad (1)$$

где τ_0 и τ_1 – временные задержки прямого сигнала излучателя и отраженного сигнала, соответственно;

$G(\tau_1)$ – коэффициент пропускания пространственного фильтра, реализуемого обработкой по методу СКВУ.

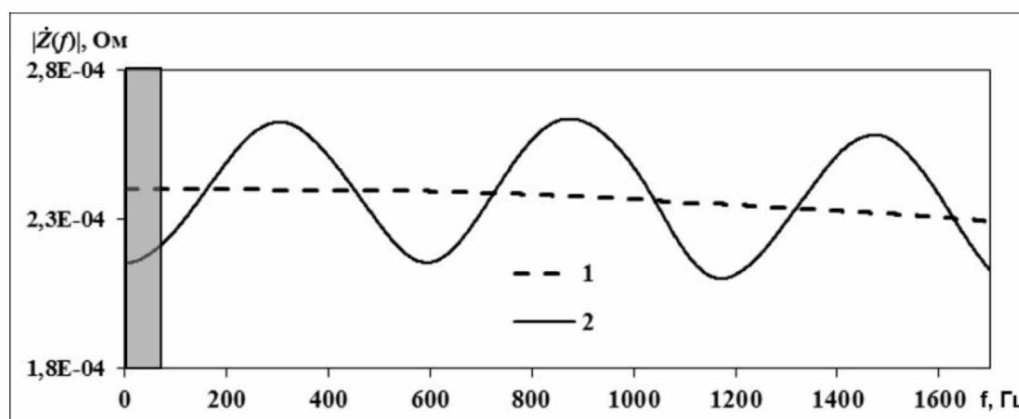


Рисунок 3 – Модули частотных зависимостей $\dot{Z}_{св}(f)$ (кривая 1) и $\dot{Z}_{отр}(f)$ (кривая 2), полученные в эксперименте с границей раздела сред вода-воздух

Значение модуля комплексного коэффициента отражения звука в эксперименте составило 98,7 %, аргумент (фаза коэффициента отражения) $\varphi_{отр} \approx \pi$, что весьма близко к теоретическому значению.

Результаты эксперимента, выполненного с отражением от границы раздела сред вода-железобетон, не противоречат характеру отражений звука от среды с более высоким волновым сопротивлением – получено значение $\varphi_{отр} \approx 0$, то есть отражение происходит с сохранением фазы.

Предложенный подход позволил не только подтвердить корректность метода при измерениях неравномерной ЧХЧ приёмника, но и привёл к созданию нового способа измерений частотной зависимости коэффициента отражения звука от поверхности (патент РФ № 2655478).

Глава 3 посвящена применению разработанного метода для определения ЧХЧ ГПУ.

Были созданы измерительный стенд, координатное устройство и массогабаритная модель ГПУ – широко распространенного автономного гидроакустического регистратора «AURAL-M2» (гидрофон В&К 8104, установленный на герметичный цилиндрический корпус из нержавеющей стали высотой 400 мм и диаметром 150 мм). Результаты эксперимента по

измерению ЧХЧ модели регистратора при изменении угла падения звуковой волны от 0° до 360° на частотах от 70 Гц до 3 кГц представлены на рисунке 4. Расхождение частотных зависимостей носит закономерный характер и уменьшается с уменьшением частоты, что согласуется с общими законами акустики.

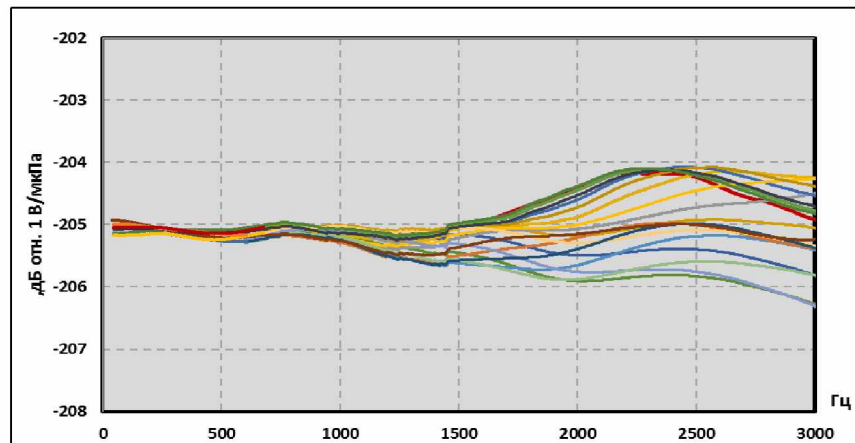


Рисунок 4 – ЧХЧ модели регистратора на низких частотах

Вместо расчётных оценок, получены объективные количественные данные. Это позволяет определить диапазон частот, в котором расхождение чувствительности модели регистратора и установленного на нём гидрофона, не превышает допуска. Соответственно, в этом частотном диапазоне в качестве чувствительности регистратора допустимо использовать чувствительность гидрофона.

Расхождение зависимостей на частоте 3 кГц немногим превышает 2 дБ и уменьшается до 0,3 дБ на частоте 1 кГц. Размах осцилляций на частотах ниже 1 кГц не превосходит 0,2 дБ. Зависимости сходятся к чувствительности гидрофона на частоте 250 Гц. Такое поведение зависимостей на низких частотах характерно для акустических приёмников с микрофоном, вынесенным из корпуса.

Разработанный метод позволяет следить за развитием дифракционных искажений начиная с момента их зарождения на столь низких частотах, на которых до недавнего времени не определяли ЧХЧ по полю не только ГПУ, но и гидрофона. Наибольшее изменение чувствительности регистратора в угловом секторе $\pm 70^\circ$ по вертикали и $\pm 22,5^\circ$ по горизонтали не превосходит 0,7 дБ, что удовлетворяет требованиям к приёмнику при измерениях шума судна по классу А (ANSI S12.64-2009). При всех направлениях падения звука на частотах до 3 кГц, включительно, чувствительность регистратора отличается от чувствительности гидрофона не более чем на $\pm 1,2$ дБ. Совместный вклад зависимости дифракционных эффектов от частоты и угла

падения звуковой волны немногим превосходит типичную погрешность калибровки измерительного гидрофона. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что на частотах ниже 3 кГц возможно применение регистратора для измерений окружающего шума, как ненаправленного приёмника в диффузном звуковом поле.

На частотах выше 3 кГц поведение ЧХЧ регистратора резко меняется. На рисунке 5 приведены ЧХЧ для углов падения звуковой волны от 0° до 70° во фронтальном секторе, которые хорошо согласуются с результатами калибровки AURAL-2M тонально-импульсным методом в Национальной физической лаборатории Великобритании. Неравномерность частотных зависимостей превышает 17 дБ, что ставит под сомнение саму возможность применять на этих частотах регистратор как СИ.

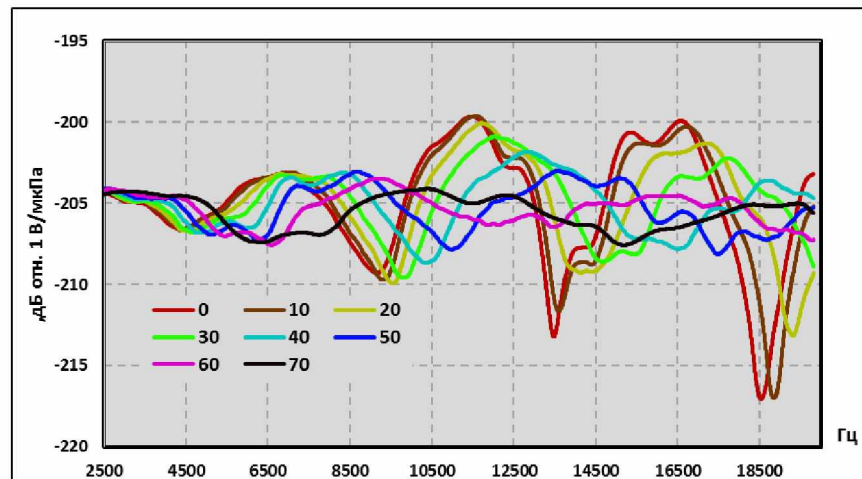


Рисунок 5 – ЧХЧ модели регистратора во фронтальном секторе углов падения звуковой волны

По набору частотных зависимостей при различных углах падения звуковой волны, можно обнаружить наличие нескольких значимых источников рассеяния на корпусе регистратора, и изменение их влияния на ЧХЧ при изменении угла падения звуковой волны.

Для выявления источников рассеяния предложено использовать кепстральные характеристики, полученные преобразованием Фурье ЧХЧ регистратора. По совокупности кепстральных характеристик можно отследить изменение задержки рассеянной источником звуковой волны в зависимости от угла падения на регистратор. На трёхмерном рисунке 6 показаны: по вертикали – разность хода прямой и рассеянной волн; по горизонтали – угол падения волны; градациями цвета – значение кепстральной характеристики.

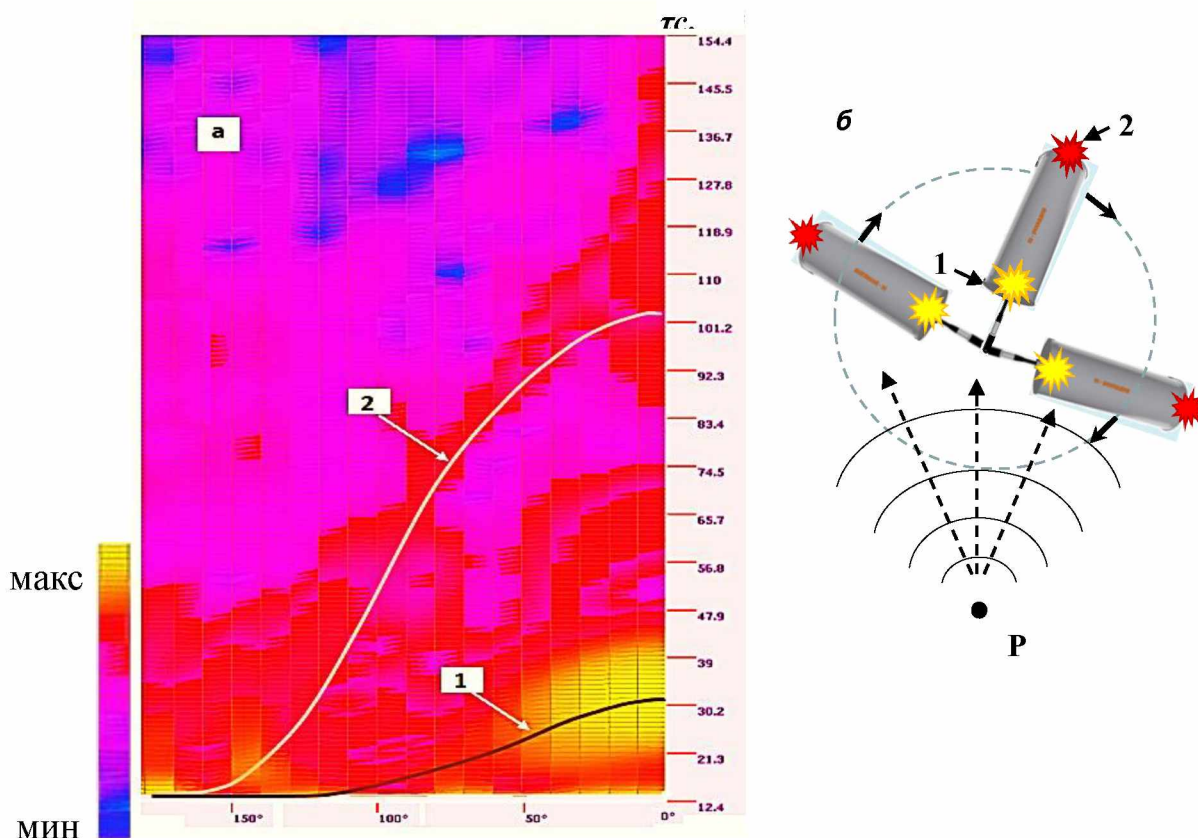


Рисунок 6 – Кепстральные характеристики (а) и положение источников рассеяния (б)

Кривыми 1 и 2 показано изменение разности хода прямой и рассеянных, фронтальной и тыльной торцевыми поверхностями корпуса регистратора, звуковых волн при изменении угла падения от 0° до 180° . Сравнение градаций цвета на рисунке и поведения кривых 1 и 2 позволяет сделать вывод о наличии двух доминирующих источников рассеяния на торцах корпуса регистратора, которые перемещаются при повороте регистратора.

В главе 4 предложены приёмы ослабления рассеяния звука корпусом регистратора, уточнены понятия чувствительности ГПУ применительно к различным задачам измерений подводного шума.

В воздушной акустике, чтобы подавить осцилляции ЧХЧ шумомера, микрофон стараются вынести дальше от корпуса, а форму торцов корпуса стремятся приблизить к обтекаемой. Для ослабления рассеяния, на выявленные проблемные элементы конструкции модели регистратора (торцы корпуса) установлены конические купола из тонкого пластика, заполняющиеся водой. На рисунке 7 представлены ЧХЧ регистратора с куполами при падении звуковой волны в угловом секторе от 0° до 70° . Характер поведения зависимостей не претерпел принципиальных изменений, однако неравномерность ЧХЧ уменьшилась с 18 дБ до 7 дБ.

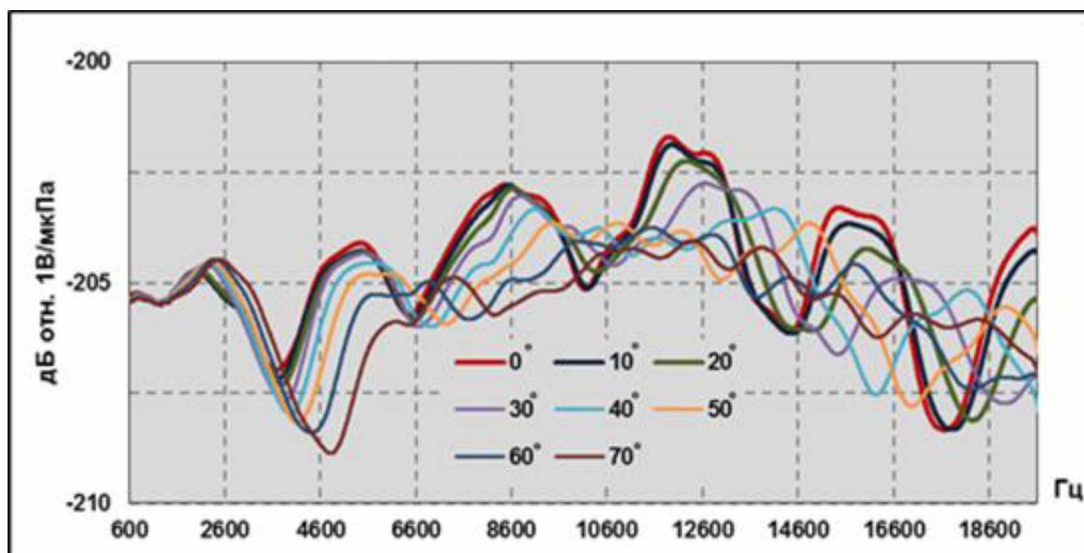


Рисунок 7 – ЧХЧ модели регистратора с установленными куполами при падении звуковой волны в угловом секторе от 0° до 70°

С целью дополнительного ослабления рассеяния, гидрофон отнесён на расстояние 830 мм от фронтальной торцевой поверхности корпуса модели регистратора, при сохранении куполов. Внешний вид модели регистратора с отдаленным гидрофоном и его ЧХЧ при фронтальном падении звука (кривая 2) показаны на рисунке 8.

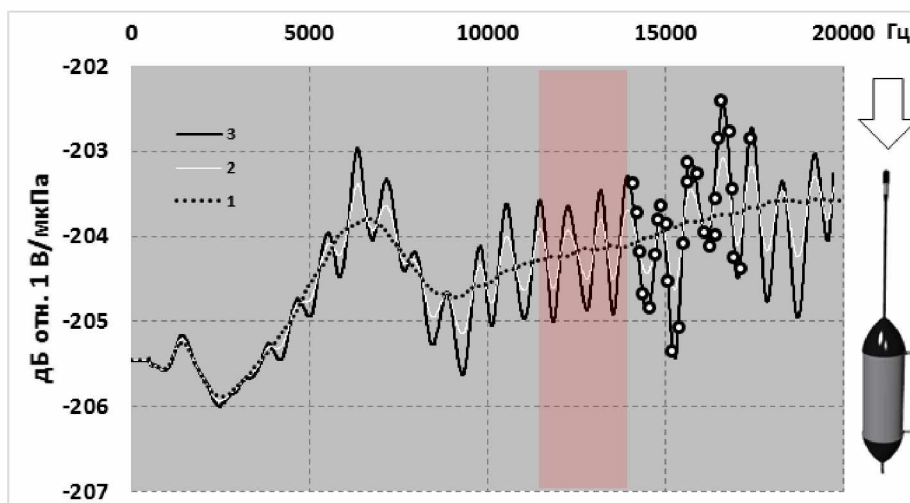


Рисунок 8 – ЧХЧ модели регистратора с отдаленным гидрофоном при фронтальном падении звука (кривая 2)

Размах осцилляций ЧХЧ уменьшился до 1 дБ, а на частотах ниже 5 кГц осцилляции малозаметны. При этом проявились недостатки метода обработки, которые в ранее рассмотренных экспериментах не оказывали существенного влияния.

Увеличение расстояния между гидрофоном и корпусом привело к тому, что вместе с уменьшением размаха период осцилляций сократился и стал сопоставим с частотным интервалом усреднения СКВУ. Усреднение дополнительно уменьшило размах осцилляций ЧХЧ, в результате, получена заниженная оценка рассеяния на корпусе регистратора.

Метод определения ЧХЧ ГПУ предложено дополнить операцией, позволяющей уменьшать вносимые обработкой искажения ЧХ за счет коррекции характеристики пропускания пространственного фильтра, реализуемого СКВУ. Характеристика пропускания такого фильтра формируется как произведение характеристик пропускания фильтров одиночных отражений, которые описываются функциями вида $\frac{\sin x}{x}$. Корректирующую функцию для фильтра i -го отражения, приходящего с задержкой τ_i относительно прямой волны излучателя, предложено строить на основе функции пропускания резонансного контура второго порядка:

$$A(\tau, \tau_i) = l / \sqrt{\left(1 - \left(\frac{\tau}{a\tau_i}\right)^2\right)^2 + \left(\frac{\tau}{b\tau_i}\right)^2}, \quad (2)$$

где a и b – безразмерные параметры;

τ – переменная, имеет размерность времени.

Применение корректирующей функции такого вида проиллюстрировано на рисунке 9: кривой 1 изображена функция пропускания фильтра одиночного отражения; кривой 2 – корректирующая функция $A(\tau, \tau_i)$; кривой 3 – скорректированная функция пропускания. Временные задержки отражений звука от стенок бассейна τ_i всегда превышают задержки рассеяния звука на элементах конструкции приёмника. В этой ситуации форма скорректированной характеристики пропускания в окрестности её первого нуля, не имеет практического значения. Параметры a и b подбирают так, чтобы поведение функции $A(\tau, \tau_i)$ было близким к поведению функции $\left[\frac{\sin x}{x}\right]^{-1}$ для $0 \leq \tau \leq 0,8\tau_i$. Это обеспечивает близкую к плоской вершину и крутой спад скорректированной функции пропускания фильтра одиночного отражения.

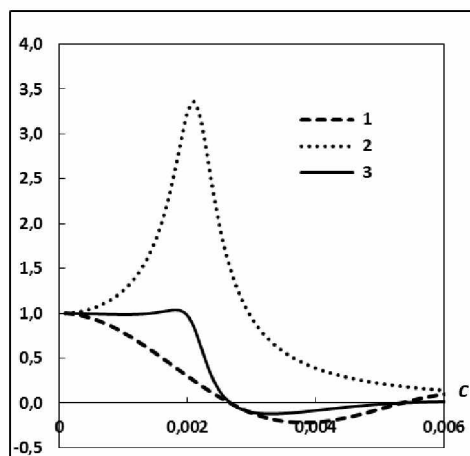


Рисунок 9 – Коррекция характеристики пропускания пространственного фильтра

Итоговая корректирующая функция $A(\tau)$ для n фильтров одиночных отражений получается, как произведение n корректирующих функций $A(\tau, \tau_i)$. Значения параметров a и b не зависят от положения ноля корректируемой функции пропускания, поэтому их можно выбирать одинаковыми для всех корректирующих функций. Исходя из практической целесообразности, критерием оптимальности при подборе параметров a и b служит минимальная неравномерность скорректированной итоговой функции пропускания в области задержек, меньших $2/3$ задержки первого отражения. В описываемом эксперименте $a = 0,805$ и $b = 2,672$. На рисунке 10 показаны итоговая функция пропускания при подавлении трех отражений обработкой по методу СКВУ и скорректированная итоговая функция пропускания.

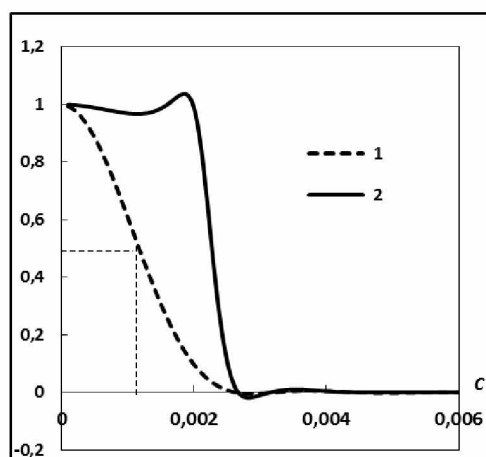


Рисунок 10 – Итоговая функция пропускания метода СКВУ (кривая 1) и скорректированная итоговая функция пропускания (кривая 2)

После применения коррекции размах осцилляции ЧХЧ увеличился примерно в 2 раза (кривая 3 на рисунке 8). Точками показаны результаты, полученные тонально-импульсным методом, реализующим

пространственный фильтр с П-образной характеристикой пропускания. Различия кривых 3 и 2 означают, что при оценке инструментальной погрешности измерений уровня ПШ по кривой 1, составляющая погрешности, обусловленная осцилляцией ЧХЧ, была бы занижена на 0,5 дБ. Это значение сравнимо с требованиями к общей неопределенности калибровки регистратора, предназначенного для измерений уровня ПШ.

В отличие от калибровки гидрофона, для ГПУ получение его ЧХЧ не означает завершение калибровки. Результаты измерений при фронтальном падении звука (кривая 3 на рисунке 8) удовлетворяют требованиям МЭК 60565 к определению чувствительности по полю – плоская звуковая волна, опорное направление, фиксированная частота. Однако использованию этой ЧХЧ для измерения ПШ в третьоктавных полосах частот препятствует ряд проблем. Самая очевидная – какое значение чувствительности, из попадающих в третьоктавную полосу частот (показано на рисунке 8 прямоугольником), подставить в формулу измерений третьоктавного спектра шума? Другая проблема – как учесть направленность ГПУ при измерениях окружающего шума, если при изменении угла падения звуковой волны поведение осцилляций ЧХЧ резко меняется? Проблема третья – из-за больших габаритов ГПУ при боковом падении звука выше определённой частоты (для исследуемой модели регистратора, это 6,3 кГц) не выполняется критерий дальнего поля.

Две из этих проблем удаётся решить, если вместо ЧХЧ по МЭК 60565 использовать чувствительность в третьоктавных полосах частот (кривая 1 на рисунке 8). Проблема неоднозначности исчезает, поскольку каждой третьоктавной полосе частот соответствует единственное значение чувствительности $M_H(f_0, \varphi_i, \Delta f)$ на частоте f_0 , полученное усреднением ЧХЧ в этой полосе:

$$M_H(f_0, \varphi_i, \Delta f) = \sqrt{\frac{1}{\Delta f} \int_{f_0 - \frac{\Delta f}{2}}^{f_0 + \frac{\Delta f}{2}} M_H^2(f, \varphi_i) df}, \quad (3)$$

где $M_H(f, \varphi_i)$ – ЧХЧ при угле падения звуковой волны φ_i ;
 f_0 – центральная частота третьоктавной полосы частот;
 Δf – номинальная ширина полосы.

Кроме того, в рассматриваемых экспериментах при боковом падении звука для частотных полос от 6,3 кГц и выше выполняется критерий дальнего поля, поскольку при приёме шума в этих полосах частот пространственная область корреляции прямой и рассеянной звуковых волн уменьшается, и акустический размер ГПУ сокращается. Малые остаточные осцилляции ЧХЧ

в полосах частот не внесут существенного вклада в погрешность измерений третьоктавного спектра на частотах ниже 6,3 кГц.

Определённая таким образом чувствительность удовлетворяет требованиям – плоская звуковая волна, опорное (либо выбранное относительно опорного) направление, шум в третьоктавной полосе частот. Чувствительность соответствует задаче измерения шума источника, локализованного в опорном, либо в выбранном направлении.

Полученная по формуле (3) чувствительность может оказаться непригодной в других измерительных ситуациях. На рисунке 11 представлены третьоктавные спектры уровней ПШ: кривой 1 – измеренные гидрофоном, откалиброванным по МЭК 60565; кривой 2 – измеренные ГПУ, откалиброванным в третьоктавных частотных полосах.

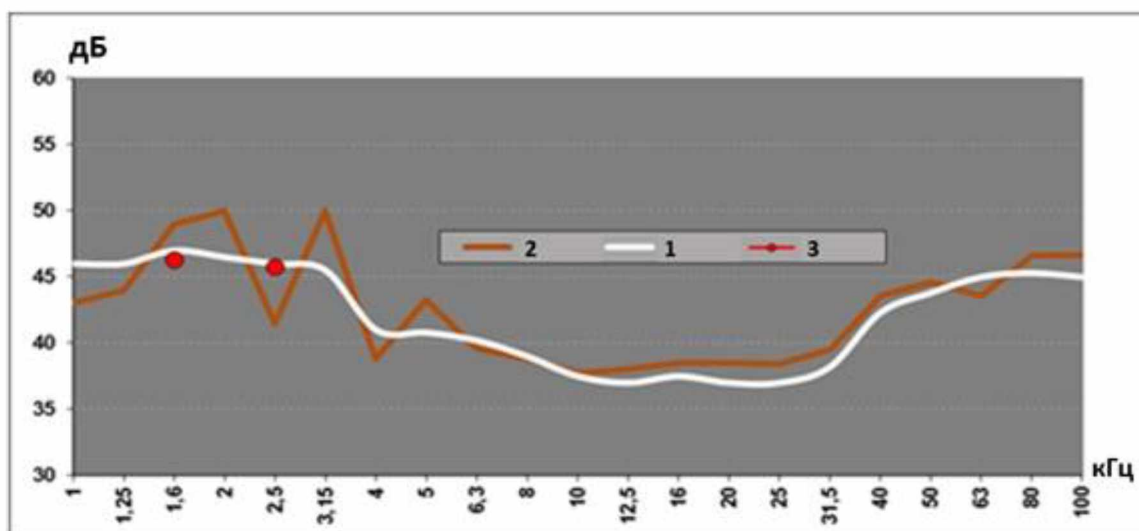


Рисунок 11 – Третьоктавные спектры уровней ПШ

На частотах ниже 6,3 кГц различия уровней достигают 4,5 дБ, причём осцилляции кривой 2 с точностью до наоборот повторяют осцилляции ЧХЧ ГПУ. Причина увеличения погрешности измерений на низких частотах в том, что калибровка выполнена, ориентируя ГПУ опорным направлением на излучатель, но результаты калибровки использованы не для измерений шума с опорного направления, а шума окружающего, то есть шума в отсутствии преимущественного направления падения звуковой волны на ГПУ. В воздушной акустике при таких измерениях используют чувствительность по диффузному полю.

Выполнить калибровку ГПУ по диффузному полю в бассейне, аналогично тому, как это делают в воздушной акустике, не удаётся, поскольку по качеству диффузного поля незаглушенный гидроакустический бассейн значительно уступает реверберационной воздушной камере. Решение может

быть основано на использовании подробных ЧХЧ ГПУ по свободному полю и стандартизированного в воздушной акустике способа расчёта чувствительности по диффузному полю – среднее квадратическое значение чувствительности в полосах частот при изменении угла падения звуковой волны от 0° до 360° . Таким образом, предложено чувствительность ГПУ для измерений окружающего ПШ вычислять по формуле (4) и в качестве названия использовать термин «круговая чувствительность».

$$M_H^{кр}(f_0, \Delta f) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n M_H^2(f_0, \varphi_i, \Delta f)}, \quad (4)$$

где φ_i – угол падения звуковой волны, изменяется от 0° до 360° ;

n – количество отсчётов угла падения звуковой волны φ_i .

Использование круговой чувствительности позволяет учесть влияние направленности ГПУ и получить результаты, близкие к результатам измерений ненаправленным гидрофоном. Это подтверждено экспериментально – отдельными точками (ряд 3) на рисунке 11 показаны уровни шума, полученные при использовании круговой чувствительности ГПУ.

Стандарт ISO/DIS 17208-2:2017 на измерения ПШ судов рекомендует в качестве приёмников использовать автономные гидроакустические регистраторы. При этом в стандарте есть требование к учёту направленности регистраторов, однако указания как это делать, отсутствуют. При проходе судна испытательным курсом, угловой сектор измерений составляет либо $\pm 30^\circ$, либо $\pm 45^\circ$. Это позволяет уточнить понятие чувствительности для того, чтобы учесть направленность ГПУ-регистратора. При измерениях по классам grade B и C сигнал приёмника усредняют в едином временном окне. Поскольку результат усреднения в полосе частот в угловом секторе измерений представляют одним числом, то и чувствительность приёмника должна быть охарактеризована одним числом, адекватным измерительной ситуации. В качестве такого числа предложено использовать чувствительность в угловом секторе (секторальная чувствительность) $M_H(f_0, \Delta\varphi, \Delta f)$ – среднее квадратическое значение чувствительности в третьоктавной полосе частот $M_H(f_0, \varphi_i, \Delta f)$ в угловом секторе $\Delta\varphi$ падения звуковой волны:

$$M_H(f_0, \Delta\varphi, \Delta f) = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n M_H^2(f_0, \varphi_i, \Delta f)} \quad (5)$$

где φ_i – значение угла в секторе $\Delta\varphi \in [\varphi_1; \varphi_n]$.

В зависимости от способа крепления регистратора на испытательном морском полигоне, значения секторальной чувствительности предложено определять во фронтальном (кривые 2 на рисунке 13) или боковом (кривые 3) угловых секторах. Кривыми 1 на рисунке 13 изображены диаграммы направленности регистратора в третьооктавных полосах с центральными частотами 10 и 20 кГц.

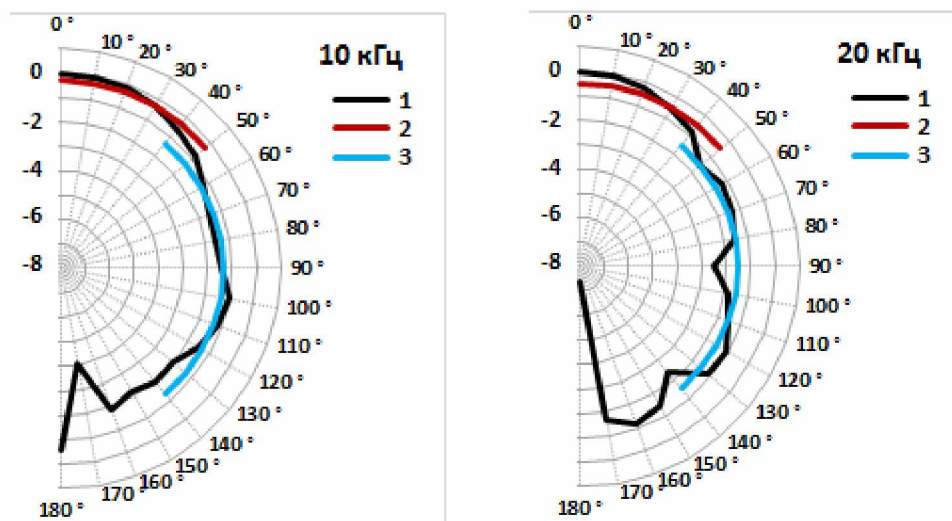


Рисунок 13 – Диаграммы направленности модели регистратора в третьооктавных полосах частот

Предложенные методы определения чувствительности ГПУ по набору подробных ЧХЧ при различных углах падения звуковой волны позволяют получать чувствительность в полосах частот для измерений окружающего шума, шума с опорного направления и шума источника, перемещающегося в угловом секторе.

3 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная задача разработки методов определения чувствительности ГПУ с элементами конструкции, рассеивающими звук на первичный преобразователь, обеспечивающих учёт частотных и направленных свойств ГПУ при измерениях ПШ с фиксированного направления, шума источника, перемещающегося в заданном угловом секторе, окружающего шума. Предложены и экспериментально проверены приёмы по совершенствованию конструкции ГПУ.

Изложены научно обоснованные и подтверждённые экспериментально решения, имеющие большое значение для разработки и создания новых методов и приборов, использующих акустические явления в решении научных

задач, задач мониторинга и прогнозирования состояния морской экосистемы, предотвращения и ликвидации её шумового загрязнения, при сертификационных испытаниях судов.

Разработанный метод определения ЧХЧ по полю приёмника в бассейне с отражающими звук границами реализован в программно-аппаратном комплексе. В результате его исследований подтверждены возможности:

- определять ЧХЧ гидрофонов и ГПУ с элементами конструкции, рассеивающими звук на первичный преобразователь, для частот начиная с 125 Гц и выше;
- выполнять исследования акустических свойств ГПУ, включая влияние обтекателя;
- получать непрерывные частотные зависимости коэффициента отражения для различных углов падения звука, при исследованиях акустических свойств поверхностей и звукопоглощающих покрытий.

В результате исследований выявлены ограничения:

- увеличение погрешности результата измерений ЧХЧ на низких частотах при расширении интервала интерполяции частотной зависимости, подвергаемой обработке по методу СКВУ;
- снижение качества постобработки экспериментальной ЧХЧ ГПУ, для которого время пробега звуковой волны, рассеянной корпусом, превышает 2/3 минимального времени пробега волны, отраженной границами бассейна;
- увеличение погрешности измерений частотной зависимости коэффициента отражения звука при уменьшении размера исследуемого образца, в связи с невозможностью обеспечить достаточное подавление влияния краевых эффектов.

Предложены и апробированы методы определения чувствительности ГПУ, позволяющие учитывать его частотные и направленные свойства при решении следующих измерительных задач – измерения шума с фиксированного направления, шума в заданном угловом секторе и окружающего шума.

Разработан и апробирован способ определения положений доминирующих источников рассеяния звука на элементах конструкции ГПУ.

Предложены и экспериментально проверены технические решения по совершенствованию конструкции ГПУ, которые позволили уменьшить влияние рассеяния звука элементами конструкции на неравномерность ЧХЧ исследуемого ГПУ с 18 до 2 дБ.

В качестве перспективы дальнейшей разработки темы, представляется целесообразным выполнить исследования акустических характеристик различных типов ГПУ, чтобы разработать единый подход к вычислению

чувствительности ГПУ по диффузному полю в третьоктавных частотных полосах. Решение этой задачи, в аспекте мониторинга акустического загрязнения моря, требует общих усилий, поскольку выходит за рамки возможностей одной лаборатории.

Кроме того, для гидроакустического регистратора ПШ, так же как в стандарте на шумомер, необходимо установить требования к конструкции, позволяющие выполнять его калибровку известными методами с помощью существующих эталонов. Основными среди этих требований являются – доступ к выходному сигналу гидрофона в реальном времени и возможность замещения входного акустического сигнала электрическим с помощью эквивалента гидрофона.

4 СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Николаенко, А.С. Подавление реверберационных искажений сигнала приёмника с использованием передаточной функции бассейна [Текст] / А.Е. Исаев, А.С. Николаенко, И.В. Черников // Акустический журнал. – 2017. – том 63, № 2. – С. 165–174.
2. Николаенко, А.С. Лабораторная калибровка гидроакустического приёмника по полю на низких частотах [Текст] / А.Е. Исаев, А.С. Николаенко // Измерительная техника. – 2018. – № 01. – С. 54–59.
3. Николаенко, А.С. Измерение частотной зависимости коэффициента отражения звука в условиях незаглушенного бассейна [Текст] / А.Е. Исаев, А.С. Николаенко, А.М. Поликарпов // Измерительная техника. – 2018. – № 04. – С. 53–56.
4. Николаенко, А.С. Калибровка в лабораторном бассейне регистратора с вынесенным гидрофоном [Текст] / А.Е. Исаев, А.С. Николаенко // Измерительная техника. – 2018. – № 07. – С. 62–65.
5. Николаенко, А.С. Чувствительность приёмника при измерениях подводного шума [Текст] / А.Е. Исаев, А.С. Николаенко, А.М. Поликарпов // Измерительная техника. – 2018. – № 09. – С. 61–65.

Изобретения

6. Пат. 2655049 Российская Федерация, МПК Н 04 R 29/00. Способ калибровки гидрофона по полю на низких частотах [Текст] / Исаев А.Е., Николаенко А.С.; заявитель и патентообладатель ФГУП «ВНИИФТРИ». – Заявл. 26.07.2017; опубл. 23.05.2018, Бюл. № 15 – 2 с.: ил.

7. Пат. 2655478 Российская Федерация, МПК G 01 N 29/00. Способ измерения частотной зависимости коэффициента отражения звука от поверхности [Текст] / Исаев А.Е., Николаенко А.С.; заявитель и патентообладатель ФГУП «ВНИИФТРИ». – Заявл. 26.07.2017; опубл. 28.05.2018, Бюл. № 16 – 2 с.: ил.

Публикации в других изданиях

8. Николаенко, А.С. Градуировка гидроакустического приёмника с использованием передаточной функции бассейна [Текст] / А.Е. Исаев, А.С. Николаенко, А.М. Поликарпов, И.В. Черников // Альманах современной метрологии. ВНИИФТРИ. – 2015. – № 4. – С. 67–111.

9. Николаенко, А.С. Акустические измерения по свободному полю в реверберационном звуковом поле с использованием передаточной функции бассейна [Текст] / А.Е. Исаев, А.С. Николаенко, И.В. Черников // Труды 6-й Всероссийской научно-технической конференции «Технические проблемы освоения Мирового океана». – Владивосток: ИПМТ ДВО РАН, 2015. – С. 236–240.

10. Николаенко, А.С. Калибровка приёмника для измерений окружающего подводного шума [Текст] / А.Е. Исаев, А.С. Николаенко, И.В. Черников // Материалы 6-й Международной науч.-тех. конференции «Измерения и испытания в судостроении и смежных отраслях» (Судометрика 2016). – Санкт-Петербург: БГТУ «ВОЕНМЕХ», 2016. – С. 179–186.

11. Николаенко, А.С. Сравнительный анализ современных методов калибровки микрофонов по полю [Текст] / А.С. Николаенко, С.Ю. Колесов // Сб. докл. Научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и специалистов «Метрология в XXI веке». – Менделеево: ВНИИФТРИ, 2016. – С. 143–149.

12. Nikolaenko, A.S. Calibration of the receiver for the measurement of ambient underwater noise [Текст] / A.E. Isaev, A.S. Nikolaenko // Proceedings of the 45th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering INTER-NOISE 2016. – Hamburg: DEGA, 2016. – pp. 7050–7057.

13. Николаенко, А.С. Повышение достоверности экспертной оценки инструментальной погрешности измерения УПШ [Текст] / Исаев А.Е., Цыганков С.Г., Кистович А.В., Черников И.В., А.С. Николаенко // Сб. трудов науч.-практ. конференции «Гидроакустика». – Менделеево: ВНИИФТРИ, 2015. – С. 122–132.

14. Nikolaenko, A.S. Free-field calibration of an underwater sound receiver in the reverberant noise field of a water tank [Текст] / A.E. Isaev, I.V. Chernikov, A.S. Nikolaenko // TC-AUV/2016. Published in electronic version on EURAMET website: www.euramet.org. 2016.

15. Nikolaenko, A.S. Free-field calibration of underwater sound receiver in a laboratory water tank at very low frequencies [Текст] / А.Е. Isaev, A.S. Nikolaenko // CCAUV/15-17. Published in electronic version on BIPM website: www.bipm.org. 2017.
16. Николаенко, А.С. Калибровка гидроакустического приёмника на низких частотах [Текст] / А.Е. Исаев, А.С. Николаенко // Материалы 7-й Всероссийской научно-технической конференции «Технические проблемы освоения мирового океана». – Владивосток: ИПМТ ДВО РАН, 2017. – С. 243–248.
17. Николаенко, А.С. Применение метода скользящего комплексного взвешенного усреднения для калибровки гидроакустического приёмника на низких частотах [Текст] / А.Е. Исаев, А.Н. Матвеев, А.С. Николаенко // Сб. трудов 14-й всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» (ГА-2018). – Санкт-Петербург: Океанприбор, 2018.
18. Николаенко, А.С. Калибровка регистратора подводного звука и вопросы прослеживаемости создаваемых средств измерений к первичным эталонам [Текст] / А.Е. Исаев, А.М. Поликарпов, А.С. Николаенко // Альманах современной метрологии. ВНИИФТРИ. – 2019. – № 1 (17). – С. 94–108.