

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
«ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ И РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ»

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

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук
Исаев Александр Евгеньевич

Менделеево

2020 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ГЛАВА 1. ОБЗОР ПРИМЕНЯЕМЫХ В ВОЗДУШНОЙ И ГИДРО- АКУСТИКЕ МЕТОДОВ КАЛИБРОВКИ ПО ПОЛЮ ПРИЁМНОГО УСТРОЙСТВА В УСЛОВИЯХ, ОТЯГОЩЕННЫХ РЕВЕРБЕРАЦИЕЙ ЗВУКА В ЗВУКОМЕРНОМ ПОМЕЩЕНИИ.....	10
1.1 Калибровка гидроакустического приёмного устройства тонально-импульсным методом.....	10
1.2 Применение широкополосных сигналов в архитектурной акустике.....	12
1.3 Выводы к главе.....	19
ГЛАВА 2. МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО ПРИЁМНОГО УСТРОЙСТВА НА ЧАСТОТАХ НИЖЕ 1 кГц.....	22
2.1 Тонально-импульсный метод.....	22
2.2 Техника СКВУ и предлагаемый метод.....	28
2.3 Эксперименты по подтверждению корректности метода.....	37
ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТ С МАССОГАБАРИТНОЙ МОДЕЛЬЮ РЕГИСТРАТОРА ПОДВОДНОГО ШУМА.....	55
3.1. Стенд для измерений характеристик ГПУ.....	55
3.2 Массогабаритная модель регистратора.....	57
3.3 Экспериментальные исследования <i>m</i> -регистратора.....	59
3.4 Результаты экспериментальных исследований на низких частотах.....	60
3.5 Результаты экспериментальных исследований на высоких частотах.....	64
3.6 Локализация источников рассеяния на корпусе <i>m</i> -регистратора.....	68
3.7 Исследование акустических свойств различных вариантов конструкции регистратора.....	71
ГЛАВА 4. ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ПРИ ИЗМЕРЕНИЯХ ПОДВОДНОГО ШУМА.....	85
4.1. Учёт направленных свойств гидроакустического приёмного устройства при измерениях окружающего шума.....	85
4.2 Особенности калибровки регистратора для измерений шума судов.....	89
4.3 Выводы к главе.....	93
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	95
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	97
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	98

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Существует растущая потребность в измерениях звука в океане, обусловленная озабоченностью по поводу воздействия человеческой деятельности на окружающую среду, а также потребностями промышленности, океанологии и флота.

В настоящей работе основное внимание уделено проблеме негативного воздействия человека на морскую экосистему. Эта проблема обусловлена развитием судоходства, активным освоением шельфа и пр., что выражается в росте шумового загрязнения моря и ухудшении экологической обстановки в прибрежных зонах мирового океана. Таким образом, оказывается негативное влияние на естественный ареал обитания живых организмов и нарушается их жизнедеятельность. Для решения указанной проблемы необходима объективная оценка антропогенного воздействия на морскую экосистему. Соответственно, требуются согласованные и метрологически обеспеченные методы и средства измерений различного вида подводных шумов (ПШ).

Обеспечение единства измерений основано на соответствии методов измерений измерительной задаче, валидации и верификации применяемых средств измерений (СИ). В воздушной акустике единство измерений шумов различного вида опирается на отработанные методики выполнения измерений и средства измерений, характеристики которых адекватны этим методикам. Так решается проблема валидации. Методы калибровки (верификация) также подчинены задачам измерений. Различные аспекты решения измерительных задач отражены в системе гармонизированных стандартов.

На сегодняшний момент, прослеживаемость результатов измерений ПШ опирается только на рекомендации Международной электротехнической комиссии (МЭК) по калибровке гидрофонов [1]: на частотах выше 1 кГц – калибровка гидрофона по полю, используя гармонические сигналы; ниже 1 кГц – калибровка по давлению в камере малого объема (КМО). Но в натурных условиях ПШ измеряют не гидрофоном (по сути, первичный преобразователь), как таковым, а с помощью гидроакустического приёмного устройства (ГПУ¹). При этом, метрологические характеристики (в первую, очередь чувствительность²) ГПУ могут существенно отличаться от характеристик установленного в него гидрофона. В свою очередь, отсутствие методов определения характеристик ГПУ приводит к тому, что калибруется только

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

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

гидрофон, а влияние вспомогательных устройств и конструкций ГПУ определяется расчётным методом. Для получения объективной количественной оценки чувствительности (калибровки) ГПУ необходимо определить или разработать соответствующие методы.

Ещё важно отметить, что измерения ПШ выполняют в третьоктавных полосах частот, в то время как само определение чувствительности гидроакустического преобразователя в третьоктавной полосе частот не стандартизовано. Отсутствие такого определения вызывает трудности, как при калибровке ГПУ, так и при использовании его для измерений в море.

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. В то же время, для оценки последствий 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 [2].

Разработка методов определения характеристик ГПУ не улучшит его акустические свойства, но это даст возможность корректно учесть свойства ГПУ при его создании и непосредственно измерениях. Так, в воздушной акустике отработаны, как сама конструкция приёмника-шумомера, так и способы нормирования и получения его характеристик, используемых при измерениях шумов различного вида.

Согласно законам акустики, рассеяние звука 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. Применительно к лабораторной модели ГПУ, это позволило бы построить более полную модель, охватывающую самые низкие частоты, обосновать критерии правильности, как самой модели, так и методов её получения, проследить на модели развитие влияния дифракции на частотные и направленные свойства ГПУ. Использование такой модели, а также подходов, отработанных в воздушной шумометрии, позволило бы учесть частотные и направленные свойства ГПУ таким образом, чтобы получать чувствительности ГПУ, применимые для различных задач измерений ПШ.

Актуальность темы исследований подтверждается осуществлением очень близкого по направлению исследований проекта 15RPT02 (UNAC-LOW) «Стандарты подводной

акустической калибровки для частот ниже 1 кГц», который проводится под эгидой Европейской ассоциации национальных метрологических институтов (EURAMET). Целью проекта является развитие метрологических возможностей в области подводной акустической калибровки на частотах ниже 1 кГц для удовлетворения потребности в калибровке гидрофонов и автономных регистраторов ПШ.

Участниками и сторонниками этого проекта являются: национальные метрологические институты и органы по стандартизации; производители, поставщики и пользователи гидроакустического оборудования; влиятельные члены регулирующих органов Европы и США. Группа заинтересованных сторон отражает не только европейский, а действительно глобальный интерес к результатам проекта.

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.

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. [3] 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 полой сферической оболочки, выявлена 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 [4], где отметил несовершенство системы калибровки

гидроакустических средств из-за недоучёта влияния обтекателя и вспомогательных конструкций на чувствительность преобразователя.

В качестве результатов работы в рамках упомянутого выше проекта 15RPT02 (UNAC-LOW), на сегодняшний день представлены только несколько статей в профильных журналах.

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.

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 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.

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 CCAUV/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 CCAUV/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.

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.

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 расчета 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 опорного направления или в заданном угловом секторе.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность полученных в работе результатов подтверждена:

- малым отличием результатов сравнения калибровок гидрофона в гидроакустическом бассейне и в КМО;
- положительными результатами ключевых сличений CCAUV/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 (CCAUV 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.

1. ОБЗОР ПРИМЕНЯЕМЫХ В ВОЗДУШНОЙ И ГИДРО- АКУСТИКЕ МЕТОДОВ КАЛИБРОВКИ ПО ПОЛЮ ПРИЁМНОГО УСТРОЙСТВА В УСЛОВИЯХ, ОТЯГОЩЕННЫХ РЕВЕРБЕРАЦИЕЙ ЗВУКА В ЗВУКОМЕРНОМ ПОМЕЩЕНИИ

1.1 Калибровка гидроакустического приёмного устройства тонально-импульсным методом

На рисунках 1.1 и 1.2 представлены ЧХЧ автономного регистратора ПШ AURAL-2М, измеренные в НФЛ тонально-импульсным методом на частотах от 1 кГц до 100 кГц. ЧХЧ на рисунке 1.1 получены при фронтальном падении звуковой волны на регистратор, характеристики при боковом падении – на рисунке 1.2.

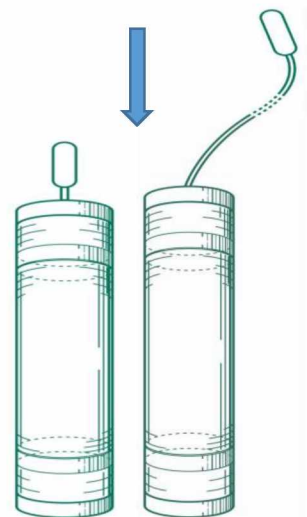
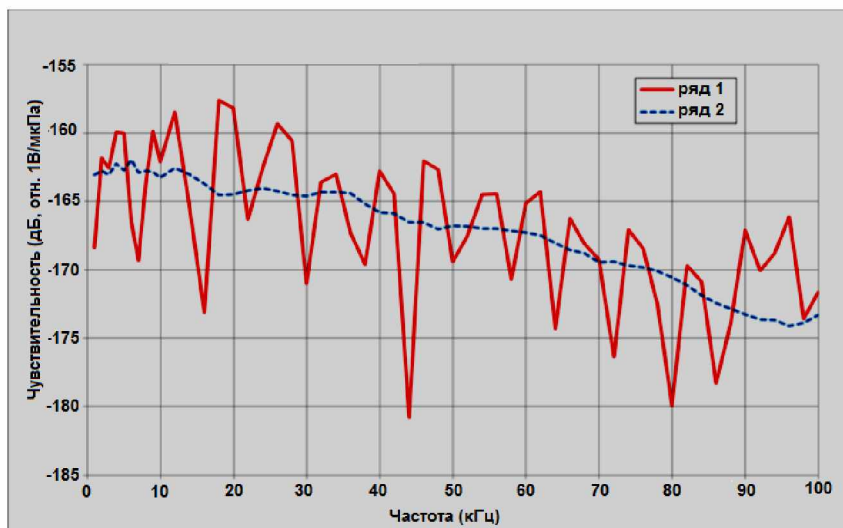


Рисунок 1.1 – ЧХЧ регистратора при фронтальном падении звуковой волны, ряд 1 – гидрофон закреплен жестко на корпусе, ряд 2 – гидрофон вывешен на кабеле

Ряды 1 на рисунках 1.1 и 1.2 – гидрофон жестко закреплен вблизи торцевой поверхности корпуса, ряды 2 – гидрофон вывешен на кабеле на удалении от корпуса. Малые различия в поведении зависимостей, представленных рядами 2, и их незначительные осцилляции позволяют сделать вывод о слабом влиянии звуковой волны, рассеянной корпусом регистратора, на звуковое поле в удаленном от корпуса месте расположения гидрофона, как при фронтальном, так и при боковом падении звуковой волны. Малые различия в поведении зависимостей на рисунке 1.2. означают, что при боковом падении звука на регистратор, искажения звукового поля в месте размещения гидрофона малы как для удаленного от корпуса гидрофона, так и для гидрофона, жестко закрепленного вблизи корпуса. При фронтальном падении волны на регистратор с жестко закрепленным гидрофоном, влияние рассеянной корпусом звуковой волны

весьма значительно. Зависимость, представленная рядом 1 на рисунке 1.1, искажена осцилляциями, размах которых достигает 18 дБ. Частота осцилляций составляет примерно 8 кГц, что соответствует расстоянию 9 см от активного элемента гидрофона до источника рассеяния звуковой волны – торцевая поверхность корпуса регистратора.

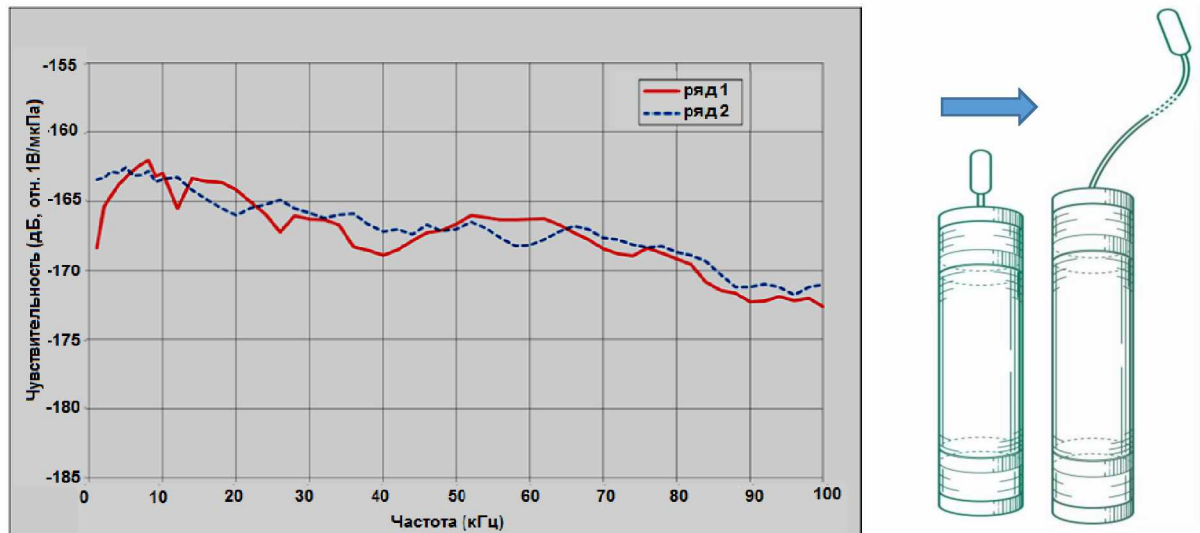


Рисунок 1.2 – ЧХЧ регистратора при боковом падении звуковой волны, ряд 1 – гидрофон закреплен жестко на корпусе, ряд 2 – гидрофон вывешен на кабеле

Стоит обратить внимание, что с уменьшением частоты размах осцилляций зависимости не уменьшается, как можно было того ожидать исходя из соотношения между длиной звуковой волны, падающей на регистратор, и габаритами регистратора. Причин этому может быть несколько: первая – редкий шаг по частоте при измерениях тонально-импульсным методом не позволяет детально представить поведение осцилляций на графике, и влияние регистратора может быть существенно большим, чем можно судить по представленной зависимости; вторая – большая погрешность тонально-импульсного метода на нижнем пределе частотного диапазона измерений; наконец, третья – неудачное крепление гидрофона, при котором существенно влияние звуковой волны, распространяющейся по корпусу регистратора.

В пользу проявления большой погрешности тонально-импульсного метода на низких частотах говорит сравнение частотных зависимостей, представленных рядами 1, при фронтальном и боковом падении звука. На частоте 1 кГц значения чувствительности практически не различаются, хотя по поведению осцилляций зависимости различаются резко. Если при фронтальном падении завал частотной характеристики на частоте 1 кГц можно объяснить периодичностью осцилляций, то при боковом падении размах осцилляций значительно меньше, а глубина завала осталась прежней.

1.2 Применение широкополосных сигналов в архитектурной акустике

Тонально-импульсный метод решает проблемы калибровки гидрофона, однако, малая информативность результатов калибровок, полученных тонально-импульсным методом, затрудняет его использование для калибровки ГПУ. Опыт НФЛ наглядно показал, что применение стандартной процедуры калибровки тонально-импульсным методом приводит также к неприемлемым ошибкам в оценке неравномерности ЧХЧ ГПУ. Для калибровки гидроакустических приёмных модулей во ВНИИФТРИ успешно применяли широкополосный сигнал [5, 6, 7]. Однако арсенал методов измерений, использующих широкополосные сигналы для выполнения метрологических работ в гидроакустике явно недостаточен, что заставляет обратиться к опыту, накопленному в архитектурной акустике.

Проблему измерения ПИ пары излучатель-приёмник в воздушной акустике решают, помещая пару в свободное звуковое поле безэховой камеры. Пара громкоговоритель-слушатель обычно находится не в свободном звуковом поле, а в помещении с отражающими звук стенами. При этом внимание воздушных акустиков сосредоточено не на измерении характеристик передатчика и приёмника, а на определении акустических характеристик помещения: передаточной функции (ПФ) и соответствующей ей импульсной характеристики (ИХ), из которых получают многие акустические параметры, связанные с качеством восприятия звука. Опыт применения частотно-модулированных сигналов в качестве сигнала возбуждения показал значительно более высокую устойчивость таких измерений к искажениям в сравнении с псевдошумовыми сигналами.

Один из первых способов регистрации ПФ использовал **частотно-модулированный сигнал возбуждения**, который поступал от аналогового генератора, синхронизированного с механизмом подачи бумаги самописца. Полученная запись представляет частотную зависимость напряжения выходного сигнала. Чтобы эту зависимость интерпретировать как модуль ПФ, при измерениях амплитуду сигнала возбуждения поддерживали постоянной независимо от частоты. Запись пары излучатель-приёмник в помещении представляет собой не ПФ помещения и не ПФ пары в свободном звуковом поле, а ПФ пары в реверберационном звуковом поле помещения.

Подавить влияние отражений звука в помещении при измерениях ПФ с использованием ЛЧМ-сигнала позволяет вариант **метода спектрометрии временных задержек (СВЗ)** с использованием временной задержки [8, 9, 10, 11]. Метод СВЗ основан на том, что на входе приёмника мгновенные частоты прямого и отраженных помещением ЛЧМ-сигналов различаются. Генератор формирует синусный и косинусный ЛЧМ-сигналы. Излучают синусный ЛЧМ-сигнал. Для получения действительной и мнимой части ПФ принятый сигнал умножают на синусный и косинусный сигналы генератора, задержанные на время распространения прямого сигнала. Умножители выполняют функцию смесителя при супергетеродинном приёме в

радиотехнике, создавая компоненты суммарной и разностной частот. Разностные частоты выделяют с помощью фильтров низких частот (ФНЧ). После введения временной задержки мгновенные частоты сигналов генератора и принятого прямого сигнала близки, их разностная частота будет очень низкой и, следовательно, выходной сигнал разностной частоты не будет ослаблен ФНЧ. Изменения амплитуд выходных сигналов ФНЧ во времени представляет частотную зависимость действительной и мнимой частей ПФ.

Изменение частоты по линейному закону приводит к ухудшению отношения сигнал-шум на низких частотах, где выходной сигнал излучателя резко уменьшается. Для борьбы с этим эффектом в методе СВЗ сужают полосу пропускания ФНЧ, что приводит к необходимости уменьшать скорость изменения частоты ЛЧМ-сигнала.

Другим недостатком являются пульсации на низких частотах. При высоких мгновенных частотах суммарные частоты достаточно велики и подавляются ФНЧ. На низких частотах суммарная частота оказывается близкой либо меньшей частоты среза ФНЧ, что проявляется в возникновении паразитных «биений» в восстановленной амплитудно-частотной характеристике.

Уменьшение скорости изменения частоты ЛЧМ-сигнала и пропорциональное сужение полосы пропускания ФНЧ приводит к ослаблению «биений». Более эффективным является приём «зеркального» повторения измерений: описанную последовательность операций применяют как к синусному, так и к косинусному сигналу за исключением низкочастотной фильтрации. Для получения действительной и мнимой части ПФ действительная часть результата второго измерения добавляется к действительной части, полученной первым измерением, а мнимая часть результата второго измерения вычитается из мнимой части первого измерения. При этом компоненты суммарных частот будут подавлены [12, 13, 14], что исключает принципиальную необходимость низкочастотной фильтрации.

Полученные результаты будут включать ПФ помещения. Для измерения ПФ громкоговорителя используют ФНЧ, чтобы подавить отражения звука в помещении, шумовую помеху и гармоники громкоговорителя. Однако даже после кропотливой регулировки частоты среза ФНЧ, метод СВЗ не обеспечивает полного подавления отражений из-за ограниченной крутизны фильтров нижних частот.

При измерениях с использованием **БПФ-анализа излучаемого и принимаемого сигналов**, громкоговоритель возбуждают широкополосным сигналом (квазишумовой, М-последовательность и т.п.), используя накопление по реализациям, вычисляют спектры мощности и взаимный спектр сигнала возбуждения и сигнала на выходе приёмника. Комплексную ПФ вычисляют делением комплексно-сопряженного взаимного спектра на спектр мощности сигнала возбуждения [15]. Особенностью двухканального БПФ является возможность оценить отношение сигнал-шум не прерывая излучение как отношение $v^2/(1-v^2)$, где v^2 – функция

когерентности, которую получают делением квадрата модуля взаимного спектра на произведение спектров мощности [16].

К недостаткам метода можно отнести большую продолжительность и недостаточную точность измерений из-за необходимости усреднять большое число данных. Кроме того, БПФ дает правильные результаты только при обработке сигналов, повторяющихся с периодом, равным длине блока БПФ. Для непериодических сигналов начальная и конечная точки обычно не совпадают, что существенно искажает результат БПФ. Эти искажения уменьшают, применяя оконную обработку, однако, возникающий при этом эффект сглаживания, ухудшает частотное разрешение, наиболее пагубно сказываясь на низких частотах.

Самым трудоемким способом получения ПФ является использование **чистых тонов с пошаговым увеличением частоты**. Способ применяют как для измерения ПФ помещения, так и для измерения ПФ пары излучатель-приёмник [17]. В последнем случае при необходимости исключить влияние отражений, принятый сигнал оценивают на временном интервале, предшествующем моменту прихода первого отражения. Использование БПФ для оценки амплитуды чистого тона накладывает дополнительное ограничение: чтобы избежать размытия спектральных составляющих длительность подвергаемой БПФ реализации должна быть кратной периоду чистого тона. Получение информации об измеряемой ПФ происходит на этапе существования сигнала, что является явным недостатком метода в сравнении с методами восстановления ПФ с использованием широкополосных сигналов.

Использование **импульса в качестве сигнала возбуждения** кажется естественным способом получения ИХ, а также самым простым подходом к получению ПФ на основе БПФ [18, 19]. Если в качестве импульса возбуждения использовать импульс в виде функции Дирака, то реакция приёмника является искомой ИХ. Использование импульса – удобный способ чисто электрических измерений, при которых нет отражений, а влияние шумов и нелинейных искажений незначительно. Чтобы излучить сигнал близкий к функции Дирака импульс генератора должен быть очень коротким. Для того, чтобы обеспечить приемлемое отношение сигнал-шум, импульс возбуждения громкоговорителя должен быть предельно мощным, что приводит к искажениям излученного сигнала. При этом линейные и нелинейные искажения сигнала разделить невозможно: частотная характеристика и гармоники оказываются неотличимыми.

Усечение принятого сигнала по времени, даже приходящееся на шумовой шлейф, приводит к искажениям ПФ, которое неизбежно сказывается на результате измерений в области низких частот. Поскольку энергия короткого импульса мала, а спектр очень широкий, то по помехозащищенности метод значительно уступает рассмотренным выше. Периодическое

повторение импульса возбуждения позволяет увеличить отношение сигнал-шум, но приводит к усечению по времени.

Измерения с использованием **М-последовательности** оказались довольно популярными в акустике, но имеют несколько недостатков. Основными являются искажения прямоугольной формы сигнала излучателем и антиалайзинговым фильтром, а также временная нестабильность громкоговорителя. Для низкочастотных измерений наиболее нежелательным свойством М-последовательностей является их равномерный спектр, что приводит к малому соотношению сигнал-шум в области низких частот [20, 21].

Использование **периодического повторения широкополосного сигнала возбуждения** дает выигрыш в требуемых вычислительных ресурсах, позволяет применять для измерений одноканальную систему. Использование одного канала позволяет исключить погрешности, обусловленные неидентичностью электрических трактов в двухканальной системе. Другие заметные преимущества периодического повторения широкополосного сигнала возбуждения отсутствуют.

Частотная характеристика громкоговорителя существенно отличается от равномерной, поэтому при измерениях ПФ помещения результирующая характеристика будет искажена ЧХ громкоговорителя. Для того, чтобы исключить искажения, обусловленные громкоговорителем, необходимо использовать частотную коррекцию излучаемого сигнала. Такую коррекцию можно выполнить, зная частотную характеристику громкоговорителя. Получить ЧХ громкоговорителя в безэховой камере не составляет труда. Ситуацию ухудшает зависимость ЧХ от направления. Более того, ЧХ громкоговорителя, измеренная в безэховой камере, становится бесполезной в помещении с отражениями. Поскольку звуковое давление в точке расположения микрофона либо слушателя создается как прямой волной громкоговорителя, так и волнами, излученными громкоговорителем в различных направлениях и отраженными стенами помещения. Для решения этой проблемы при акустических измерениях в помещении ISO 3382 предписывает, чтобы используемый громкоговоритель был «всеаправленным» – условие, которое на практике невозможно удовлетворить на частотах более 2 кГц.

Наряду с конструированием ненаправленного громкоговорителя при измерениях акустических характеристик помещения применяют ЧХ акустической мощности громкоговорителя [19]. Этапы получения спектра акустической мощности громкоговорителя представлены зависимостями 1–6 на рисунке 1.3. Измерения выполняют, излучая шумовой сигнал в реверберационной камере (зависимость 1). Спектры звуковых давлений, измеренных в различных точках реверберационной камеры, усредняют. ЧХ акустической мощности получают умножением усредненного спектра (зависимость 2) на функцию, обратную зависимости времени

реверберации от частоты (зависимость 3). Полученную ЧХ (зависимость 4) сглаживают скользящим усреднением в выбранной частотной полосе, например, 1/6- или 1/3 октавы.

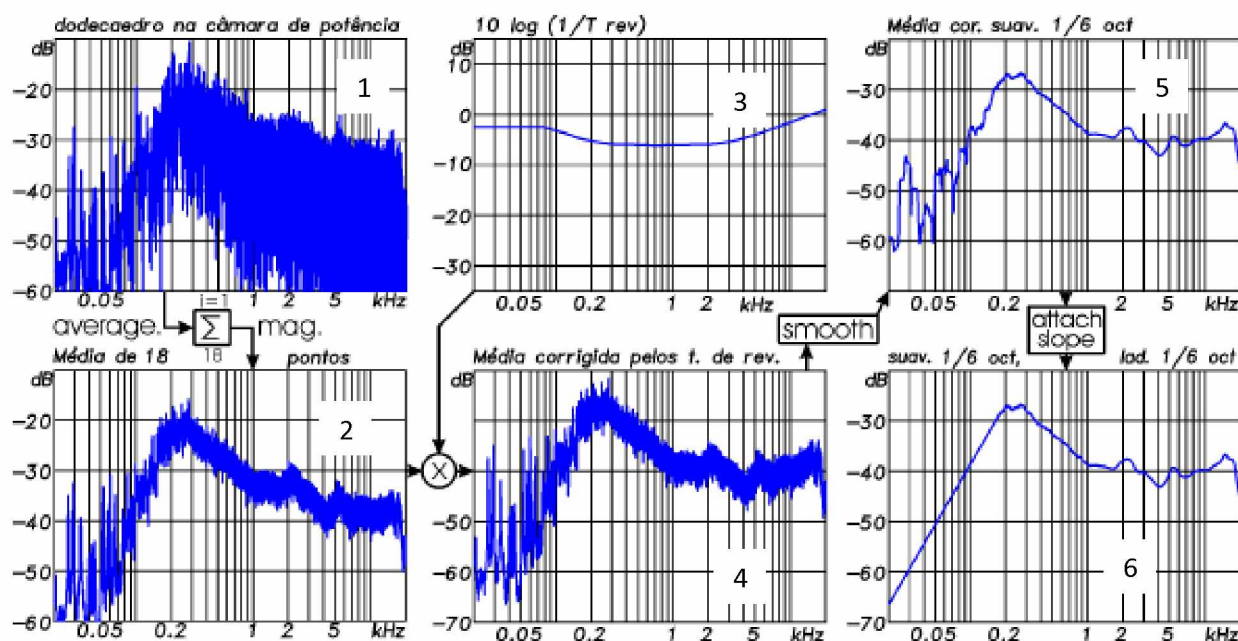


Рис. 2.3 – Этапы получения спектра акустического мощности громкоговорителя в диффузном поле реверберационной камеры

На низких частотах сглаженная ЧХ (зависимость 5) искажена влиянием собственных мод реверберационной камеры, плотность которых недостаточна для эффективного усреднения на низких частотах. Для получения ПФ громкоговорителя заменяют низкочастотный участок ПФ наклонной кривой с теоретическим уменьшением чувствительности динамика 12 дБ/октава для акустической системы закрытого типа или 24 дБ/октава для системы открытого типа (зависимость 6). Комплексную ПФ получают, дополняя полученную таким образом ЧХ акустической мощности фазо-частотной характеристикой, измеренной в безэховой камере в опорном направлении громкоговорителя.

Полученная ЧХ представляет собой частотную зависимость чувствительности громкоговорителя на излучение по мощности в полосе частот усреднения, примененного при сглаживании. Аналогом этой характеристики для приёмника звука является чувствительность по мощности в полосе частот, усредненная в телесном угле 4π . Если перейти к терминам, используемым при описании приёмника звука, то чувствительность в полосе частот, усредненную в телесном угле 4π , называют чувствительностью по диффузному полю, которую широко используют в воздушной акустике при измерениях в диффузном и реверберационных звуковых полях.

В методе **гомоморфной время-селективной постобработки** (ГПО) экспериментально полученную ЧХ также заменяют прямой на низких частотах, несмотря на то, что измерения выполняют в заглушенной камере [22]. Заглушенную камеру принято называть «безэховой», но это справедливо лишь в ограниченном диапазоне частот. С уменьшением частоты звукопоглощающие свойства покрытия камеры ухудшаются, что приводит к появлению отражений, которые искажают измеренную ЧХ осцилляциями. Дополнительным источником искажений является малое отношение сигнал-шум, поскольку в качестве излучателя используют обратимый преобразователь.

Помимо указанных проблем возможности измерений на низких частотах ограничивают следующие факторы:

- крутые наклоны ЧХ излучателя, который ведет себя как монополь на частотах с длиной излучаемой волны много большей размеров излучателя, требуют высокой стабильности частоты сигнала и высокого разрешения по частоте;
- повышение отношения сигнал-шум накоплением увеличивает продолжительность измерительного эксперимента;
- на результат низкочастотных измерений сильное влияние оказывают помехи питающей сети, вибрация, перекрестная электрическая помеха, внешний инфразвук и т.д.

Разработка метода измерений ЧХ на низких частотах требует, как минимум, решения проблемы устранения влияния отражений звука и обеспечения достаточного отношения сигнал-шум.

Выполненный анализ будет не полным без рассмотрения особенностей влияния на низких частотах оконной обработки, которая используется в большинстве современных методов измерений ЧХ. Эти особенности рассмотрим на примере метода ГПО, который применяют при калибровочных работах в воздушной акустике.

Этапы получения подробной частотной характеристики микрофона по полю методом время-селективной гомоморфной (относительно преобразования Фурье) постобработки, представлены на рисунке 1.4. В помещении с отражениями измеряют подробную комплексную частотную зависимость пары излучатель-приёмник. К полученной искаженной отражениями частотной зависимости применяют обратное преобразование Фурье, переходя, таким образом, из частотной области в квазивременную область временных задержек – квефренций. Полученный кепстр представляет собой последовательность из искомой ИХ пары излучатель-приёмник в свободном поле и сдвинутых относительно неё по оси квефренций в порядке прихода отражений в точку приёма копий ИХ.

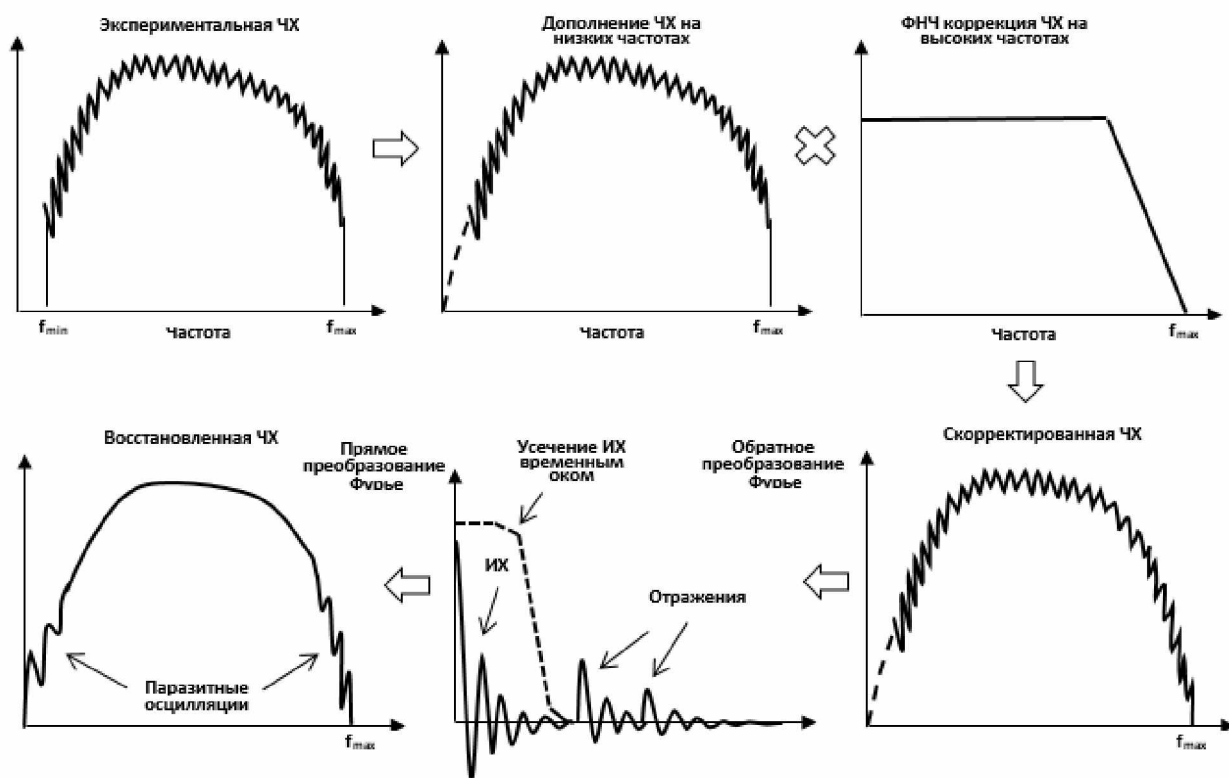


Рис. 1.4 – Схема процедуры удаления отражений из комплексной ЧХ

Полученный кепстр усекают окном по квефренции $\tau_q < \tau_{ref}$, оставляя незануленной свободную от отражений часть исходного кепстра. ЧХ в свободном поле получают прямым преобразованием Фурье усеченного кепстра. Результирующая частотная зависимость не будет искажена отражениями, но при этом может существенно отличаться на низких частотах от искомой ЧХ в свободном поле. Преобразование Фурье (прямое либо обратное) преобразует свертку в произведение и наоборот. Если усечение по квефренции представить как умножение кепстра на квазивременное окно (прямоугольной либо заданной формы) продолжительностью τ_q , то преобразование Фурье усеченного кепстра есть свертка искомой ЧХ и спектра примененного окна, что эквивалентно усреднению искомой ЧХ в эффективной полосе частот Δf_{eff} , ухудшающему частотное разрешение.

Применяемое окно не должно искажать искомую ИХ (должно быть равно единице в интервале квефренций искомой ИХ) и должно полностью устранять задержанные копии ИХ. Единичное прямоугольное окно удовлетворяет этим требованиям, но большие боковые лепестки спектра такого окна всегда вносят паразитную осцилляцию в ЧХ. Возникновение этой осцилляции обусловлено тем, что реальная ЧХ не затухает полностью в границах окна и усеченная ИХ приобретает резкий скачок. В наибольшей степени эта осцилляция проявляется на низких частотах, где значения ЧХ сравнимы с амплитудой осцилляции. Влияние скачка можно уменьшить, применяя временные окна со сглаженной характеристикой пропускания.

Другими словами, при реализации условий свободного поля происходят два действия, находящиеся в диалектическом противоречии. Одно действие имеет собой положительный результат – частотную зависимость очищают от искажений, вызванных отражениями, но результат другого действия противоположен по смыслу первому – искомую частотную характеристику искажают («размывают»), усредняя по частоте, что составляет «плату» за выигрыш от действия первого. При этом ширина частотной полосы «размытия» Δf_{eff} зависит от типа и параметров применяемого окна, а её связь с временем $\Delta \tau_{ref}$, предшествующим отражениям, подчинена известному соотношению неопределённости $\Delta f_{eff} \geq 1/\Delta \tau_{ref}$.

Помимо размытия по частоте использованию метода ГПО для градуировки ГПУ препятствуют два недостатка. Первый недостаток, как и при пошаговом увеличении частоты чистого тона, обусловлен чрезмерной продолжительностью измерений подробных ЧХ. Второй вызван необходимостью сохранять в процессе эксперимента гомоморфность постобработки. На практике это означает необходимость измерять ЧХ, что называется, «от ноля до ноля», то есть в частотном диапазоне, далеко простирающемся за границы рабочего диапазона излучателя и приёмника как в сторону низких, так и в сторону высоких частот.

При этом на низких частотах экспериментальную ЧХ искусственно достраивают до нулевой частоты, заменяя её кривой с наклоном 12 дБ/октава, и корректируют на высоких частотах, заменяя обрыв экспериментальных данных ЧХ убывающей до ноля зависимостью, поскольку обрыв нарушает казуальность ЧХ, что неизбежно сказывается на ИХ. Чтобы обеспечить необходимое отношение сигнал-шум, калибровку микрофона с использованием ГПО выполняют в заглушенной камере, которую в данном случае используют для изоляции от внешних шумов [22]. В отличие от воздушной акустики обеспечить такие условия при измерениях в лабораторном гидроакустическом бассейне не представляется возможным.

1.3 Выводы к главе

Измерения модуля ПФ с помощью самописца, управляющего разверткой частоты генератора, можно выполнять в двух зонах гидроакустического бассейна, которые с большой степенью условности можно отнести к зоне свободного и зоне диффузного звукового поля. При этом, размеры зоны свободного поля настолько малы, что она находится в пределах зоны ближнего поля приёмника и/или излучателя. Зона диффузного поля имеет большие размеры и удалена от излучателя, но качество диффузного поля не позволяет выполнять измерения с погрешностью менее 3 дБ [23].

Метод СВЗ не получил распространения в практике калибровочных работ в гидроакустике. Скорость звука в воде в пять раз больше скорости звука в воздухе, соответственно, в пять раз меньше запаздывание отражений относительно прямой волны. Это обстоятельство, а также большие амплитуды отраженных волн, вынуждают применять фильтры

с очень узкой полосой пропускания. Это приводит к недопустимым искажениям («выглаживанию») измеряемой ЧХ вследствие большой постоянной времени узкополосного фильтра. В низкочастотной области проявляется другой, присущий СВЗ, недостаток – искажения ЧХ осцилляциями. Этот эффект обусловлен тем, что на низких частотах суммарные частоты оказываются в полосе пропускания фильтра.

Плохая помехозащищенность ограничивает возможность применять БПФ-анализ при излучении широкополосного (шумового или квазишумового) сигнала. Накопление большого числа реализаций для повышения отношения сигнал-шум увеличивает время эксперимента, особенно на низких частотах. Многократные измерения при накоплении реализаций, вынуждают применять оконную обработку, ухудшая тем самым частотное разрешение. В наибольшей степени это ухудшает результаты на низких частотах. Приемлемую точность удаётся получить на частотах выше нескольких килогерц [7].

Малая помехозащищенность характерна и для измерений с использованием короткого одиночного импульса возбуждения, что также препятствует его применению для калибровки гидроакустического приёмника. Применение повторяющихся импульсов приводит к усечению по времени ИХ и соответствующим искажениям ЧХ.

Малое соотношение сигнал-шум в области низких частот и искажения прямоугольной формы сигнала излучателем и антиалайзинговым фильтром сводят на нет все преимущества использования М-последовательностей при калибровке в гидроакустическом бассейне.

Отдельного внимания заслуживают приёмы, используемые в методе ГПО для предварительной обработки ЧХ. Достаивание ЧХ на низких частотах и корректировку ЧХ на высоких частотах можно рассматривать как умножение равномерной ЧХ на функцию с крутыми нарастанием и спадом и плоской вершиной. Такое умножение приводит к «затягиванию» ИХ, подвергаемой оконной обработке, что увеличивает скачок при усечении ИХ.

Представляется целесообразным другое использование априорной информации о поведении ЧХ – выравнивание обрабатываемой частотной зависимости с тем, чтобы максимально приблизить ИХ, подвергаемую оконной обработке, к δ -функции Дирака. При этом должна сохраняться возможность обратной коррекции. Такой приём аналогичен априорному и апостериорному редактированию, предложенному в [6]. Представляется, что исключение глубокого провала зависимости на низких частотах при её выравнивании будет иметь по крайней мере два преимущества. Первое – исчезает область малых значений на низких частотах, в которой паразитная осцилляция вызывает наибольшие искажения. Второе – уменьшение скачка усеченной ИХ приведет к уменьшению амплитуды самой паразитной осцилляции. При обратной коррекции влияние осцилляции не изменится.

Обратим внимание, что недостатки упомянутых методов измерений в наибольшей степени проявляются на низких частотах. При измерении ЧХ акустической мощности в реверберационной камере, ЧХ на низких частотах вынуждены заменять наклонной прямой [24]. Эта замена вызвана большими осцилляциями ЧХ, обусловленными неустранимым недостатком реверберационной камеры – малая плотность мод собственных колебаний на низких частотах.

2. МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО ПРИЁМНОГО УСТРОЙСТВА НА ЧАСТОТАХ НИЖЕ 1 кГц

2.1 Тонально-импульсный метод

Чувствительность в свободном поле определена как отношение выходного напряжения холостого хода электроакустического преобразователя, предназначенного для приёма звука с определенного направления и на определённой частоте, к звуковому давлению в невозмущенном свободном поле бегущей плоской звуковой волны [25, 26]. В данном определении обращают на себя внимание понятия *частота* и *свободное поле*.

Ниже рассматривается процедура измерения чувствительности гидрофона по методу взаимности (абсолютный метод) с использованием в качестве излучателя обратимого преобразователя. Калибровка по методу взаимности основана на понятии передаточного импеданса пары излучатель-приёмник $Z_{PH}(f)$ в свободном звуковом поле:

$$Z_{PH}(f) = \frac{U_{PH}(f)}{I_P(f)}, \quad (1)$$

где $U_{PH}(f)$ – электрическое напряжение на выходе приёмника H в свободном звуковом поле;
 $I_P(f)$ – ток в цепи излучателя P .

Чтобы получить значение передаточного импеданса $Z_{PH}(f_0)$ на частоте f_0 необходимо аппаратно реализовать формулу измерений напряжения приёмника на частоте f_0 , которая представляет собой свертку частотной зависимости $U_{PH}(f)$ и δ -функции на частоте f_0 [27]:

$$U_{PH}(f_0) = \int_{-\infty}^{+\infty} U_{PH}(f) \cdot \delta(f - f_0) df. \quad (2)$$

То есть, чтобы получить значение напряжения на частоте необходимо использовать сигнал, спектральное представление которого имеет вид δ -функции. Чем больше длительность сигнала, тем «ближе» форма его спектра $A(f)$ к δ -функции. На практике в качестве такого сигнала применяются гармонические сигналы различной длительности, при этом вместо формулы (2) реализуется формула (3):

$$U_{PH}(f_0) = \int_{-\infty}^{+\infty} U_{PH}(f) \cdot A(f - f_0) df. \quad (3)$$

Частотная зависимость напряжения приёмника измеряется, используя гармонические сигналы с различными частотами, при этом частотное разрешение измерений и, соответственно,

качество получаемой экспериментальной зависимости будут определяться длительностью гармонических сигналов, а не близостью их частот. Это происходит потому, что спектр гармонического сигнала конечной длительности имеет вид функции $\frac{\sin x}{x}$ и, в отличие от δ -функции, принимает ненулевые значения на всей оси частот, включая область слева от нуля оси частот.

Следует обратить внимание на важные различия формул (2) и (3) – δ -функция отлична от нуля в единственной точке f_0 на оси частот, вследствие чего её можно рассматривать, как характеристику пропускания идеального узкополосного фильтра. Поскольку для инженерных приложений интерес представляют положительные частоты, это свойство δ -функции позволяет заменить нулем нижний предел интегрирования в формуле (2). Такая замена несправедлива для формулы (3). Результат измерений по формуле (2) не зависит от поведения частотной зависимости $U_{PH}(f)$ на частотах, отличных от f_0 . Результат измерений по формуле (3) включает в себя значения $U_{PH}(f)$ на всех частотах, как справа, так и слева от нуля оси частот. Покажем, как эти различия проявляются при калибровке гидрофона в области частот близких к нулю.

При измерениях в гидроакустическом бассейне ограниченных размеров условия свободного поля реализуют, сокращая длительность гармонического сигнала до времени прихода первого отражения t_1 (тонально-импульсный метод). Спектр тонального импульса, существенно отличается от δ -функции. На практике это отличие принято выражать шириной центрального лепестка функции $\frac{\sin x}{x}$, которая определяет разрешение измерений по частоте, равное $\frac{2}{t_1}$. Если в формуле (3) вместо спектра тонального импульса подставить центральный лепесток функции $\frac{\sin x}{x}$, на который приходится основная часть энергии импульса [27], то результатом свертки будет усреднение зависимости $U_{PH}(f)$ в частотном интервале от $f_0 - \frac{1}{t_1}$ до $f_0 + \frac{1}{t_1}$. Поэтому при измерениях тонально-импульсным методом получают не $U_{PH}(f_0)$ в свободном звуковом поле, а его некоторую, полученную усреднением, оценку «по свободному полю».

Рассмотрим поведение частотной зависимости $U_{PH}(f)$ в области близкой к нулю частот. Излучательная способность обратимого преобразователя (чувствительность по току в режиме излучения) $S_P(f)$ связана с чувствительностью на приём $M_P(f)$ соотношением (4):

$$S_P(f) = J^{-1}(f) \cdot M_P(f), \quad (4)$$

где $J(f) = \frac{2}{j\rho f} e^{jkr_0}$ – параметр взаимности;

j – мнимая единица;

ρ – плотность воды;

f – частота;

k – волновое число;

r_0 – опорное расстояние, равное 1 м.

Звуковое давление, создаваемое излучателем, пропорционально его чувствительности по току $S_p(f)$ и току возбуждения излучателя $I_p(f)$. При этом для звукового давления, создаваемого обратимым излучателем, получим:

$$P(f) = J^{-1}(f) \cdot I_p(f) \cdot M_p(f). \quad (5)$$

Напряжение на выходе приёмника с чувствительностью $M_H(f)$ связано со звуковым давлением $P(f)$, которое создает обратимый преобразователь в точке расположения приёмника, соотношением (6):

$$U_{pH}(f) = M_H(f) \cdot P(f). \quad (6)$$

То есть, в свободном звуковом поле поведение частотной зависимости напряжения на выходе приёмника задает не только частотная зависимость чувствительности самого калибруемого приёмника, но и частотная зависимость звукового давления, создаваемого излучателем.

Учитывая, что на низких частотах ток в цепи излучателя пропорционален частоте [28], получим, что, даже если чувствительность обратимого излучателя на приём равномерна, начиная от нуля оси частот, то создаваемое излучателем звуковое давление будет пропорционально квадрату частоты и равно нулю при $f_0 = 0$. То есть, измеряемая частотная зависимость напряжения $U_{pH}(f)$ для пары излучатель-приёмник будет принципиально неравномерной (кривая 2 на рис. 2.1). Прямоугольниками на рисунке 2.1 показаны частотные интервалы усреднения от $f_0 - \frac{1}{t_1}$ до $f_0 + \frac{1}{t_1}$ и положения центрального лепестка спектра тонального импульса при измерениях тонально-импульсным методом для случаев, когда частота f_0 близка к нулю оси частот и удалена от него.

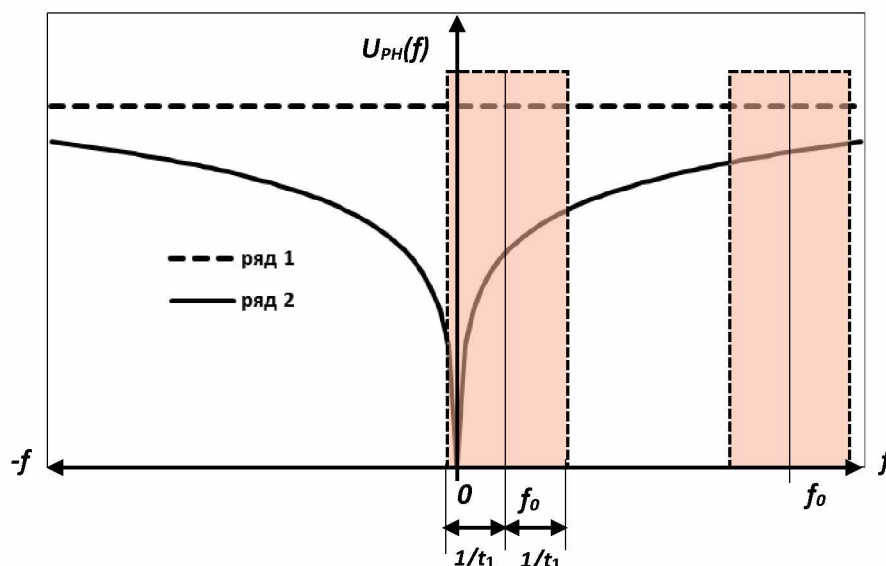


Рисунок 2.1 – Частотная зависимость напряжения $U_{PH}(f)$ для пары излучатель-приёмник

Результат усреднения по формуле (3) практически не скажется на точности измерения $U_{PH}(f_0)$, если зависимость $U_{PH}(f)$ в частотном интервале усреднения слабо зависит от частоты. Такое поведение характерно для частотных зависимостей, измеряемых при калибровке гидрофона по свободному полю на средних и высоких частотах. На частотах, удаленных от нуля оси частот, результат свёртки частотной зависимости напряжения приёмника и спектра тонального импульса близок к значению частотной зависимости напряжения на частоте заполнения тонального импульса. При выполнении низкочастотных калибровок на ключевых сличениях ССАUV/W-K1 минимальная глубина погружения пары излучатель-приёмник составляла 2,5 м. Условия свободного поля обеспечивали временной селекцией тонального импульса. Частотное разрешение измерений, оцененное по ширине центрального лепестка спектра тонального импульса, составляло 600 Гц. При этом на частотах от 1 кГц и выше погрешность, обусловленная частотным разрешением измерений (установление амплитуды сигнала), была оценена участниками сличений от 0,6 до 3 % [29]. При калибровке гидрофона по свободному полю на частотах выше нескольких килогерц оказывается достаточным частотное разрешение 1000 Гц и более. Это подтверждают эксперименты с калибровками гидрофонов в водных резервуарах, многократно различающихся по размерам [30].

Картина кардинально меняется при калибровке гидрофона в области, примыкающей к нулю оси частот. Для казуальной системы, к которой относится пара излучатель-приёмник в звуковом поле, реакция не может опережать воздействие. ИХ такой системы существует только на положительной части временной оси. В соответствии со свойствами Фурье преобразования, ЧХ казуальной системы существует на всей оси частот, причем модуль ЧХ симметричен

относительно оси, проходящей через ноль, как это изображено на рисунке 2.1. Узкий и глубокий провал ЧХ можно трактовать как антирезонанс системы с очень высокой добротностью на нулевой частоте. Одно из свойств резонансных систем состоит в том, что чем ближе частота возбуждения к резонансу, тем значительнее проявляется переходной процесс. На практике это проявляется в том, что сигнал на выходе приёмника не успевает установиться до окончания тонального импульса. Таким образом, конечное разрешение по частоте ограничивает нижнюю частоту калибровки гидрофона тонально-импульсным методом.

Рассмотрим гипотетический случай, когда частотная зависимость напряжения пары излучатель-приёмник равномерна, начиная от нуля оси частот (показана пунктирной прямой 1 на рисунке 2.1). Такая частотная зависимость присуща безынерционной системе, в которой переходной процесс отсутствует. В этой ситуации измерение напряжения приёмника с использованием тонального импульса длительностью t_1 дало бы правильный результат для любой частоты f_0 , сколь угодно близкой к нулю оси частот. Несмотря на конечное разрешение измерений по частоте, получаемая оценка по свободному полю будет совпадать со значением $U_{PH}(f_0)$ в свободном звуковом поле. К сожалению, на практике подобная ситуация невозможна. Наличие антирезонанса не зависит ни от свойств излучателя, ни от свойств приёмника и обусловлено отсутствием излучения звуковых волн на нулевой частоте. Вследствие свертки существенно неравномерной частотной зависимости $U_{PH}(f)$ результат измерений напряжения $U_{PH}(f_0)$ тонально-импульсным методом на частотах меньших $2/t_1$ будет искажен тем значительнее, чем больше прямоугольник на рисунке 2.1 перекрывает область антирезонанса. Попытки «выровнять» измеряемую частотную зависимость на низких частотах (например, предискажением спектра тонального импульса или применением корректирующих электрических цепей [31, 32]) приводят к уменьшению искажений сигнала переходным процессом, но не позволяют преодолеть ограничение на нижнюю частоту f_H калибровки тонально-импульсным методом $f_H \geq 1/t_1$. Частоту 1 кГц принято воспринимать, как нижнюю частоту калибровки гидрофона по свободному полю в бассейне. На самом деле частота 1 кГц – это нижняя частота метода временной селекции тонального импульса, который применяют для калибровки по свободному полю, но ни как не нижняя частота калибровки гидрофона по свободному полю [31].

Анализ формулы (3) направлен на демонстрацию того, что измерению напряжения приёмника на частоте тонального импульса препятствует форма самой определяемой в эксперименте частотной зависимости, в том числе, на частотах, удаленных от частоты измерений. Иначе говоря, форма самой измеряемой частотной зависимости влияет на принимаемый сигнал, искажая его переходным процессом. Чтобы исключить влияние переходного процесса в коротком принимаемом сигнале, можно построить математическую

модель, описывающую переходной процесс в системе излучатель-приёмник, и экстраполировать сигнал в установившееся состояние (например, методом Прони) [33, 34, 35]. Трудности, связанные с такой экстраполяцией, обусловлены тем, что учитывающая влияние переходных процессов модель сигнала является нелинейной, требуется нелинейный алгоритм подгонки, для которого необходимы хорошие начальные оценки параметров модели. Но, такая модель строится, в том числе на результатах измерения ЧХ. Если бы удалось измерить ЧХ, то задача калибровки на этом была бы решена. Подобный подход применим только для типовой частотной зависимости, то есть, когда для одного объекта в идеальных условиях точно измеряют частотную зависимость, а затем построенную на основании этих измерений модель применяют для аналогичных объектов. Примером могут служить контрольные измерения характеристик громкоговорителей и телефонов при их серийном производстве.

Чтобы, работая с сигналом, ослабить искажения переходным процессом увеличивают продолжительность сигнала, захватывая несколько первых отражений [36]. Используя результаты измерений во всем частотном диапазоне калибровки, строят модель, учитывающую переходные процессы и влияние отражений. Использование более продолжительных сигналов улучшает частотное разрешение измерений и позволяет «прописать» частотную характеристику ближе к антирезонансу, вплоть до частот, на которых до прихода первого отражения удается наблюдать лишь часть периода сигнала. Описанный способ малоприменим для практического применения: «расширенная» модель включает неприемлемо большое число параметров, подлежащих определению при решении обратной задачи (366 параметров в [36]). Обработка экспериментальных данных включает отбраковку противоречащих модели результатов применения метода наименьших квадратов. На качество экстраполяции сигнала влияет плохая обусловленность многопараметрической модели. При этом, плохое отношение сигнал-шум на низких частотах усугубляет проблему устойчивости результата. Из критичных факторов отмечено [36] влияние температуры и точности определения времени прихода отражений. Последнее обстоятельство не позволяет применить метод в бассейне, облицованном звукопоглощающими клиньями.

В качестве итога проведенного анализа можно сделать следующий вывод. Чтобы детально «прописать» ЧХ в области низкочастотного антирезонанса требуется высокое частотное разрешение измерений, что обуславливает необходимость использования продолжительного сигнала. Однако в этом случае принимаемый сигнал будет искажен отражениями звуковых волн в бассейне. То есть, решить с приемлемым качеством проблему измерений ЧХ приёмника на низких частотах, оставаясь в рамках модели «сигнал», не удаётся.

Проблему измерений ЧХ приёмника на низких частотах можно решить, если от сигнала перейти к свойствам физической системы, например, к её комплексной ЧХ. При использовании

ЧХ системы пропадает необходимость построения сложных математических моделей переходного процесса, либо реверберационного звукового поля в бассейне.

2.2 Техника СКВУ и предлагаемый метод

Метод СКВУ отличается от тонально-импульсного метода тем, что измерения частотной зависимости напряжения приёмника выполняют в реверберационном звуковом поле бассейна (в присутствии отраженных звуковых волн). При этом принципиальных ограничений на продолжительность измерений и, соответственно, разрешение измерений по частоте, не возникает. Чтобы получить зависимость по свободному полю (подавить искажения, обусловленные отражениями звука в бассейне), разрешение по частоте у измеренной зависимости искусственно ухудшают, внося в результат усреднение в специальном образом подобранных частотных интервалах (обрабатывают скользящим взвешенным усреднением) [5]:

$$\dot{U}_{PH}(f, \Delta f_{vy}) = \frac{1}{\prod_{i=1}^n 1/\tau_i} \int_{f-\Delta f_{vy}/2}^{f+\Delta f_{vy}/2} \dot{U}_{PH}(f-f') W_{vy}(f) df', \quad (7)$$

где $\dot{U}_{PH}(f, \Delta f_{vy})$ – частотная зависимость выходного напряжения приёмника по свободному полю;

Δf_{vy} – частотный интервал взвешенного усреднения;

n – количество отражений, подлежащих подавлению;

τ_i – запаздывание i -й отраженной волны в точке приёма;

$W_{vy}(f)$ – взвешивающая функция, полученная сверткой n единичных прямоугольных окон шириной τ_i .

Существенными для решаемой задачи преимуществами метода СКВУ являются минимальное, в сравнении с применяемыми в метрологической практике методами, искажение усреднением по частоте и возможность обрабатывать компактный фрагмент частотной зависимости, измеряемой в рабочем диапазоне излучателя [5].

Поскольку обрабатывают не сигнал, а частотную зависимость, метод дает возможность применять к ней разнообразные способы частотной коррекции, основанные на использовании априорной и апостериорной информации [6, 37, 38]. Для дальнейших рассуждений необходимо отметить важную особенность – обработке СКВУ подвергается частотная зависимость, измеренная с очень высоким разрешением по частоте, которое на практике определяется не временем прихода первого отражения (тонально-импульсный метод), а, например, продолжительностью излучения и скоростью перестройки частоты ЛЧМ-сигнала. Полученная частотная зависимость искажена отражениями, но благодаря высокому разрешению по частоте

содержит детальную информацию о поведении $J(f)$ и $I_p(f)$, в том числе на самых низких частотах в области антирезонанса.

Отражения звука в бассейне не являются препятствием для электрических измерений, поэтому частотную зависимость тока излучателя можно получить до самых низких частот. Зависимость параметра взаимности от частоты известна. Это позволяет исключить в экспериментальной частотной зависимости изменения, обусловленные методом измерений (параметр взаимности $J(f)$) и способом измерения тока излучателя $I_p(f)$, примененным в эталонной установке, то есть частотные зависимости, которые не обусловлены свойствами калибруемого гидрофона.

Такие коррекции позволяют максимально «выравнивать» подвергаемую обработке усреднением частотную зависимость и приблизить её к рассмотренной выше гипотетической ситуации с безынерционной системой. Это многократно ослабляет искажения результата измерений, обусловленные конечным разрешением по частоте. При использовании метода СКВУ ничто не препятствует применению коррекций в области, прилегающей к нулю оси частот.

Возможность использовать метод СКВУ для калибровки гидрофона в бассейне на частотах существенно меньших 1 кГц была подтверждена как рутинными калибровками, так и международными сличениями, включая ключевые сличения МКМВ. Для проверки возможности калибровки гидрофона на частотах, примыкающих к нулю оси частот, был поставлен следующий эксперимент.

В качестве излучателя применялись обратимый гидрофон ИТС1001 с активным элементом диаметром 100 мм. В качестве приёмников гидрофоны: рабочий эталон 1-го разряда ГИЗ4 и гидрофон В&К 8104. Гидрофоны ГИЗ4 и В&К 8104 были предварительно откалиброваны по давлению на частотах от 1 Гц до 1000 Гц в акустической камере малого объема ГЭТ 55-2017. После чего была выполнена калибровка гидрофона В&К 8104 по свободному полю в гидроакустическом бассейне ГЭТ 55-2017, минимальный размер которого (глубина) составляет 6 м.

При калибровке в бассейне применялся метод сличения с опорным гидрофоном. Метод взаимности требует измерений ПИ трёх пар излучатель-приёмник. В отличие от метода взаимности, при калибровке методом сличения достаточно измерять выходные напряжения опорного и калибруемого гидрофонов и контролировать неизменность тока излучателя. В эксперименте использовался модифицированный метод сличения, при котором чувствительность определялась не по отношению напряжений, а по отношению ПИ опорного и калибруемого гидрофонов. В качестве опорного гидрофона использовался рабочий эталон ГИЗ4. Используя один и тот же электрический тракт регистрировался ток в цепи излучателя и выходные напряжения для двух пар излучатель-приёмник: излучатель-опорный гидрофон и излучатель-

калибруемый гидрофон. Оцифрованные записи сигналов тока и напряжения записывались в память компьютера.

В качестве сигналов использовалась квадратурно-дополненная пара (косинусный и синусный) ЛЧМ-сигналов $i_{cos}(t)$ и $i_{sin}(t)$, мгновенная частота которых непрерывно изменялась от 2000 Гц до нуля и далее до 2000 Гц сохраняя непрерывность фазы сигнала при переходе частоты через нуль. Излучения ЛЧМ-сигнала повторялись через паузу, превосходящую время реверберации в бассейне. Для повышения отношения сигнал-шум использовалось синхронное накопление принятых сигналов.

Применение сигнала такого вида имеет ряд преимуществ. Первое – если в эксперименте под частотой понимать не количество колебаний в секунду, а производную фазы сигнала по времени, то частотную зависимость, полученную при изменении частоты от нуля до 2000 Гц, можно отнести к области положительных частот комплексной частотной характеристики, от 2000 Гц до нуля – к области отрицательных частот. Второе преимущество заключается в том, что сохранение непрерывности фазы сигнала при переходе частоты через ноль позволяет корректно учесть искажения, обусловленные реверберацией звука в бассейне. Еще одно преимущество, важное при проведении исследований, заключается в возможности выявлять влияние эффектов, обусловленных нестационарностью ЛЧМ-сигнала [7, 39]. При изменении знака приращения фазы излучаемого сигнала эти эффекты проявляются в изменении искажений измеряемой зависимости остаточными переходными процессами в системе излучатель-приёмник, а также изменении картины реверберационных искажений вследствие запаздывания в точке приёма эхо-сигналов относительно прямого сигнала излучателя.

На рисунке 2.2 для пары излучатель-гидрофон изображены сигналограммы тока в цепи излучателя и напряжения на выходе гидрофона, очищенные от шумовой помехи синхронным накоплением.

Следует обратить внимание, что в отличие от сигналограммы тока, симметричной относительно момента перехода через нулевую частоту, симметричность сигналограммы напряжения нарушена реверберационными искажениями.

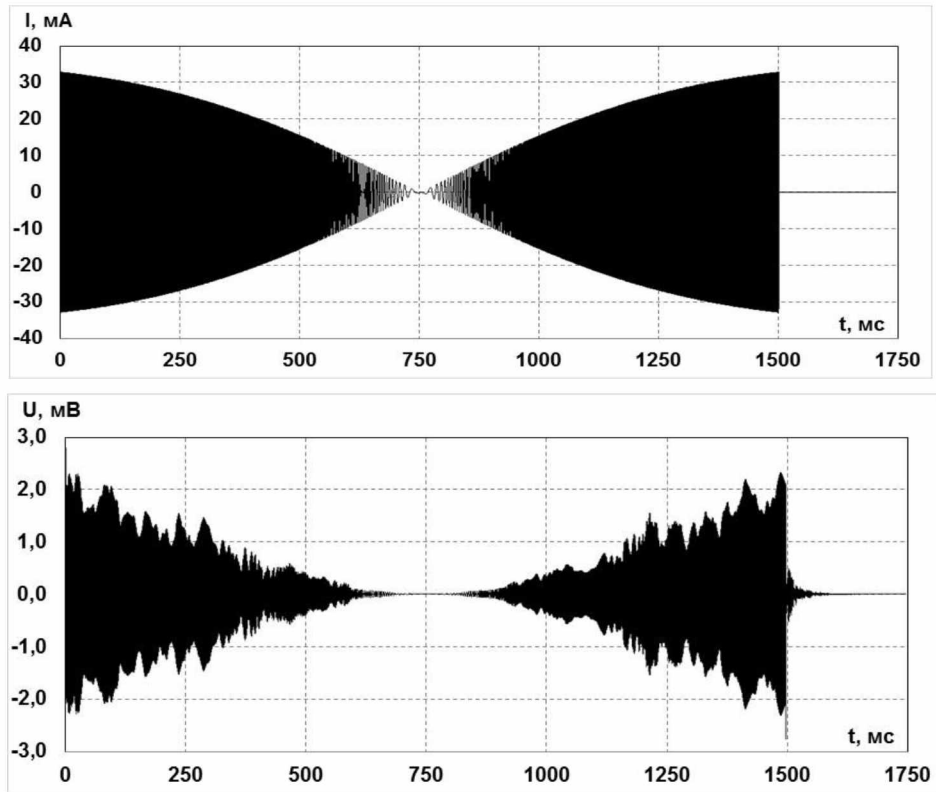


Рисунок 2.2 – Сигналограммы тока в цепи излучателя и напряжения на выходе гидрофона, очищенные от шумовой помехи синхронным накоплением

Из зафиксированных в памяти компьютера косинусного и синусного (квадратурно-дополненных) сигналов образовывались квадратурная и синфазная составляющие комплексной формы сигналов тока $i(t) = i_{cos}(t) + ji_{sin}(t)$ и (с учетом временной задержки τ_d распространения прямого сигнала излучателя) напряжения $u(t) = u_{cos}(t - \tau_d) + ju_{sin}(t - \tau_d)$. Чтобы из полученных комплексных сигналов перейти к частотным зависимостям, выполнялась операция детектирования $Z(t) = \frac{u(t)}{i(t)}$, получая, тем самым, огибающую сигнала [6]. При этом применялись меры, позволяющие избежать больших искажений, обусловленных остаточной помехой при малом полезном сигнале в окрестности антирезонанса. Затем, исходя из параметров ЛЧМ-сигнала, в огибающей $Z(t)$ переменная t (время) заменялась переменной f (частота): $Z_{PH}(f) = Z(t)|_{t \rightarrow f}$.

Полученная комплексная частотная зависимость электрического ПИ пары излучатель-приёмник в реверберационном поле $Z_{PH}(f)$ умножалась на $J^{-1}(f)$ (коррекция на частотную зависимость параметра взаимности, с учётом мер, исключающих деление на ноль) и обрабатывалась по методу СКВУ.

Синфазная и квадратурная составляющие скорректированной комплексной частотной зависимости ПИ изображены на рисунке 2.3 для интервала частот от -2000 до 2000 Гц, симметричном относительно нуля.

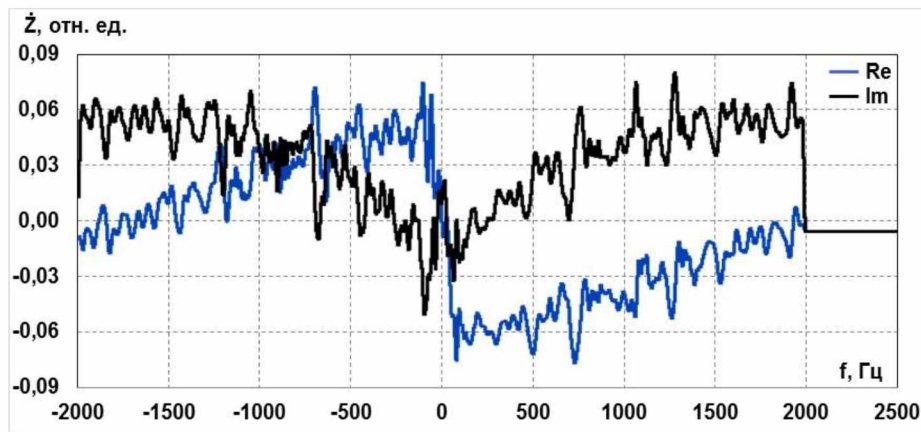


Рисунок 2.3 – Синфазная и квадратурная составляющие скорректированной комплексной частотной зависимости ПИ

Представляется целесообразным следующее замечание: следствием постулата о казуальности (причинности) физически реализуемой системы (реакция такой системы на воздействие не может опережать воздействие во времени) является чётная сопряженность комплексной ЧХ системы. Применительно к комплексной ЧХ ПИ пары излучатель-приёмник, чётная сопряженность (выражается соотношением $Z_{PH}(f) = Z_{PH}^*(-f)$, где Z_{PH}^* – комплексное сопряжение к Z_{PH}) означает, что каждой частотной компоненте $Z_{PH}(f_i)$ в области положительных частот соответствует компонента в области отрицательных частот $Z_{PH}(-f_i)$ с той же амплитудой и противоположной фазой, или, что эквивалентно, равной действительной частью и противоположной по знаку мнимой частью (синфазная и квадратурная составляющие на рисунке 2.3). Учет свойства четной сопряженности позволяет упростить эксперимент по определению частотной зависимости ПИ, ограничив измерения только положительными либо только отрицательными частотами с тем, чтобы, воспользовавшись, например, операциями комплексного сопряжения или преобразования Гильберта [27], получать комплексную частотную зависимость для отрицательных частот по частотной зависимости для положительных частот и наоборот. Применяя этот приём, следует помнить о переходных процессах, возникающих в системе излучатель-приёмник в моменты начала и завершения излучения. При изменении частоты ЛЧМ-сигнала только в положительной, либо отрицательной областях, начало, либо завершение излучения неизбежно попадает в область примыкающих к нулю частот, в которой даже самый незначительный переходной процесс, накладываясь на шумовую помеху, делает результат измерений непригодным для дальнейшей обработки. При изменении частоты по предложенной выше схеме переходные процессы оказываются за пределами представляющего интерес частотного диапазона.

Несмотря на принимаемые меры синфазная и квадратурная составляющие искажены помехой вблизи нуля оси частот, где полезный сигнал практически отсутствует. На рисунке 2.3

искажения помехой малозаметны на фоне реверберационных искажений. Чтобы показать искажения помехой следует обратиться к рисунку 2.4, на котором изображены амплитудно- и фазо-частотная зависимости ПИ.

Особо заметны искажения помехой на фазо-частотной зависимости (рисунок 2.4 (б)). Эксперименты показали, что искажения помехой сосредоточены в сравнительно узком интервале, симметричном относительно нуля частот. На ширину этого интервала влияют расстояние между излучателем и приёмником, чувствительности излучателей и приёмников, качество экранировки преобразователей, количество синхронных накоплений, помеховая обстановка во время эксперимента и т.п. В описываемых экспериментах ширина интервала составила 70–140 Гц.

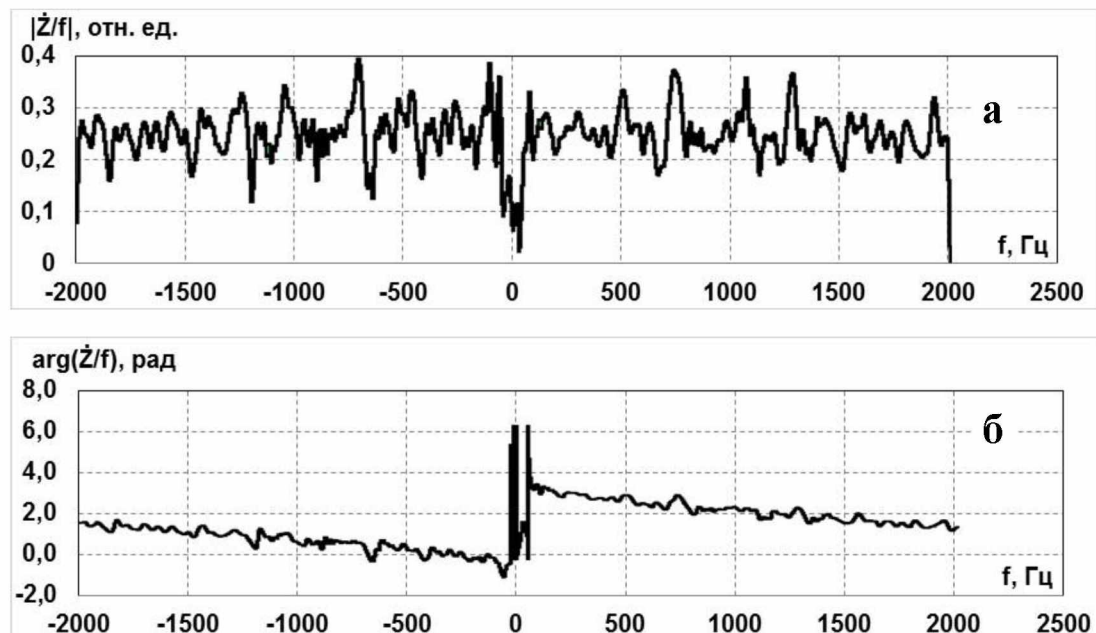


Рисунок 2.4 – (а) – амплитудно-частотная и (б) – фазо-частотная зависимости ПИ пары излучатель-приёмник в реверберационном звуковом поле бассейна

Для подавления реверберационных искажений, к синфазной и квадратурной составляющим ПИ применялась обработка по методу СКВУ. Принцип обработки по методу СКВУ основан на рассмотрении реверберационных искажений как суммы вкладов отражений, приходящих в точку приёма последовательно во времени. Отражение, задержанное относительно прямого сигнала излучателя на время t_i , накладывает на измеренную частотную зависимость осцилляционное искажение, повторяющееся с периодом $1/t_i$. Обратим внимание, что речь идет о частотных зависимостях, поэтому период осцилляционных искажений имеет размерность частоты. Подавление реверберационных искажений выполняется последовательным подавлением искажений, вызванных отдельными отражениями и для отражения, задержанного

на время t_i , достигается скользящим равновзвешенным усреднением в частотном интервале шириной $1/t_i$. Скользящее усреднение применяется отдельно к синфазной и квадратурной составляющим комплексной частотной зависимости. Установлено, что для практически полного подавления реверберационных искажений достаточно подавить усреднением три первых значимых отражения [5, 6, 7]. Результат применения нескольких равновзвешенных усреднений эквивалентен одному взвешенному усреднению. Эффективная ширина частотного интервала такого усреднения незначительно превосходит $1/t_i$ [5]. Очевидно, что результатом усреднения будет ухудшение разрешения по частоте получаемой частотной зависимости до $1/t_i$, что является неизбежной платой за «подавление» отражений. Отметим, что после явно выполняемого при обработке по методу СКВУ усреднения в частотном интервале с эффективной шириной $1/t_i$ разрешение по частоте оказывается вдвое лучшим, чем частотное разрешение в результате неявного усреднения частотной зависимости, измеренной тонально-импульсным методом.

В эксперименте задержка первого отражения составляла около 4 мс, при этом эффективная ширина частотного интервала усреднения составляла примерно 250 Гц. На рисунке 2.5 представлены амплитудно- и фазо-частотная зависимости ПИ, очищенные от реверберационных искажений по методу СКВУ. На графике амплитудной зависимости виден глубокий провал в окрестности нуля частот.

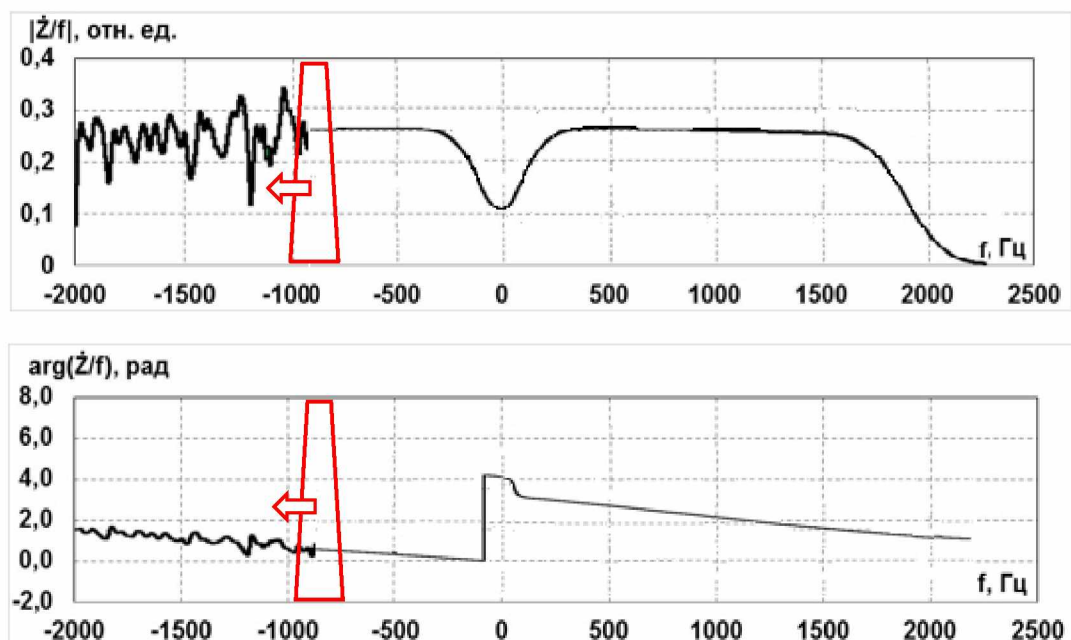


Рисунок 2.5 – Амплитудно- и фазо-частотная зависимости передаточного импеданса, очищенные от реверберационных искажений по методу СКВУ

Фазо-частотная зависимость тоже искажена. Возникновение этих искажений можно объяснить, обратившись к рисунку 2.4, на котором виден провал амплитудной зависимости и резкие искажения фазо-частотной зависимости. Ширина интервала, искаженного помехой,

соизмерима с эффективной шириной частотного интервала усреднения, что и объясняет провал амплитудной зависимости на 45 % (рисунок 2.5) и нарушение получаемой частотной зависимости за пределами интервала, искаженного помехой. Эти нарушения являются побочным эффектом скользящего усреднения, который преобразует короткий пик либо провал в фигуру с фронтами, растянутыми на ширину эффективного интервала усреднения СКВУ.

Влияние помехи на результат СКВУ удастся уменьшить применением достаточно простых приёмов. Первый заключается в «спрямлении» измеренной частотной зависимости в частотном интервале, искаженном помехой. Результат такого «спрямления» показан на рисунке 2.6.

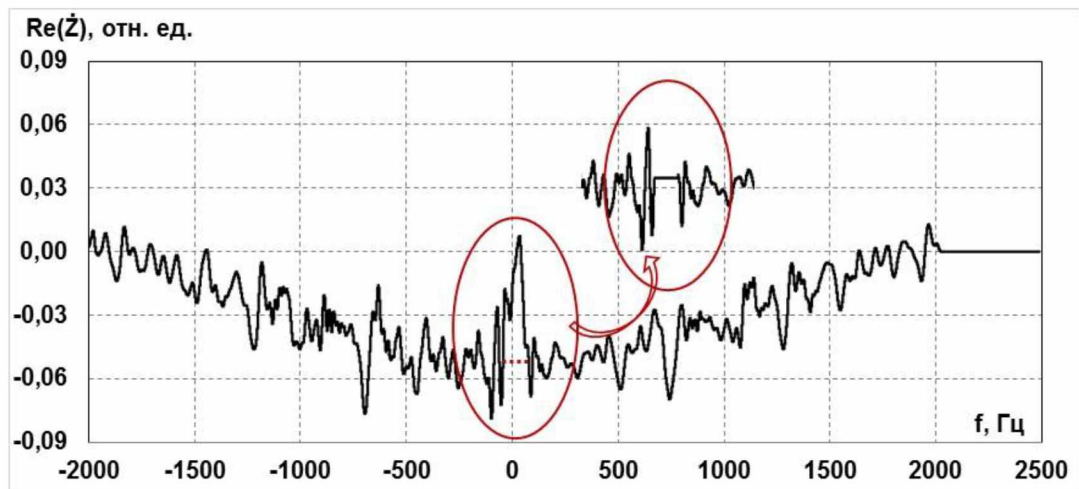
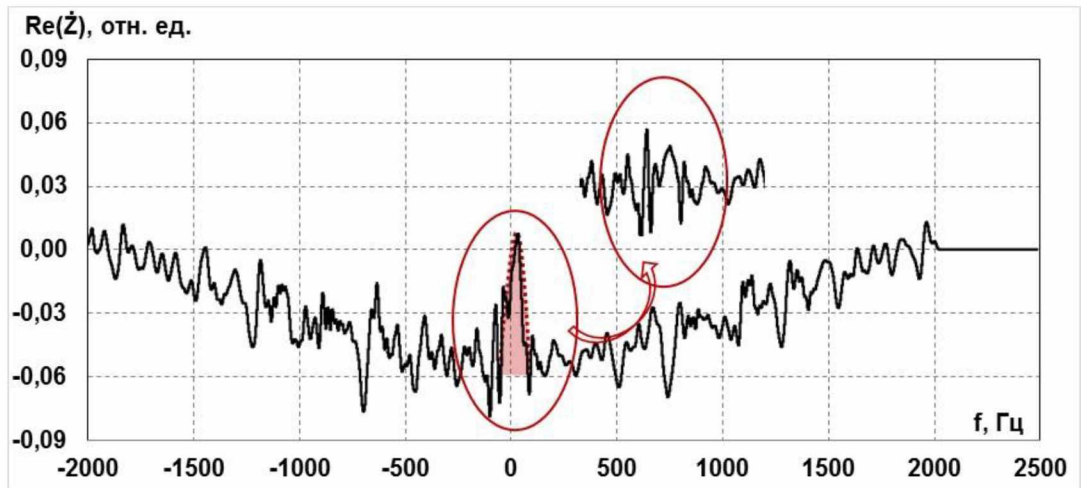


Рисунок 2.6 – «Спрявление» измеренной частотной зависимости, искаженной помехой

В случаях, когда искажения имеют вид узких и резких выбросов и провалов, можно использовать нелинейную обработку, названную в [40] «методом парикмахера», который заключается в «простригании» выбросов и провалов, выходящих за норму, устанавливаемую исходя из выбранного критерия.

Когда искажения помехой имеют вид пьедестала с незначительными осцилляциями, можно аппроксимировать пьедестал гладкой кривой и вычесть её перед обработкой по методу СКВУ, как это продемонстрировано на рисунке 2.7.



Рисунке 2.7 – Аппроксимация измеренной частотной зависимости, искаженной помехой

Описанные приёмы дают примерно равнозначные результаты. Полностью устранить влияние помехи не удаётся. При этом в получаемой после применения СКВУ частотной зависимости на месте провала может образоваться горб. Однако влияние искаженного помехой интервала удастся уменьшить в 7–10 раз, что можно оценить по зависимостям на рисунке 2.8.

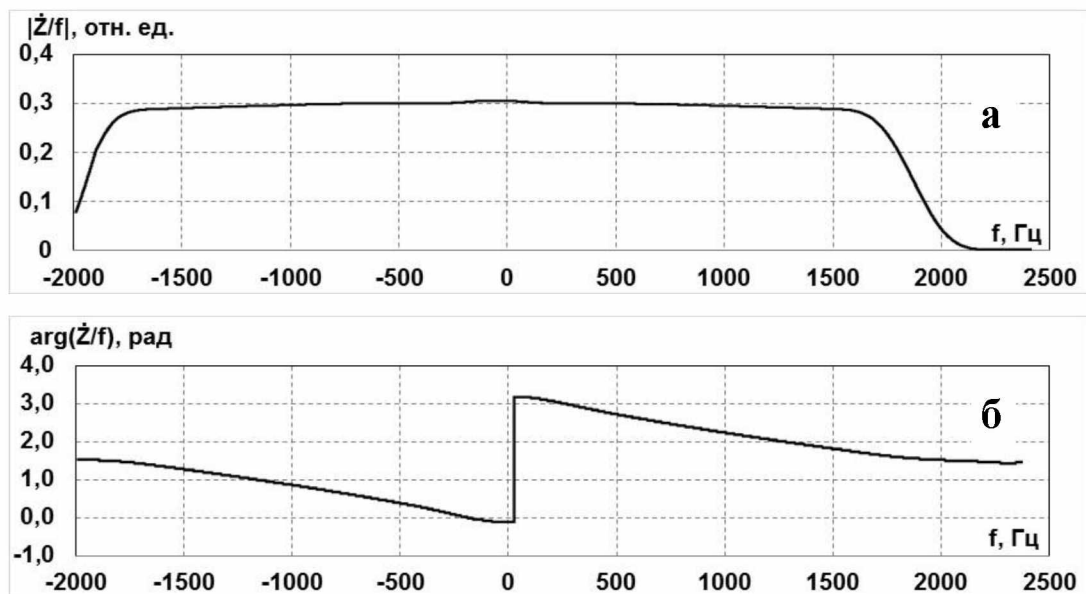


Рисунок 2.8 – Амплитудно- и фазо-частотная зависимости ПИ
после частичного устранения влияния помехи

В описываемых экспериментах остаточные искажения, получаемых по методу СКВУ, амплитудно-частотных зависимостей на частотах, не превосходящих по абсолютной величине ширину эффективного интервала усреднения СКВУ, были уменьшены до величин, не превосходящих 3–5 %.

Использование амплитудно-частотных и фазо-частотных зависимостей ПИ справа от ноля оси частот позволяет рассчитать зависимость от частоты комплексной чувствительности приёмника. Частотная зависимость модуля комплексной чувствительности представляет собой обычную частотную зависимость чувствительности, используемую при измерениях уровней звукового давления. В рамках настоящей работы рассматриваются задачи измерений ЧХЧ приёмника применительно к измерениям уровней звукового давления. Калибровка измерителей пиковых значений подводного звука, несомненно, потребует иного использования фазо-частотной характеристики. Однако, в настоящее время отсутствует устоявшееся мнение о том, каким образом выполнять измерения пиковых значений. Соответственно, отсутствуют проверенные практикой способы нормирования и использования фазо-частотных характеристик для этих целей.

В воздушной акустике удалось стандартизовать измерение пиковых значений, опираясь на строго нормированный способ реализации и форму комплексной ЧХ фильтра «С» шумомера. Стандарт ИСО установил нижнюю границу 20 Гц диапазона частот при измерениях шума, излучаемого в воду морским копром [41]. В то же время в стандарте не указаны ни способы измерений либо реализации ЧХЧ ГПУ, ни допуска на форму его комплексной ЧХЧ.

В дальнейшем изложении, фазо-частотным характеристикам не будет уделяться отдельного внимания. Однако, предложенный метод позволяет измерять фазо-частотные характеристики ГПУ на частотах вплоть до предельно низких, на которых характеристики ГПУ по полю можно заменить характеристиками гидрофона по давлению.

2.3 Эксперименты по подтверждению корректности метода

2.3.1 Низкочастотная калибровка гидрофона

Чтобы проверить близость результатов калибровки гидрофона в бассейне по свободному полю и по давлению в акустической КМО, описанным выше методом в частотном диапазоне до 1700 Гц получены зависимости ПИ по свободному полю для пары излучатель-опорный гидрофон $Z_{и-о}(f)$ и пары излучатель-калибруемый гидрофон $Z_{и-г}(f)$. На рисунке 2.9 указанные зависимости приведены нормированными на частоту.

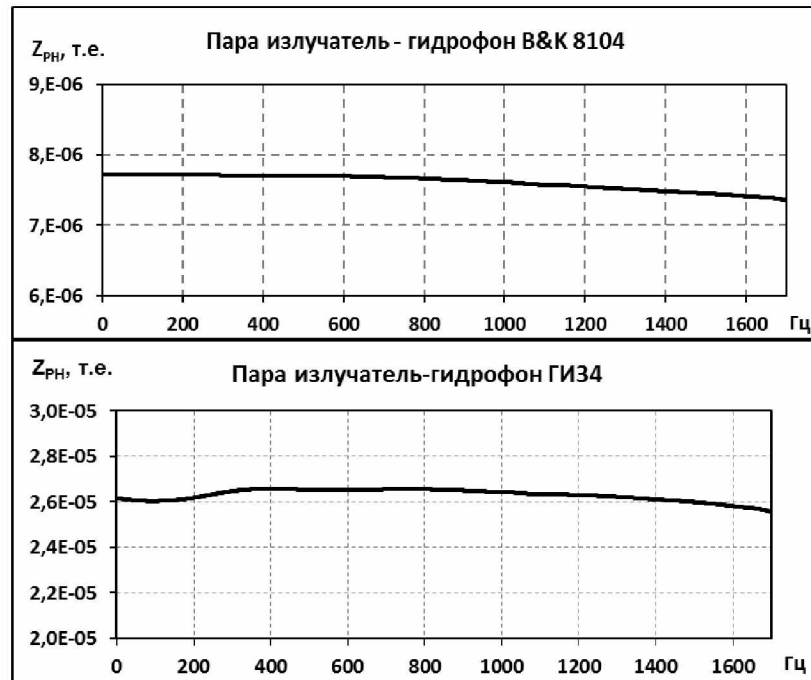


Рисунок 2.9 – Зависимости ПИ по свободному полю для пары излучатель-опорный гидрофон и пары излучатель-калибруемый гидрофон

Чувствительность по свободному полю рассчитывается по формуле (8):

$$M_H(f) = M_o(f) \frac{Z_{и-г}(f)r_{и-г}}{Z_{и-о}(f)r_{и-о}}, \quad (8)$$

где $M_o(f)$ – чувствительность опорного гидрофона;

$r_{и-г}$ – расстояние между излучателем и калибруемым гидрофоном;

$r_{и-о}$ – расстояние между излучателем и опорным гидрофоном.

На рисунке 2.10 рядами 2 и 1 приведены частотные зависимости чувствительности калибруемого гидрофона, полученные в акустической камере и в бассейне.

При рассмотрении результатов калибровки в бассейне, которые на рисунке 2.10 представлены на частотах вплоть до 1 Гц, следует понимать, что значения на частотах меньших 70 Гц получены в результате описанной выше интерполяции частотных зависимостей ПИ на частотном интервале, искаженном помехой. Тем не менее, расхождение результатов калибровки по свободному полю и по давлению не превосходят 0,3 дБ, что, при погрешностях выполненного эксперимента, можно считать хорошим совпадением.

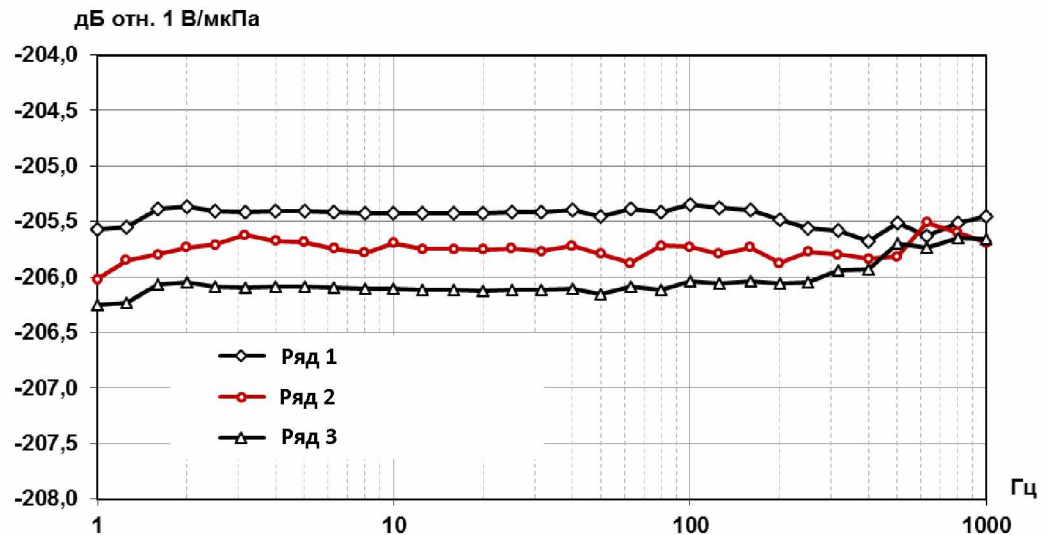


Рисунок 2.10 – ЧХЧ гидрофона, полученные в КМО (ряд 2) и в бассейне на глубинах 3 м (ряд 1) и 1,5 м (ряд 3)

Чтобы оценить влияние частотного разрешения измерений на результаты калибровки с использованием метода СКВУ, калибровка в бассейне была повторена на глубине 1,5 м. При этом ширина эффективного частотного интервала усреднения увеличивается примерно вдвое, что влечет за собой пропорциональное ухудшение частотного разрешения измерений. Результаты калибровки представлены на рисунке 2.10 рядом 3.

Ухудшение частотного разрешения измерений вдвое слабо повлияло на близость результатов калибровки по полю и по давлению. Различия результатов калибровки по полю при значительно различающихся значениях разрешения по частоте не превысили 0,6 дБ, что существенно меньше погрешности рабочих эталонов для калибровки измерительных гидрофонов 1–1,5 дБ. Полученные результаты можно интерпретировать, как подтверждение возможности выполнять калибровку по свободному полю гидрофона, ЧХЧ которого не имеет осцилляционных изменений в частотном интервале усреднения СКВУ, в малом бассейне глубиной 3 м на «сверхнизких» частотах.

Для метода СКВУ результат усреднения не скажется на точности измерений $Z_{PH}(f_0)$, если зависимость $Z_{PH}(f)$ в частотном интервале усреднения слабо зависит от частоты. Частотная зависимость, полученная в результате обработки по методу СКВУ, искажена остаточными осцилляциями с амплитудой $a \frac{\partial Z}{\partial f} / 2\pi t$, пропорциональной наклону полученной зависимости $\partial Z / \partial f$ и отношению амплитуд первой отраженной и прямой волн a . Для первого группового отражения (водная поверхность, стены и дно бассейна) соотношение амплитуд прямой и суперпозиции отражённых волн не превышает 50 %. При таком соотношении амплитуда остаточной осцилляции, которая определяет погрешность метода СКВУ, не превышает 0,1 дБ,

если изменения ПИ в диапазоне 1000 Гц не превышают 50 %. Поскольку перед применением СКВУ выполняется коррекция на частотную зависимость тока и параметра взаимности, наклон частотной зависимости, получаемой в результате обработки по методу СКВУ, будут определять неравномерность ЧХЧ гидрофона и погрешности результатов измерений, использованных для выполнения коррекции. Типичные изменения, вызываемые этими факторами, значительно меньше 50 %.

На рассмотренный выше метод низкочастотной калибровки гидрофона в лабораторном бассейне получен патент РФ на изобретение № 2655049 «Способ калибровки гидрофона по полю на низких частотах» с приоритетом от 26.07.2017 г., публикация [42] с описанием разработанного метода включена в библиографию стандарта МЭК 60565-1 FDIS.

2.3.2 Ключевые сличения МКМВ

ССAUV.W-K1 – первые ключевые сличения результатов калибровок гидрофонов Консультативного комитета по акустике, ультразвуку и вибрации (ССAUV) МКМВ были проведены в период с 2000 г. по 2004 г. В этих сличениях участвовал Государственный специальный эталон единицы звукового давления в водной среде ГЭТ 55-91. Основной целью сличений было подтверждение эквивалентности национальных эталонов участников сличений для обоснования калибровочных и измерительных возможностей и составления СМС-данных в базе KCDB CIPM в диапазоне частот от 1 кГц до 500 кГц.

Поскольку ССАUV.W-K1 были первыми ключевыми сличениями в области гидроакустических измерений, помимо основной задачи участникам сличений предстояло решить ряд задач, связанных с сопоставимостью результатов калибровок опорных гидрофонов по полю. Все участники ключевых сличений использовали метод взаимности в свободном поле сферической волны с тремя преобразователями и (за исключением ВНИИФТРИ) применяли стандартную процедуру калибровки в соответствии с публикацией МЭК 565 и национальными стандартами [43, 44, 45]. Условия свободного поля обеспечивали тонально импульсным режимом излучения и приёма. Во ВНИИФТРИ была применена модифицированная процедура метода взаимности [5], использующая акустическую голографию для локализации и оценки параметров источников рассеяния звуковой волны. Это позволило российской стороне при обсуждении факторов, влияющих на сопоставимость результатов, обратить внимание участников на необходимость при калибровках на ключевых сличениях уточнить понятие «гидрофон» с учетом влияния рассеяния звука на корпусе и креплениях гидрофона. По результатам обсуждения было принято решение использовать на следующих ключевых сличениях стандартизованное крепление гидрофона. Среди исходных данных, представленных российской стороной и использованных при обсуждении этой проблемы, были результаты калибровки опорного гидрофона от 500 Гц и выше. Однако данные на частотах ниже 1 кГц не вошли в официальный

отчет по сличениям, поскольку кроме РФ ни один из участников не смог выполнить калибровку по свободному полю на частоте ниже 1 кГц, и лишь четыре участника получили результаты на частоте 1 кГц.

На, последовавших за ключевыми сличениями, двусторонних российско-китайских пилотных сличениях КООМЕТ 473/RU/09, китайской стороной были представлены данные низкочастотных калибровок по полю от 1 кГц. ВНИИФТРИ выполнил такие калибровки на частотах от 250 Гц. Значительно расширить диапазон калибровки по полю в сторону низких частот позволило применение (для апробации на этих пилотных сличениях) разработанной во ВНИИФТРИ техники СКВУ. Корректно выполнить сличения результатов калибровок по полю на частотах от 250 Гц удалось на российско-китайских дополнительных сличениях КООМЕТ 531/RU/11, на которых технику СКВУ использовали оба участника.

Одной из основных задач вторых ключевых сличений CCAUV.W-K2, начавшихся в 2015 г. и продолжающихся по настоящее время, стала калибровка опорного гидрофона по свободному полю на предельно низких частотах. Для обеспечения сопоставимости условий измерительного эксперимента все участники используют стандартизованный в МЭК 60565 тонально-импульсный метод измерений. Два участника сличений дополнительно применяют технику СКВУ: НААРИ (Китай) – при выполнении калибровок на низких частотах с использованием ЛЧМ-сигнала, ВНИИФТРИ – с использованием ЛЧМ-сигнала на низких частотах и при излучении шумового сигнала (по рекомендациям технического комитета «Акустика. Ультразвук. Вибрация» ЕВРАМЕТ для проверки сопоставимости результатов калибровок на шумовом и тонально-импульсном сигналах) на средних частотах.

Перечисленное не исчерпывает задач, которые поставил перед собой ВНИИФТРИ, участвуя в ключевых сличениях. В качестве целевой предельно низкой частоты, техническим протоколом сличений CCAUV.W-K2 установлена частота 250 Гц. Для калибровок на самых низких частотах ВНИИФТРИ применил усовершенствованную технику СКВУ и изложенный выше метод, что позволило российской стороне представить данные от 125 Гц. Неопределённость результатов калибровок на частотах от 125 Гц до 1 кГц была оценена не превосходящей 0,4 дБ при коэффициенте охвата $k = 2$. Бюджет неопределённости результатов калибровки опорного гидрофона В&К 8104 на частотах ниже 10 кГц представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Бюджет неопределённости результатов калибровки опорного гидрофона В&К 8104 на частотах ниже 10 кГц

Источник неопределённости	Вклад неопределённости, (%)
Тип А	
Неопределённость, оцененная статистическими методами	$\leq 1,3$
Тип В	
Неточность квантования АЦП	0,6
Неточность сопротивления в цепи излучателя R	0,2
Неточность оценки отношения U_{PT}/U_{PH}	$\leq 4,6$
Неточность оценки отношения $U_{TH}/(R \cdot I_T)$	$\leq 3,3$
Неточность коэффициента усиления	0,6
Неопределённость из-за усреднения передаточного импеданса пары излучатель-приёмник в свободном поле	$\leq 0,5$ (125 Гц ÷ 10 кГц)
Не исключённые остатки электрической перекрестной помехи	$\leq 1,9$ (125 Гц ÷ 10 кГц)
Нарушение сферичности звукового поля (условий дальнего поля)	$\leq 4,0$
Не исключённые остатки отражений звука от границ бассейна	$\leq 0,5$ (125 Гц ÷ 10 кГц)
Неточность измерения расстояния между акустическими центрами преобразователей	0,5
Нарушение обратимости преобразователя	$\leq 2,0$
Неточность коррекции электрической нагрузки	1,0
Число эффективных степеней свободы	12
Суммарная неопределённость	$\leq 2,8 \%$
Расширенная неопределённость при коэффициенте охвата $k=2$	$\leq 5,6 \%$ (0,4 дБ)

Результаты низкочастотной калибровки опорного гидрофона типа В&К 8104 представлены на рисунке 2.11.

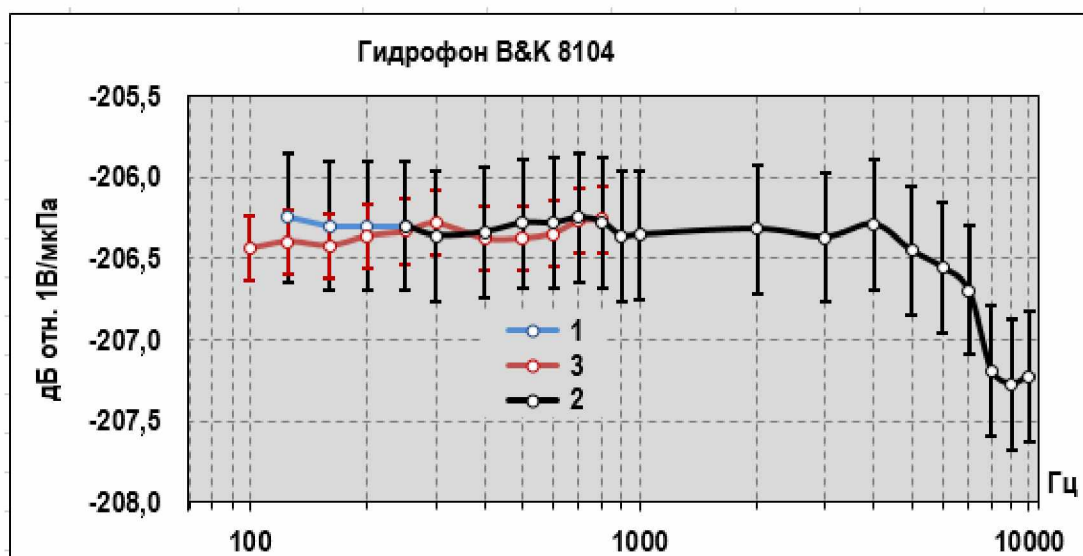


Рисунок 2.11 – Ряд 1 и 2 результаты калибровки по полю в бассейне, ряд 3 – в КМО ГЭТ 55-2017

Поскольку сличения не завершены, и автор не располагает официальными данными других участников, рядом 3 представлены результаты контрольных калибровок опорного гидрофона в КМО ГЭТ 55-2017. КМО ГЭТ 55-2017 также применялась для выполнения контрольных калибровок независимым методом на частотах ниже 1 кГц в сличениях КООМЕТ 473/RU/09 и 531/RU/11. Полученные отклонения результатов калибровок в бассейне и в КМО подтвердили стабильность метрологических характеристик камеры. Малые отклонения кривых 1 и 3 на рисунке 2.11 служат подтверждением правильности результатов низкочастотной калибровки, представленных российской стороной на ключевых сличениях CCAUV.W-K2. Показанные на рисунке 2.11 неопределённости позволяют оценить эквивалентность результатов калибровок в камере и в бассейне. Эта эквивалентность проявляется как на участке от 250 Гц до 1 кГц, охваченном предыдущими сличениями, так и на частотах ниже 250 Гц, что подтверждает метрологические характеристики изложенного метода.

Расширение частотного диапазона калибровки гидрофона по полю в область низких частот с 2000 по 2017 годы иллюстрирует рисунок 2.12.

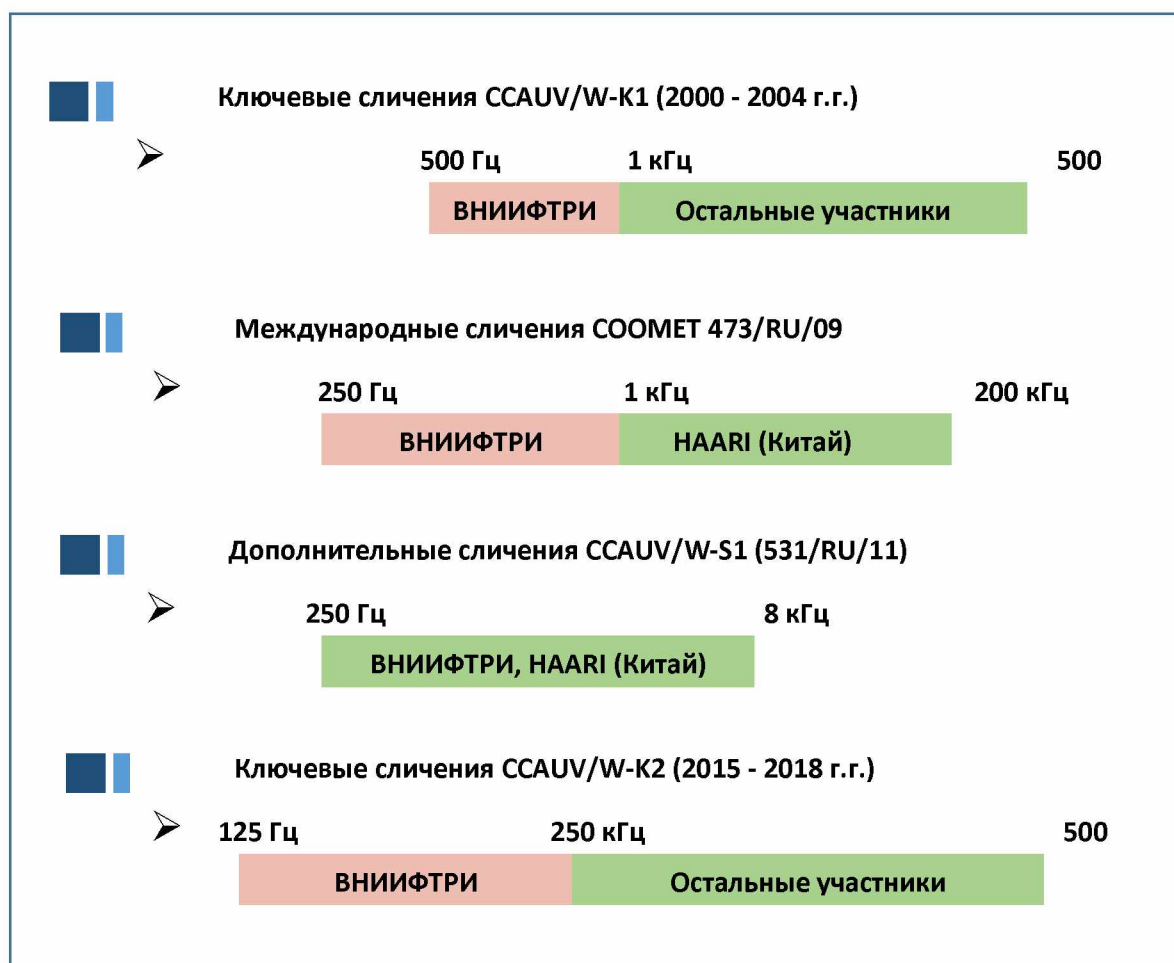


Рисунок 2.12 – Расширение частотного диапазона калибровки гидрофона по полю в область низких частот с 2000 по 2017 г.

Полученные результаты не следует воспринимать, как стремление заменить простую и точную калибровку гидрофона в КМО более сложной процедурой измерений в бассейне. Решаемая задача – это создание и экспериментальная проверка метода измерений ЧХЧ на низких частотах по свободному звуковому полю, пригодного как для гидрофона, так и для ГПУ.

Следует повторить, что калибровка ГПУ в КМО невозможна из-за его габаритов, более того, такая калибровка (даже если бы её удалось каким-либо образом осуществить) не имела бы практического значения, поскольку её результаты представляли бы чувствительность по давлению вместо требуемой чувствительности по полю.

Результаты эксперимента и сличений подтверждают выносимое на защиту положение 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.*

2.3.3. Моделирование рассеяния звука корпусом гидроакустического приёмного устройства

При измерении ЧХЧ ГПУ очень важно не привнести в измеряемые характеристики искажения, обусловленные несовершенством применяемых методов измерений. С другой стороны, также важно не отнести на счёт применяемых методов измерений несовершенство конструкции самого ГПУ. Правильность результатов, полученных с использованием метода СКВУ, была многократно проверена (включая ключевые и международные сличения результатов калибровок гидрофонов) на высоких и средних частотах. В описанных выше экспериментах с использованием разработанного метода измерений ЧХЧ с применением техники СКВУ была выполнена калибровка по свободному полю гидрофона в диапазоне низких частот. Однако, сравнение результатов калибровок по свободному полю и по давлению даже на самых низких частотах не может являться окончательным подтверждением корректной работы метода в ситуации, когда гидрофон находится вблизи источника рассеяния звука (например, корпус ГПУ). Необходимы количественные оценки того, насколько точно разработанный метод работает при измерении ЧХЧ с большим размахом осцилляций на самых низких частотах.

В отсутствии возможности прямого сравнения (в настоящее время методу СКВУ нет альтернативы при измерениях чувствительности по свободному полю на низких частотах в бассейне), нужна не только уверенность, что метод СКВУ правильно сработает при измерении ЧХ на самых низких частотах, но и количественные оценки точности метода.

Наличие описанного выше способа измерения частотной зависимости пары излучатель-приёмник на низких частотах методом СКВУ дает возможность проверки любого из

компонентов, участвующих в измерениях: излучателя, приёмника, либо собственно метода СКВУ. Для выполнения такой проверки в качестве частотно независимого компонента была выбрана граница раздела сред вода-воздух с известным коэффициентом отражения. Использование такого подхода позволило не только подтвердить корректность метода при измерении ЧХЧ ГПУ на низких частотах, но и привело к созданию нового способа измерений частотной зависимости коэффициента отражения звука от поверхности, на который получен патент.

Прямой путь подтверждения корректности метода – использование калиброванного рассеивателя звука, расположенного вблизи гидрофона. Однако конструкции рассеивателя с точно известными параметрами рассеяния не существует. Моделировать вызванные рассеянием звука осцилляции, искажая измеряемую ЧХ электрическими цепями, нельзя, поскольку осцилляции должны быть обусловлены акустическими волнами, создаваемыми излучателем, то есть модель должна быть акустической. Поэтому было принято решение вместо эталонного рассеивателя использовать эталонное отражение звука.

Как отражающая поверхность граница раздела вода-воздух обладает следующими замечательными свойствами:

- коэффициент отражения точно известен, практически равен единице и не зависит от частоты;
- фаза коэффициента отражения точно известна, как для звукового давления, так и для колебательной скорости и градиента звукового давления, и не зависит от частоты;
- большие размеры поверхности бассейна обеспечивают пренебрежимо малое влияние краевых эффектов на параметры отраженных звуковых волн, начиная с частот в сотни герц;
- соотношение длины волны и размеров бассейна позволяют использовать законы и соотношения геометрической акустики.

ЧХЧ гидрофона, измеренная при падении на гидрофон прямой звуковой волны излучателя и волны, отраженной границей раздела вода-воздух, будет искажена осцилляцией, возникающей вследствие интерференции прямой и отраженной волн. Интерференционная осцилляция описывается гармонической функцией, амплитуда, частота и фаза которой однозначно определяются геометрическими параметрами эксперимента и коэффициентом отражения. Справедливость этого утверждения неоднократно подтверждена многочисленными экспериментами, в том числе с использованием тональных импульсов.

Чтобы использовать свойства границы раздела вода-воздух (отражение звука, известное с эталонной точностью) был выполнен эксперимент, идея которого состояла в том, чтобы внести в измеряемую ЧХ «эталонные» искажения с заранее известными параметрами и убедиться в том, что параметры искажения, измеренные с использованием метода СКВУ, совпадают с

предсказанными. Другими словами – если правильно измерили искажения, то правильно измерили и саму ЧХ.

Схема эксперимента изображена на рисунке 2.13. Размещение преобразователей в бассейне показано условно. В бассейне ГЭТ 55-2017 измерены частотные зависимости пары излучатель-приёмник, в качестве излучателя использовали гидрофон ИТС1001, приёмника – гидрофон В&К 8104. Измерения выполнены в частотном диапазоне до 2 кГц с использованием процедуры, описанной в разделе 2.3.1. Пара излучатель-приёмник размещалась на равном расстоянии от боковых стенок бассейна на глубинах: 1,5 м, 3 м, 4,5 м.

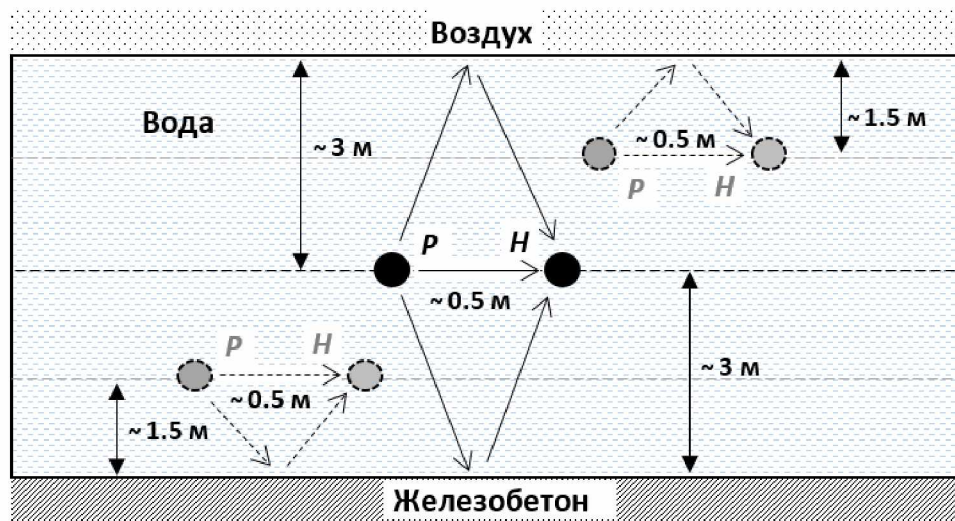


Рисунок 2.13 – Схема размещения пары излучатель-приёмник в бассейне

Одним из преимуществ метода СКВУ является возможность выбирать отражения, влияние которых подлежит подавлению. При рутинных калибровках стремятся подавить влияние всех отражений. Если влияние одного из отражений не подавить, то это проявится в осцилляциях получаемой частотной зависимости. В эксперименте использовалась эта особенность метода СКВУ и при измерениях частотных зависимостей ПИ пары излучатель-приёмник оставлены неподдавленными искажения первым по времени прихода отражением.

2.3.4 Отражение от поверхности воды в бассейне

На рисунке 2.14 приведена частотная зависимость ПИ пары излучатель-приёмник $Z'_{\text{PH}}(f)$, размещенной на глубине 1,5 м, при измерении которой пропущено первое отражение и подавлено влияние второго и последующих отражений.



Рисунок 2.14 – Частотная зависимость, искаженная отражением от границы раздела вода-воздух

Частотные зависимости на рисунке 2.14 и других рисунках настоящего подраздела скорректированы на частотную зависимость параметра взаимности. Полосой красного цвета выделен участок шириной 70 Гц, на котором подавлено влияние шумовой помехи. Полученные на этом участке значения частотной зависимости следует рассматривать как результат интерполяции. При выбранной глубине первое по времени прихода отражение – это звук, отраженный от границы раздела сред вода-воздух, для которого параметры, характеризующие отражения звука, хорошо известны. Наблюдаемые осцилляции частотной зависимости имеют вид гармонической функции, период и амплитуда которой практически не меняются в частотном диапазоне эксперимента. Период осцилляций Δf составляет примерно 581 Гц, что соответствует разности хода 2,54 м прямой и отраженной от поверхности воды в бассейне волн в эксперименте.

Частотную зависимость $Z'_{PH}(f)$, обработанную по методу СКВУ и искаженную отражением от одиночного источника, можно представить в виде произведения частотной зависимости в свободном поле $Z_{PH}(f)$ (в отсутствии отражения) и функции, описывающей осцилляцию [5]:

$$Z'_{PH}(f) = Z_{PH}(f)[1 + W_R \cos(k\Delta r + \varphi_R)], \quad (8)$$

где $W_R = w_R G(\Delta r) \frac{r_{PH}}{r_{PRH}}$ – амплитуда осцилляций;

w_R и φ_R – модуль и аргумент комплексного коэффициента отражения;

k – волновое число;

r_{PH} и r_{PRH} – длины пробега прямой и отраженной волн;

$\Delta r = r_{PRH} - r_{PH}$ – разность хода прямой и отраженной волн;

$G(\Delta r)$ – коэффициент, характеризующий подавление осцилляции при обработке частотной зависимости по методу СКВУ.

Для оценки амплитуды и фазы осцилляций в этом же эксперименте методом СКВУ получена частотная зависимость по свободному полю $Z_{PH}(f)$, подавлением влияния отражений, начиная с первого. Функция осцилляции, полученная по формуле (9):

$$W_R \cos(k\Delta r + \varphi_R) = \left[\frac{Z'_{PH}(f)}{Z_{PH}(f)} - 1 \right] \cdot 100, \quad (9)$$

приведена на рисунке 2.15.



Рисунок 2.15 – Функция осцилляции отражения от границы раздела вода-воздух

Размах осцилляций составил 20,6 %, на основании этого амплитуда осцилляций W_R была принята равной 10,3 %. Однако наибольший интерес представляет поведение осцилляций вблизи нуля оси частот. С приближением частоты к нулю оси частот поведение зависимости не изменяется, что можно воспринимать как подтверждение правильности результатов, полученных с использованием разработанной метода измерений ЧХ на низких частотах.

Следует обратить внимание на фазу осцилляции в нуле оси частот, где осцилляция достигает минимума. Своего минимума осцилляции достигают также на частотах 581 Гц и 1162 Гц. Как уже упоминалось, разность хода прямой и отраженной волн в эксперименте составила 2,54 м, что соответствует длине волны на частоте 581 Гц и двойной длине волны на частоте 1162 Гц. Поскольку при отражении от границы раздела сред вода-воздух волна, падающая из воды, меняет фазу на противоположную (см. приложение 2 в [46]), то на частотах, кратных 581 Гц, отраженная волна приходит в точку приёма в противофазе с прямой волной. Это обуславливает минимумы осцилляций на частотах 1162 Гц и 581 Гц, частота следующего минимума равна нулю герц, однако формально к ней применимы те же рассуждения, что и показали результаты эксперимента.

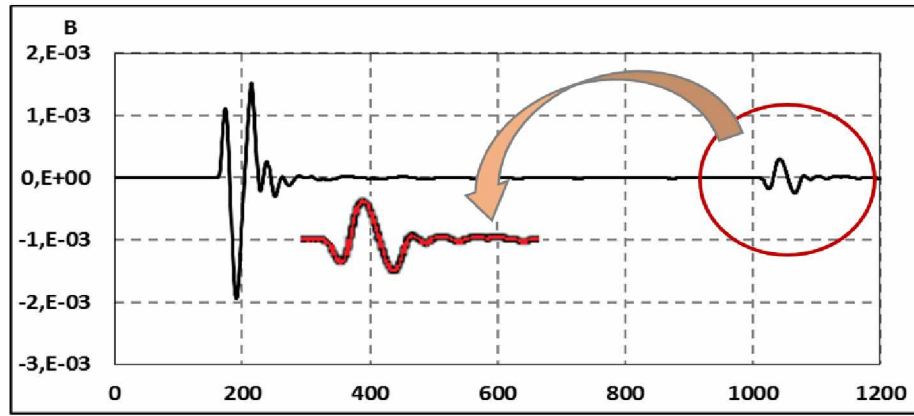


Рисунок 2.16 – Осциллограмма прямого и первого (отраженного от поверхности воды) импульсов

На рисунке 2.16 приведена осциллограмма прямого и первого, отраженного от поверхности воды в бассейне, импульсных сигналов. На осциллограмме видно, что отраженный и прямой импульсы в противофазе.

Формула (10) описывает осцилляцию с произвольной фазой в комплексной форме:

$$\left[\frac{Z'_{PH}(f)}{Z_{PH}(f)} - 1 \right] = W_R e^{-j\varphi_R} \cdot e^{-jk\Delta r}. \quad (10)$$

Если в этой формуле исключить набег фазы при распространении волны на расстояние Δr , например, умножив функцию осцилляций на $e^{jk\Delta r}$, получим комплексную зависимость $W_R e^{-j\varphi_R}$, по которой можно проследить изменение фазы отражения вплоть до самых низких частот. Тем самым появляется способ судить о фазе отражений по фазе осцилляций измеренной частотной зависимости пары излучатель-приёмник.

На рисунке 2.17 изображены преобразование Фурье (кепстр) функции осцилляций и функция пропускания пространственного фильтра $G(\tau)$, реализуемого в описываемом эксперименте обработкой по методу СКВУ [5]. По оси абсцисс графиков отложены значения $\tau = \frac{\Delta r}{c}$, которые имеют смысл временных задержек.

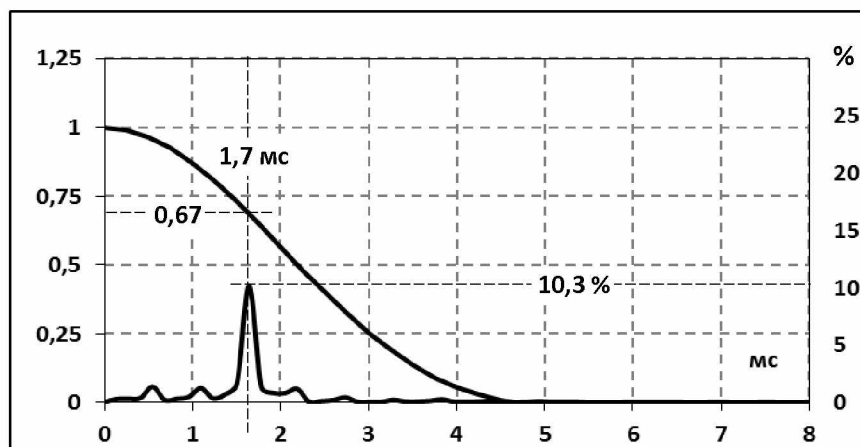


Рисунок 2.17 – Преобразование Фурье (кепстр) функции осцилляций и функция пропускания пространственного фильтра $G(\tau)$, реализуемого обработкой по методу СКВУ

В эксперименте значение отношения $\frac{r_{PRH}}{r_{PH}} = 6,42$ определено по отношению временных задержек прямого и первого отраженного сигнала относительно начала излучения. Периоду осцилляций 581 Гц на оси абсцисс графика соответствуют задержка $\tau = 1,7$ мс и значение функции пропускания 0,67. При этом значение модуля коэффициента отражения, которое рассчитано по формуле (11):

$$W_R = \frac{w_R}{G(\Delta\tau)} \frac{r_{PRH}}{r_{PH}}, \quad (11)$$

составило 98,7 %, что весьма близко к теоретическому значению [46].

2.3.5 Отражение от дна бассейна

В отличие от отражения звуковой волны на границе раздела сред вода-воздух, при отражении звуковой волны от корпуса ГП изменения знака фазы не происходит. Чтобы смоделировать случай такого отражения пара излучатель-приёмник была расположена на глубине 4,5 м с тем, чтобы первое отражение было от дна бассейна. На рисунке 2.18 приведена осциллограмма прямого и первого, отраженного от дна бассейна, импульсных сигналов, по которой видно, что фазы этих импульсов близки.

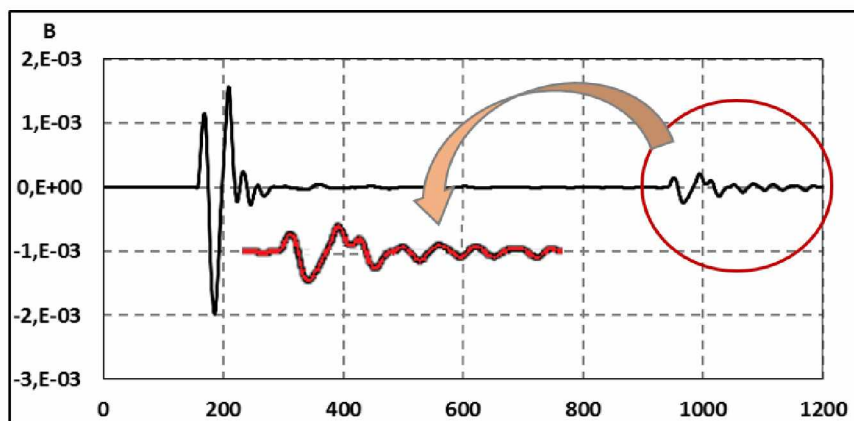


Рисунок 2.18 – Осциллограмма прямого и первого, отраженного от дна бассейна, импульсов

На рисунке 2.19 представлена частотная зависимость ПИ пары излучатель-приёмник, при измерении которой пропущено отражение от дна (первое отражение) и подавлено влияние второго и последующих отражений.



Рисунок 2.19 – Частотная зависимость, искаженная отражением от дна бассейна

По поведению зависимости на самых низких частотах можно судить о том, что полученный результат не противоречит характеру отражений от дна бассейна: отражение от среды с более высоким волновым сопротивлением (большим ρc) происходит с сохранением фазы [46]. То есть, применение разработанного метода измерений привело к правильному результату.

2.3.6 Групповое отражение

Эксперименты с отражением от поверхности и дна бассейна показали возможность применять разработанный метод для измерений на самых низких частотах зависимостей с осцилляциями, обусловленными одиночным источником рассеяния звука. При испытаниях приёмников звука, используемых в воздушной акустике – шумомеров, было установлено, что искажения частотной характеристики микрофона обуславливают осцилляции от нескольких источников рассеяния, расположенных на корпусе шумомера. На низких частотах размах

осцилляций частотной характеристики уменьшается. Этому способствуют две причины: рассеяние уменьшается с уменьшением частоты, вторая причина – сложение в точке приёма рассеянных волн от разных источников с разными фазами. Поскольку шумомер и регистратор (частный случай ГПУ с вынесенным гидрофоном) похожи по конфигурации корпуса, при калибровке регистратора также следует ожидать аналогичного поведения осцилляций частотной характеристики. Ситуация с приходом в точку приёма волн с разными фазами и амплитудами, которые слабо зависят от частоты, была смоделирована в бассейне. В качестве источников таких волн были использованы отражения от поверхности воды, дна и стенок бассейна, амплитуды которых слабо зависят от частоты.

Ширина бассейна ГЭТ 55-2017 составляет 6,5 м. При расположении пары излучатель-приёмник на глубине 3 м в центре бассейна времена прихода отражений от поверхности воды, дна и стенок бассейна различаются не более чем 0,35 мс, что с одной стороны примерно соответствует различию временных задержек отражений от торцов регистратора, а с другой стороны, позволяет при обработке по методу СКВУ относиться к этим отражениям, как к одному групповому отражению. Такое групповое отражение можно либо подавлять, либо оставлять без подавления.

На рисунке 2.20 приведена частотная зависимость ПИ пары излучатель-приёмник на глубине 3 м, искаженная групповым отражением.

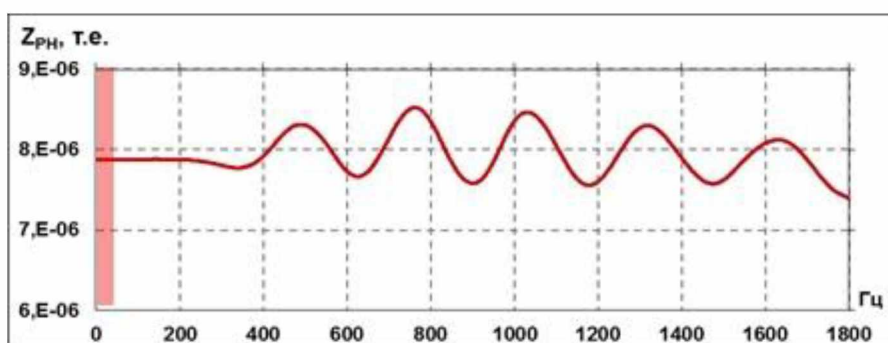


Рисунок 2.20 – Частотная зависимость ПИ пары излучатель-приёмник, искаженная групповым отражением

Наиболее заметным отличием этой зависимости от зависимостей на рисунках 2.15 и 2.19 является затухание осцилляций с уменьшением частоты. При измерениях частотных зависимостей с использованием ЛЧМ-сигналов применяют операцию детектирования, результатом которой является огибающая. При использовании квадратурно дополненных ЛЧМ-сигналов операцию детектирования выполняют умножением принятого ЛЧМ-сигнала на комплексно сопряженный излученный сигнал. При наличии паразитной постоянной составляющей в принятом ЛЧМ-сигнале такое умножение приводит к появлению паразитной

осцилляции в результирующей зависимости. Поведение этих осцилляций отличается от поведения осцилляций, вызванных отражениями и поэтому они не подавляются при обработке по методу СКВУ. В наибольшей степени этот эффект проявляется на низких частотах, на которых амплитуда полезного сигнала мала, а период очень значителен, что затрудняет компенсацию паразитной постоянной составляющей.

Период осцилляций на рисунке 2.20 слабо изменяется с частотой, а на частотах ниже 400 Гц размах осцилляций резко уменьшается. Уменьшение размаха можно объяснить тем, что с уменьшением частоты разность фаз волн, отраженных от стенок и дна бассейна стремится к нулю и в точке приёма они складываются в противофазе с волной, отраженной от поверхности воды, уменьшая тем самым размах осцилляции группового отражения. При этом на низкочастотном участке зависимости не проявляются осцилляции, обусловленные паразитной постоянной составляющей. Это свидетельствует об эффективности разработанной процедуры измерений, в которой совмещены операции детектирования и коррекции на частотную зависимость параметра взаимности.

Полученный результат дает уверенность в том, что разработанный метод позволит исследовать эффекты уменьшения дифракционных искажений, обусловленных влиянием корпуса ГПУ, при уменьшении частоты.

Выполненные эксперименты показали, что разработанный метод позволяет расширить частотный диапазон измерений ЧХ по свободному полю в бассейне с минимальным размером 6 м с 250 Гц [44] до 70 Гц, используя малую неравномерность ЧХЧ гидрофона на низких частотах.

Способность метода измерять частотные зависимости с большими и малыми осцилляциями вплоть до самых низких частот позволяет использовать его не только для целей калибровки. Предложенный на основе выполненного эксперимента «Способ измерения частотной зависимости коэффициента отражения звука от поверхности» защищен патентом РФ на изобретение № 2655478 с приоритетом от 26.07.2017 г. Высокая точность определения коэффициента отражения от поверхности воды показывает возможность исследовать с помощью разработанного метода акустические свойства материалов и объектов на низких частотах, недоступных тонально-импульсному методу. Такие исследования можно выполнять различными способами. Один из них состоит в сравнении амплитуд осцилляций от поверхности воды и испытуемого образца выполнив два измерения в одном эксперименте: одно со свободной поверхностью воды, а второе с образцом, расположенным на поверхности воды.

Стоит отметить ещё одну возможность применения разработанного метода – выполнение измерений в ситуации, когда первое отражение от стенки барокамеры опережает во времени отражение от исследуемого объекта. В этом случае тонально-импульсный метод не применим в

принципе. Процедура измерений с использованием метода СКВУ усложняется: измеренную частотную зависимость подвергают обработке по методу СКВУ дважды, получая две зависимости. Первую – оставляя осцилляции первых двух отражений без подавления, вторую – оставляя без подавления осцилляции первого отражения. Осцилляции второго отражения получают вычитанием второй зависимости из первой.

3. ЭКСПЕРИМЕНТ С МАССОГАБАРИТНОЙ МОДЕЛЬЮ РЕГИСТРАТОРА ПОДВОДНОГО ШУМА

3.1. Стенд для измерений характеристик ГПУ

Для измерений ЧХЧ и характеристик направленности (ХН) ГПУ с элементами конструкции, рассеивающими звук на первичный преобразователь, были созданы измерительный стенд и координатное устройство. Структурная схема стенда приведена на рисунке 3.1.



Рисунок 3.1 – Структурная схема стенда для измерений ЧХЧ и ХН ГПУ

В состав стенда входят: управляющая система на базе компьютера со встроенным в системный блок устройством аналого-цифрового и цифро-аналогового преобразований (АЦП/ЦАП) (формирование сигналов возбуждения излучателя, преобразование записанных сигналов в цифровой вид, запись цифровых сигналов в память компьютера); усилитель мощности Tabor 9200A (усиление по току и напряжению сигнала возбуждения излучателя); малошумящий усилитель электрических напряжений SR560; блоки входного согласующего усилителя и устройства коммутации тока возбуждения излучателя.

Устройство позиционирования регистратора монтируется на мостовом устройстве бассейна ГЭТ 55-2017, обеспечивает угловые перемещения ГПУ на $\pm 90^\circ$ относительно опорного направления, и представляет собой кронштейн 1 с установленными на нем стрелкой отсчета угла поворота 2 и посадочными местами для оси поворотного механизма 3 (см. рисунок 3.2).

На оси поворотного механизма установлены поворотная балка 4 со шкалой угловых перемещений 5 и скользящая втулка 6, к которой крепится трос с талрепом, поддерживающий поворотную балку. Механизм углового перемещения приводится в движение шаговыми двигателями промышленной моторизованной поворотной платформы 8MR190-2-4247 под управлением контроллера шаговых двигателей (КШД) 8SMC4-USB-B9. ГПУ вывешивается горизонтально с помощью подвесов 7 на поворотной балке так, чтобы ось вращения проходила

через активный элемент гидрофона ГПУ. Излучатель вывешивается на собственном кабеле справа или слева от оси поворотного устройства, как это показано на рисунке 3.2, что обеспечивает измерение круговых ХН.

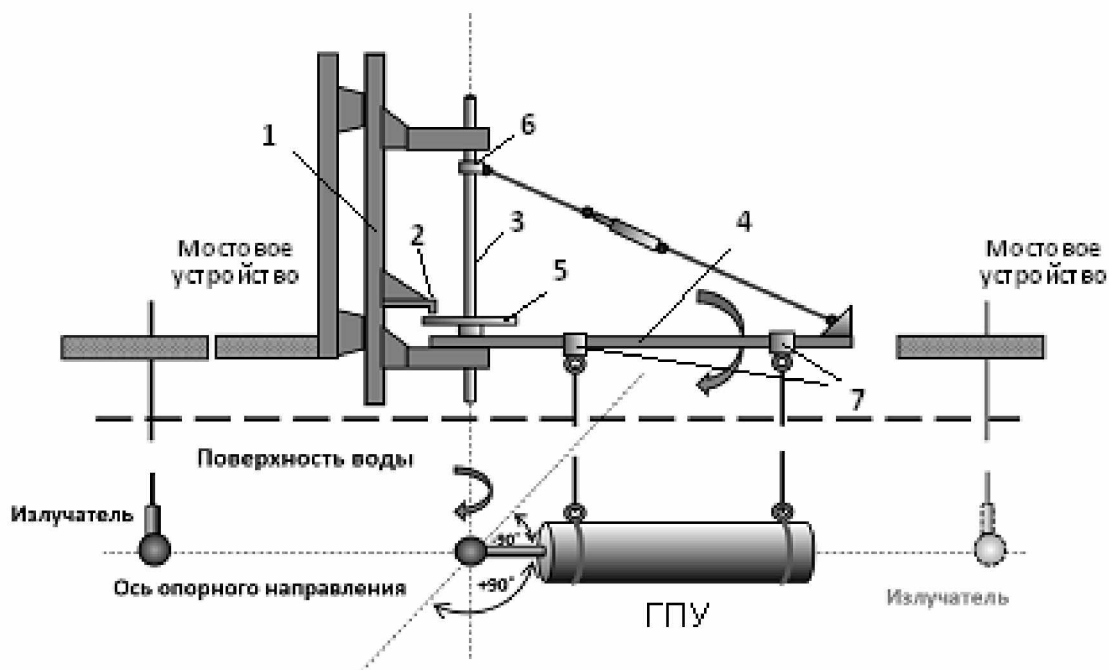


Рисунок 3.2 – Устройство позиционирования ГПУ

Программный комплекс стенда включает в себя программный модуль удаленного управления измерительными приборами, электронными блоками и устройством позиционирования, модуль процедуры измерений (включая синхронное накопление ЛЧМ-сигналов), модуль обработки по методу СКВУ и отображения результатов измерений из состава программного обеспечения ГЭТ 55-2017. Программный комплекс дополнен модулем формирования ЛЧМ-сигналов, допускающим перемену знака приращения мгновенной фазы при переходе через ноль частоты, модулем коррекции экспериментальной зависимости на частотную зависимость параметра взаимности и тока излучателя, модулем компенсации разрыва фазо-частотной зависимости при переходе через ноль частоты, модулем коррекции экспериментальной частотной зависимости в окрестности нуля частот (коррекция на частотном интервале искажения помехой). Модуль коррекции реализует алгоритмы:

- «спрямления» экспериментальной частотной зависимости;
- «простригания» выбросов и провалов;
- аппроксимации пьедестала помехи гладкой кривой с последующим вычитанием.

Программный модуль обработки по методу СКВУ модифицирован с целью обеспечения возможности выбора отражений, подлежащих подавлению.

Постобработка дополнена расчетом функции пропускания пространственного фильтра, реализуемого обработкой СКВУ в эксперименте.

3.2 Массогабаритная модель регистратора

Для того, чтобы обеспечить сопоставимость результатов исследований ВНИИФТРИ и данных, опубликованных НФЛ (см. рисунках 1.1 и 1.2), был создан массогабаритный макет автономного регистратора ПШ «AURAL-M2» (далее – *m*-регистратор). Внешний вид *m*-регистратора представлен на рисунке 3.3.

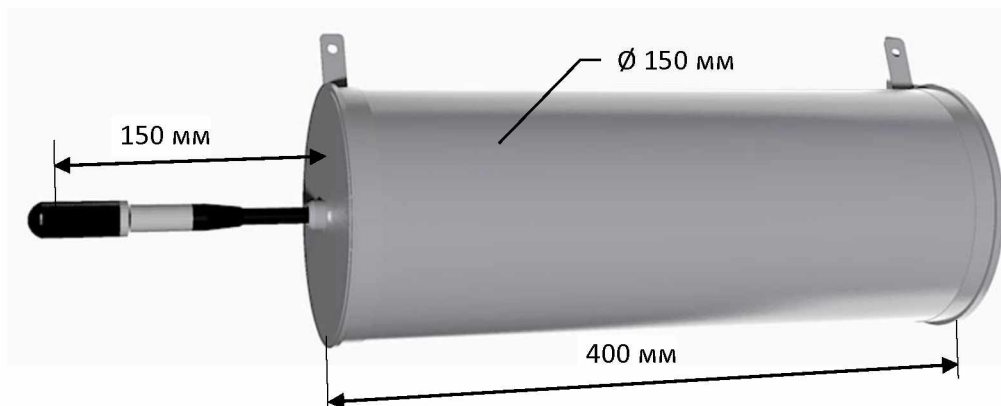


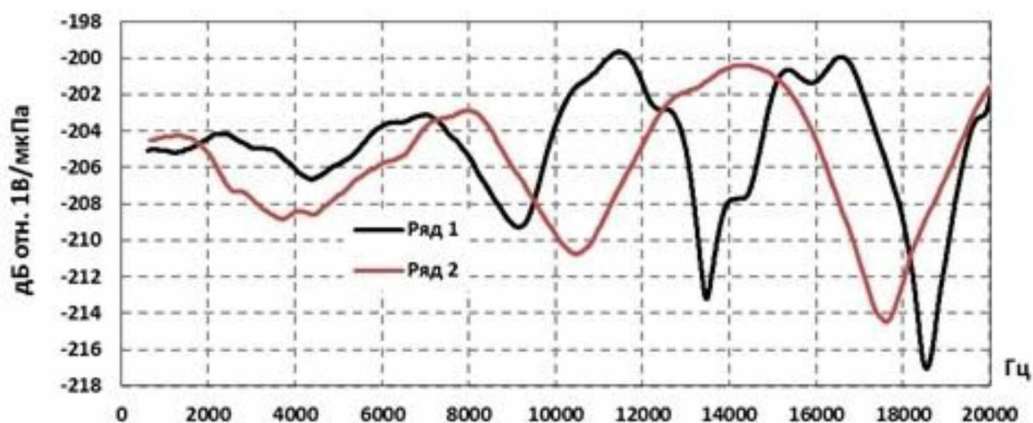
Рисунок 3.3 – Внешний вид массогабаритного макета регистратора ПШ

Корпус *m*-регистратора выполнен из нержавеющей стали в виде герметичного толстостенного пустотелого цилиндра длиной 400 мм и диаметром 150 мм. Вес *m*-регистратора 25 кг в надводном и 9 кг в подводном положении. В качестве чувствительного элемента использован гидрофон В&К 8104, который закреплен на корпусе так, что акустический центр его активного элемента расположен на оси симметрии корпуса. Толщину стенок корпуса и габариты *m*-регистратора выбраны так, чтобы его акустические свойства были близки к свойствам прототипа. С помощью двух хомутов, закрепленных вблизи торцов корпуса, *m*-регистратор крепится к подвесам поворотной балки на тонких тросах.

Значительные габариты и вес регистратора не позволяют применить при его исследованиях штатные системы подводного позиционирования гидрофонов. Дополнительная сложность состоит в том, что центр масс регистратора находится на значительном расстоянии от акустического центра гидрофона. Для измерения ХН необходимо вращать регистратор таким образом, чтобы ось вращения проходила через акустический центр гидрофона. Также необходимо исключить смещения акустического центра гидрофона от оси вращения вследствие эксцентриситета, который неизбежно возникает при жестком креплении регистратора из-за несовпадения центра масс и оси вращения. При решении этих задач был использован опыт подобных работ в воздушной акустике, когда устройство позиционирования разрабатывают с учетом особенностей исследуемого изделия. При этом устройство позиционирования должно вносить минимальные искажения звукового поля. Наличие свободной поверхности воды в бассейне позволило исключить влияние на звуковое поле громоздких элементов устройства

позиционирования, разместив их над водой. Гибкий подвес маятникового типа автоматически обеспечивает размещение регистратора строго под поворотной балкой, горизонтальность которой в нагруженном состоянии можно регулировать с помощью талрепа. Акустический центр гидрофона и ось вращения совмещаются, при смещении подвесов по поворотной балке и контроле смещения, например, с помощью отвеса. Результаты исследований предложенной конструкции устройства позиционирования показали, что при вращении регистратора на 180° в надводном и подводном (на глубине 3 м) положениях смещения акустического центра гидрофона относительно оси вращения не превосходят 1,8 мм. При расстоянии между излучателем и гидрофоном 2,5 м такие изменения приводят к пренебрежимо малой (менее 0,1 %) ошибке измерения амплитудно-частотных характеристик и ЧН регистратора. Ошибка в измерении фазо-частотной характеристики на частоте 20 кГц не превосходит 9° . В надводном положении смещения акустического центра гидрофона проверяли с помощью отвеса, который закрепляли на оси устройства позиционирования. При исследованиях в подводном положении излучали и принимали регистратором короткий импульсный сигнал. Смещения акустического центра гидрофона оценивали по изменению задержки принятого импульсного сигнала относительно импульса излучателя.

Устройство позиционирования показало свою практичность при эксплуатации, достаточную точность и хорошие акустические свойства, которые можно оценить по ЧХ *m*-регистратора на рисунке 3.4. Рядом 2 представлена ЧХ *m*-регистратора при фронтальном падении волны (вдоль оси регистратора) и расстоянии 93 мм между акустическим центром активного элемента гидрофона и торцом *m*-регистратора, что соответствует положению гидрофона на прототипе. Период осцилляций частотной зависимости близок к периоду осцилляций ЧХ прототипа, вызванных отражением звука от переднего торца корпуса. К сожалению, по осцилляциям зависимости, представленной рядом 2, сложно установить наличие других источников рассеяния звуковой волны, хотя признаки влияния таких источников можно заметить. При испытаниях шумомеров, применяемых в воздушной акустике, обычно проявляются осцилляции, обусловленные источниками рассеяния, расположенными вблизи заднего торца шумомера.

Рисунок 3.4 – Частотные характеристики *m*-регистратора

Чтобы уменьшить эффект затенения удаленных от переднего торца источников рассеяния, расстояние между акустическим центром активного элемента гидрофона и торцом *m*-регистратора было увеличено до 150 мм. Рядом 1 представлена частотная зависимость чувствительности *m*-регистратора при таком расположении гидрофона. Осцилляции с периодом 5 кГц обусловлены рассеянной волной, запаздывающей в точке приема относительно прямой волны излучателя на 0,21 мс. При фронтальном падении звуковой волны на *m*-регистратор, это соответствует источнику, удаленному от гидрофона на 150 мм (передний торец корпуса *m*-регистратора). На полученной зависимости проявились осцилляции с периодом 1,2 кГц, что соответствует источнику, расположенному на расстоянии 600 мм (вблизи заднего торца *m*-регистратора). Заметных осцилляций, которые соответствовали бы другим источникам рассеяния (например, от креплений устройства позиционирования) на частотной зависимости не обнаружено.

В целом акустические характеристики рассеяния на конструкции *m*-регистратора оказались достаточно близки к характеристикам прототипа. Об этом, кроме периода, свидетельствует сопоставимый размах осцилляций, а также характер поведения частотных зависимостей. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что созданный макет достаточно полно отражает акустические свойства регистратора ПШ «AURAL-M2», и его можно использовать для отработки методики измерений ЧХЧ гидроакустического регистратора.

3.3 Экспериментальные исследования *m*-регистратора

Экспериментальные исследования заключались в измерении ЧХЧ *m*-регистратора при различных углах падения звуковой волны. ЧХЧ *m*-регистратора определялась методом сличения с опорным гидрофоном типа В&К 8104. При измерениях в качестве излучателя использовался обратимый гидрофон ИТС1001 на низких частотах, на высоких частотах – гидрофон ОП2 с диаметром активного элемента 20 мм. Пары излучатель-приёмник располагались в центре бассейна на глубине 3 м. Расстояние между излучателем и опорным гидрофоном составляло

0,5 м, между излучателем и m -регистратором – 2,2 м. Угол падения звуковой волны изменялся от 0° до 180° поворотом m -регистратора с шагом 10° относительно его опорного направления вокруг вертикальной оси, проходящей через акустический центр гидрофона m -регистратора. Излучались ЛЧМ-сигналы в частотном диапазоне от 600 Гц до 20 кГц, а также от 2000 до 0 Гц и от 0 до 2000 Гц с сохранением фазы при переходе через 0 Гц. Для повышения отношения сигнал-шум применялось когерентное накопление. Чтобы получить дополнительный выигрыш в отношении сигнал-шум при измерениях в диапазонах частот от 2000 до 0 Гц и от 0 до 2000 Гц уменьшалась скорость изменения частоты ЛЧМ-сигнала. Скорость изменения частоты не оказывает влияния на отношение сигнал-шум для непосредственно измеряемой частотной зависимости, но с уменьшением скорости число отсчетов экспериментальной зависимости в частотном интервале усреднения по методу СКВУ увеличивается, повышая отношение сигнал-шум для частотной зависимости, получаемой в результате обработки по методу СКВУ. Этот приём не является универсальным, но в большинстве случаев даёт ощутимый эффект. Частотные зависимости тока в цепи излучателя измерялись, регистрируя падение напряжения на калиброванном низкоомном сопротивлении в цепи излучателя. Чувствительность по свободному полю рассчитывалась по формуле (8). Частотные параметры экспериментов выбраны так, чтобы обеспечить возможность сопоставления результатов в диапазоне перекрытия частотных зависимостей, полученных по методу СКВУ. В качестве частоты для представления объединенных результатов использовалась средняя частота диапазона перекрытия.

3.4 Результаты экспериментальных исследований на низких частотах

Для удобства анализа результаты эксперимента представлены на двух рисунках. На рисунке 3.5 приведены частотные зависимости чувствительности m -регистратора на частотах ниже 3 кГц.

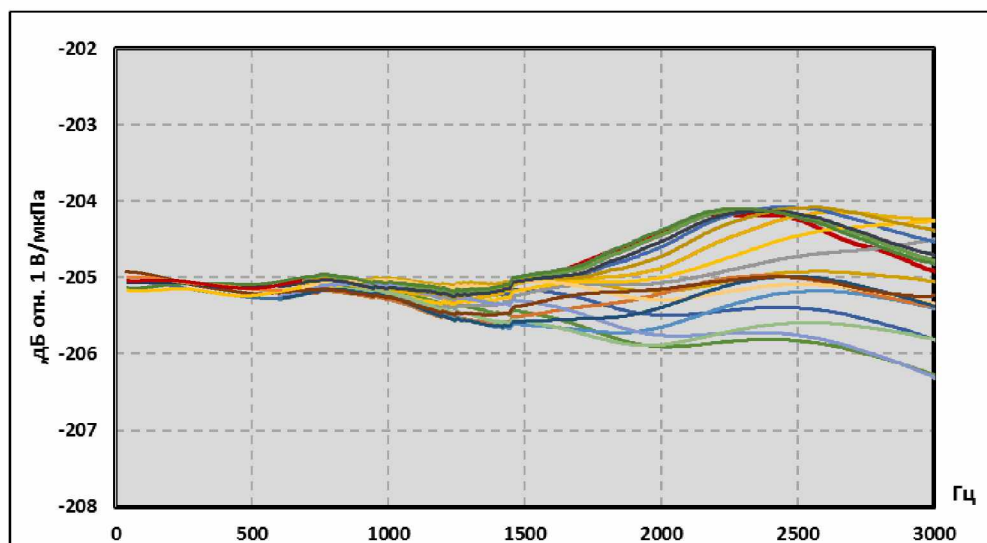


Рисунок 3.5 – ЧХЧ m -регистратора на частотах ниже 3 кГц

Средняя частота диапазона перекрытия составляла 1450 Гц, что можно заметить по незначительным изломам экспериментальных кривых. Несовпадения частотных зависимостей на этой частоте составляют около 0,1 дБ, что можно считать подтверждением корректности примененного метода и стабильности работы измерительного стенда, включая координатное устройство. Полученные значения чувствительности плавно изменяются как при изменении частоты, так и при изменении угла падения звуковой волны, а расхождение частотных зависимостей носит закономерный характер и уменьшается с уменьшением частоты. Такое поведение частотных зависимостей типично для приёмников звука в воздухе – как правило, с уменьшением частоты влияние дифракционных эффектов уменьшается, что следует из общих законов акустики. На низких частотах эту закономерность можно использовать для экспертной оценки дифракции звука на корпусе регистратора. При этом экспертная оценка влияния дифракции будет количественной, поскольку опирается на количественные данные, полученные экспериментально вплоть до самых низких частот, на которых дифракционные эффекты пренебрежимо малы. Использование такой экспертной оценки позволяет определить частоту, ниже которой при установленной допустимой погрешности можно обоснованно использовать чувствительность гидрофона в качестве чувствительности регистратора. Следует оговориться, что полученные результаты относятся только к влиянию на чувствительность регистратора дифракционных эффектов, которые исследовались в эксперименте. Эти результаты нельзя использовать для экспертной оценки акустической прозрачности, звукоизолирующих либо других акустических свойств материалов, использованных в конструкции регистратора. Получение таких количественных экспертных оценок требует своих экспериментов для каждой конструкции.

Наличие семейства подробных частотных зависимостей позволяет заметить присутствие и количественно оценить влияние дифракционных искажений. Поведение зависимостей, представленных на рисунке 3.5, показывает, что дифракционные искажения имеют характер затухающих с уменьшением частоты осцилляций, заметных вплоть до частоты 250 Гц. Количественную оценку дифракционных искажений можно получить, используя размах осцилляций и величину расхождения частотных зависимостей. Расхождение зависимостей на частоте 3 кГц немногим превышает 2 дБ и уменьшается до 0,3 дБ на частоте 1 кГц. Зависимости сходятся к чувствительности гидрофона на частоте 250 Гц. Такое поведение зависимостей на низких частотах характерно для акустических приёмников с микрофоном, вынесенным из корпуса. На частотах ниже 150 Гц зависимости незначительно расходятся, что объясняется не возрастающим влиянием дифракции, а увеличением погрешности измерений в частотном интервале, примыкающем к нулю оси частот. Размах осцилляций на частотах ниже 1 кГц не превосходит 0,2 дБ.

На рисунке 3.6 представлены ХН m -регистратора, нормированные на значение чувствительности гидрофона на частоте 250 Гц. При приёме звука на частоте 600 Гц ХН имеет вид круговой – влияние дифракционных эффектов пренебрежимо мало вне зависимости от угла падения звуковой волны на m -регистратор. ХН на частоте 1 кГц также близка к круговой, однако позволяет заметить незначительные искажения: уменьшение чувствительности m -регистратора при боковом падении звука и увеличение при приёме звука с направления, противоположного опорному.

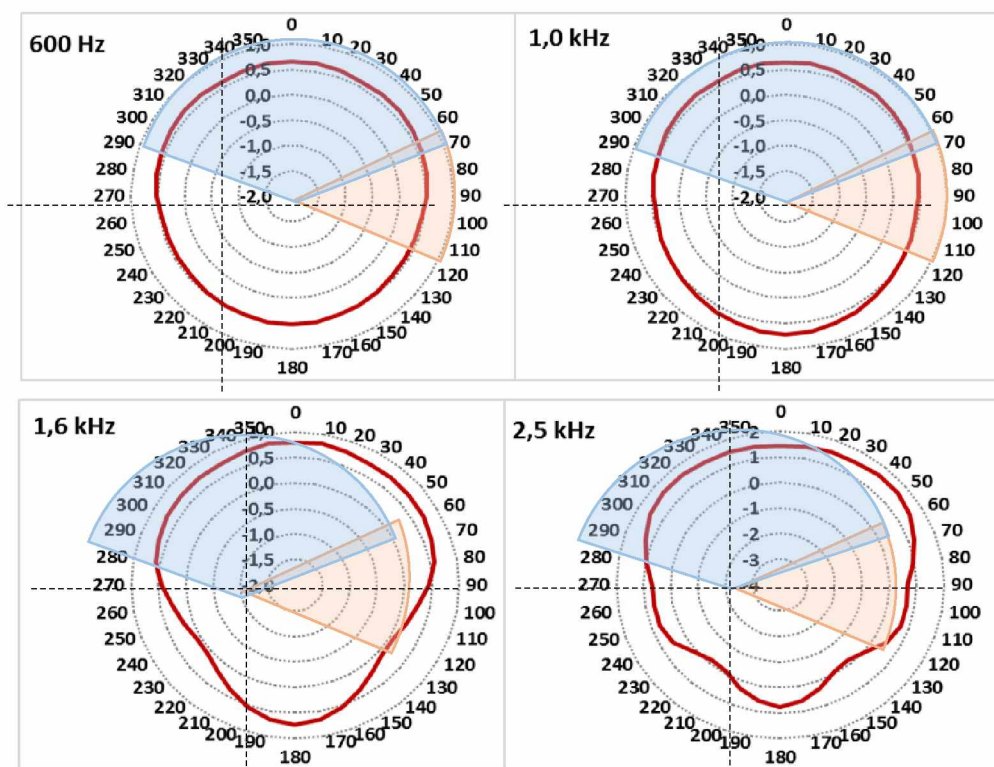


Рисунок 3.6 – Характеристики направленности m -регистратора

Рассмотрение ХН на 1 кГц, 1,6 кГц и 2,5 кГц позволяет проследить эволюцию дифракционных искажений. При углах падения звуковой волны 110° – 150° глубина боковых провалов ХН увеличивается с частотой до 0,9 дБ, то есть на этих частотах дифракционные искажения соизмеримы с погрешностью калибровки гидрофона. Сравнение ХН на частотах 1,6 кГц и 2,5 кГц позволяет проследить возникновение и развитие осцилляций ХН. Как и осцилляции ЧХ, такое поведение ХН можно объяснить наличием одного или нескольких локализованных источников рассеяния звуковой волны [5]. Выявленное поведение осцилляций ХН m -регистратора весьма схоже с поведением осцилляций ХН шумомера [47]. Такое поведение свидетельствует о незначительном «затенении» звука корпусом – чувствительности m -регистратора при падении звуковой волны с опорного направления и направления, противоположного опорному, примерно одинаковы.

Благодаря применению разработанного метода, появилась возможность следить за развитием дифракционных искажений начиная с момента их зарождения на столь низких частотах, на которых до недавнего времени не выполняли калибровки по свободному полю не только регистратора, но и гидрофона. Эксцентриситет координатно-поворотных устройств, продолжительные переходные процессы и существенно худшее в сравнении с методом СКВУ разрешение по частоте при измерениях тонально-импульсным методом маскируют и не позволяют выявлять влияние дифракционных искажений на низких частотах. Кроме того, применение тонально-импульсного метода для измерения подробной зависимости чувствительности от частоты и угла падения звука наталкивается на неприемлемую трудоёмкость измерений. При этом продолжительность измерительного эксперимента возрастает настолько, что условия эксперимента могут существенно измениться.

При измерении звука, излучаемого локализованным источником, нормируют неравномерность ХН гидрофона в двух угловых секторах: $\pm 70^\circ$ относительно вертикальной оси, и $\pm 22,5^\circ$ относительно горизонтальной оси, выделенных различными цветами на рисунке 3.6. Для представленных частот наибольшее изменение чувствительности *m*-регистратора в этих угловых секторах не превосходит 0,7 дБ, что удовлетворяет требованиям к приёмнику при измерениях шума корабля по классу А [48]. Если рассмотреть поведение чувствительности *m*-регистратора при всех направлениях падения звука (от 0° до 360°), то на частотах до 3 кГц включительно чувствительность *m*-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.

Кроме вывода о том, что на частотах вплоть до 3 кГц в качестве чувствительности регистратора можно использовать значение чувствительности гидрофона, можно сделать вывод о возможности использования регистратора в диффузном звуковом поле, например, для измерений окружающего шума [2, 49]. При измерениях окружающего шума правильным является использование чувствительности регистратора по диффузному полю, а не результатов калибровки гидрофона по свободному полю в соответствии с МЭК 60565. Но, как отмечено в п.1.3, на данный момент, с необходимой точностью воспроизвести диффузное поле в лабораторном бассейне не представляется возможным. Решение вопроса определения чувствительности для измерений окружающего ПШ будет предложено ниже.

3.5 Результаты экспериментальных исследований на высоких частотах

Конструкция гидрофона достаточно хорошо отработана. На низких частотах ХН гидрофона практически круговая, а частотная характеристика – плоская. Слабая зависимость чувствительности гидрофона от частоты и угла падения звуковой волны означает возможность

использовать на низких частотах чувствительность гидрофона, определенную в соответствии с МЭК 60565 на частоте в опорном направлении, для измерений шума в полосах частот при любом направлении падения звуковой волны на гидрофон. Результаты исследований регистратора на низких частотах показали возможность при измерениях окружающего шума на частотах ниже 3 кГц использовать в качестве чувствительности регистратора чувствительность гидрофона.

На частотах выше 3 кГц поведение ЧХЧ *m*-регистратора резко меняется. На рисунке 3.7 приведены частотные зависимости во фронтальном секторе для углов падения звуковой волны от 0° до 70°. Неравномерность частотных зависимостей превышает 17 дБ, что ставит под сомнение саму возможность применять *m*-регистратор на этих частотах как средство измерений. Большая неравномерность характерна при падении волны с направлений, близких к фронтальному. С увеличением угла падения неравномерность частотных зависимостей чувствительности уменьшается, и при углах 60°–70° составляет примерно 4–5 дБ.

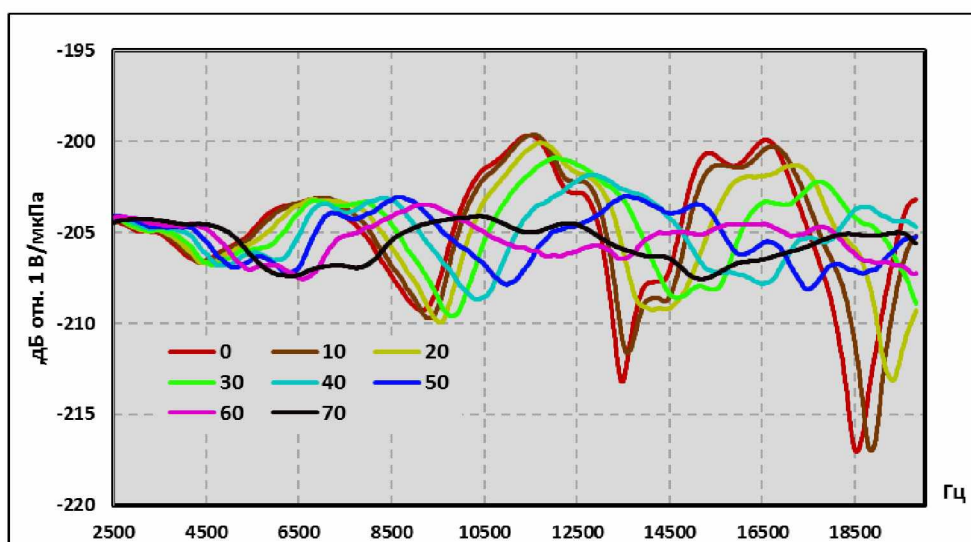


Рисунок 3.7 – ЧХЧ *m*-регистратора во фронтальном секторе углов падения звуковой волны

Такое поведение частотных зависимостей показывает наличие весьма значительного источника рассеяния, расстояние до которого составляет примерно 16 см, что можно оценить по периоду осцилляций с наибольшим размахом. Это соответствует расстоянию от активного элемента гидрофона до ближней торцевой поверхности корпуса регистратора. Однако, при углах падения волны 60°–70° влияние этого источника уменьшается в несколько раз, что говорит об уменьшении эффективной площади рассеяния источника в точку приёма. Это наблюдение наталкивает на мысль, что акустические характеристики регистратора можно улучшить уменьшением эффективной площади рассеяния в точку приёма, изменив для этого соответствующим образом форму части корпуса регистратора, обращенной к гидрофону. Одновременно таким же образом необходимо изменять форму тыльного торца корпуса

регистратора, поскольку, как было показано выше, «затенение» источника звука корпусом при падении звуковой волны с направления, противоположного фронтальному, незначительно.

На рисунке 3.8 показаны частотные зависимости чувствительности m -регистратора в боковом секторе углов. Рассмотрение частотных зависимостей показывает, что в боковом секторе от 60° до 120° неравномерность частотных зависимостей не превышает 4,5 дБ. При этом становятся хорошо заметными частые осцилляции, обусловленные удаленным от гидрофона источником.

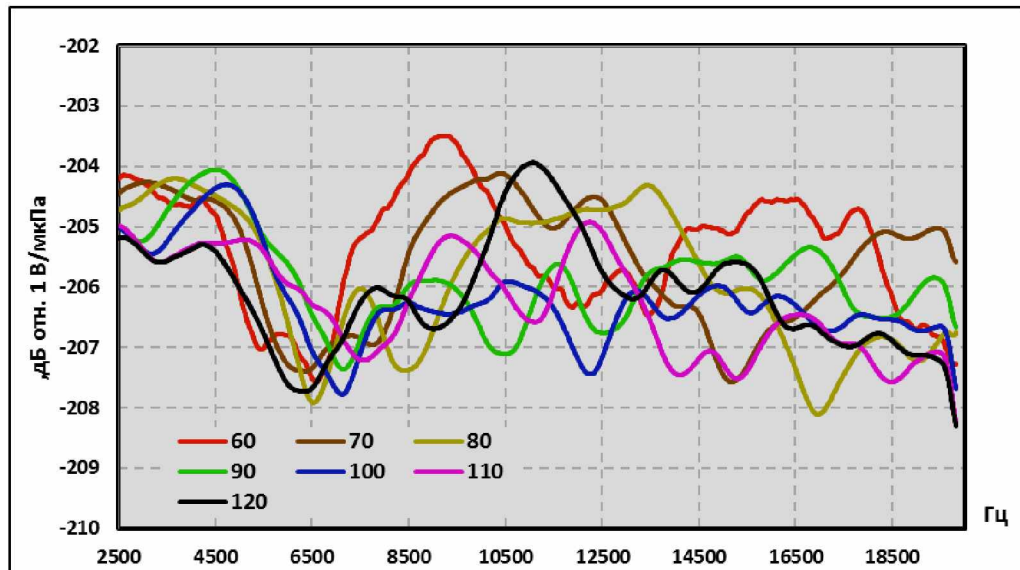


Рисунок 3.8 – ЧХЧ m -регистратора в боковом секторе углов падения звуковой волны

На рисунке 3.9 приведены ЧХЧ m -регистратора в тыльном секторе при углах падения звуковой волны 130° – 180° . Размах осцилляций с увеличением угла падения звуковой волны возрастает почти до 23 дБ, однако при угле падения звуковой волны 180° частотная зависимость резко выравнивается. При этом, если вблизи частот 4 кГц чувствительность при приёме волны с тыльного направления лишь немногим превышает чувствительность при фронтальном падении звуковой волны, то вблизи 10 кГц и частот других провалов фронтальной частотной характеристики это превышение достигает 7–8 дБ.

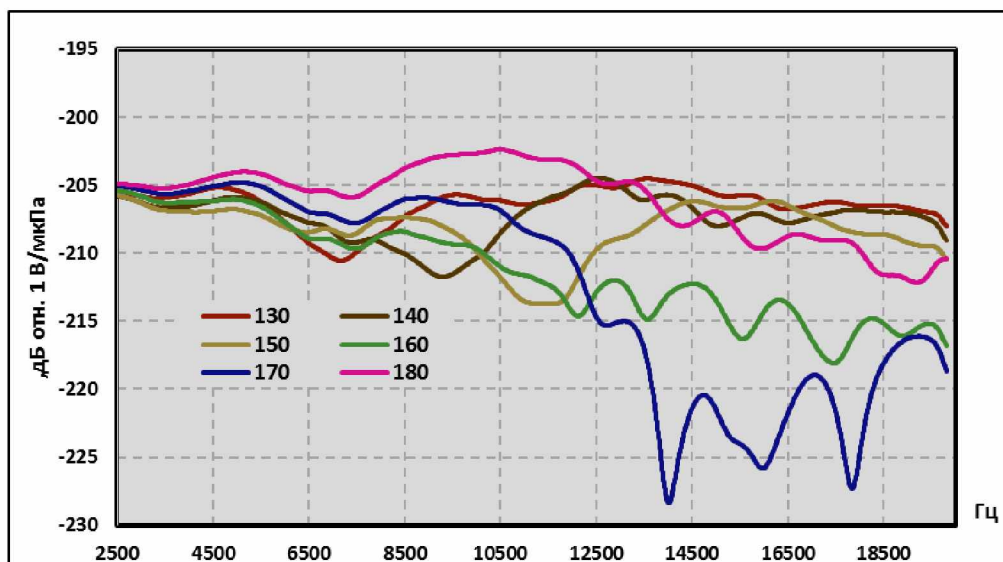


Рисунок 3.9 – ЧХЧ m -регистратора в тыльном секторе углов падения звуковой волны

Полученные зависимости дают целостную картину влияния корпуса на метрологические характеристики регистратора. Несмотря на сложный характер дифракции, эту картину удастся наблюдать благодаря высокой детальности экспериментальных характеристик, качественному подавлению шумовой помехи вплоть до самых низких частот, точному угловому позиционированию регистратора. Частотные зависимости образуют семейство кривых, при рассмотрении которых можно обнаружить как наличие нескольких источников рассеяния на корпусе регистратора, так и изменение их влияния на ЧХЧ при изменении угла падения звуковой волны. Эти изменения удастся проследить по плавному, явно подчиняющемуся закономерности, трансформированию ЧХЧ из одной в другую. Влияние дифракции осложняется эффектами, связанными с опережением звука, распространяющегося в воде, звуком, распространяющимся по корпусу регистратора, и затенением чувствительного элемента гидрофона корпусом регистратора. Как показали эксперименты, эффект опережения звука особенно заметен при падении звуковой волны с тыльного направления. Влияние затенения удобно проследить по эволюции ХН m -регистратора, представленных на рисунке 3.10 для частот выше 3 кГц, с ростом частоты. На частоте 4,5 кГц влияние затенения проявляется в виде провалов, окружающих задний лепесток ХН. С нарастанием частоты форма заднего лепестка эволюционирует по сложному закону из плавного горба на частотах от 4,5 до 9,0 кГц в острый пик, окруженный глубокими провалами на частотах 11,5 кГц и выше. Неравномерность ХН увеличивается с 4 дБ на 4,5 кГц до 18 дБ на 17,7 кГц.

В целом, ХН настолько сложны, что при их рассмотрении затруднительно сделать какие-либо выводы, кроме вывода о невозможности использования регистратора для количественных измерений ПШ, как во фронтальном, так и в боковом угловых секторах.

Чтобы попытаться выявить какие-либо закономерности, для представленных на рисунке 3.10 частот, которые принимали за центральные частоты частотных полос, получили угловые зависимости чувствительности в октавных и третьоктавных полосах частот. Их наложили на ХН для центральных частот. Оказалось, что с расширением полосы частот поведение ХН существенно не меняется, поэтому не удалось выявить каких-либо закономерностей. ХН так же, как и частотные характеристики сами по себе не дают наглядности, поскольку в зависимости от угла падения звуковой волны пространственное положение источников рассеяния меняется относительно точки приёма. Определение количества, расположения и силы источников по форме частотных характеристик и ХН весьма затруднено.

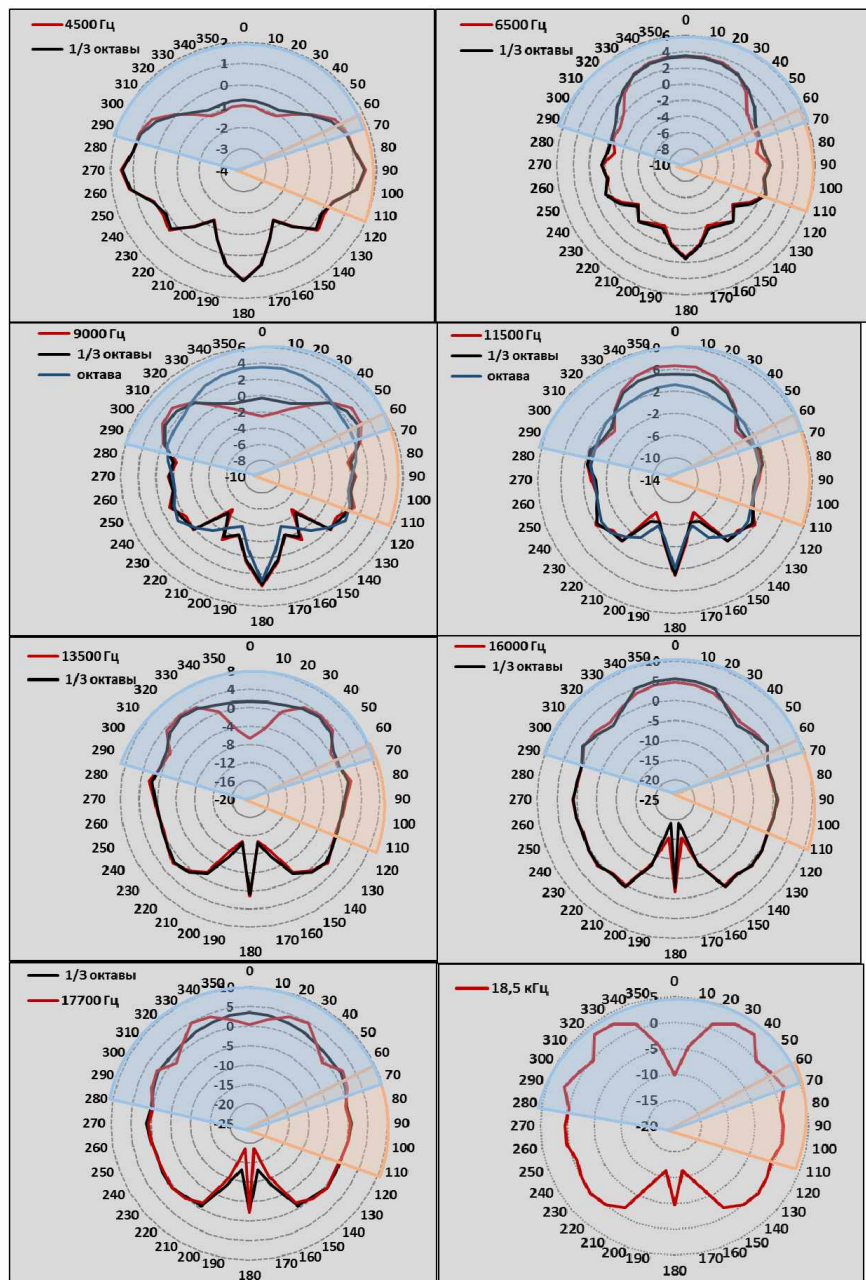


Рисунок 3.10 – Характеристики направленности *m*-регистратора на частотах выше 3 кГц

Разработанный метод измерений ЧХ позволяет с высокой достоверностью определять метрологические характеристики ГПУ, но в случае с *m*-регистратором он позволил с высоким качеством получить большой объём измерительной информации о плохих метрологических характеристиках *m*-регистратора на частотах выше 3 кГц. Для неудачной конструкции ГПУ высокая точность и достоверность результатов измерений характеристик может быть использована только для того, чтобы точно сказать насколько плох ГПУ.

3.6 Локализация источников рассеяния на корпусе *m*-регистратора

В [5] описан приём, позволяющий определять положение источников рассеяния, формирующихся на калибруемом приёмнике, применяя сканирование по расстоянию до приёмника. В данной работе предложено использовать сканирование по углу и частоте для определения перемещений источников рассеяния в пространстве. Для этого было выполнено скользящее усреднение ЧХЧ в третьоктавной полосе частот. На рисунках 3.11–3.13 представлены усредненные ЧХЧ во фронтальном, боковом и тыльном угловых секторах. Усредненные в третьоктавной полосе частот характеристики с еще большей наглядностью демонстрируют «перетекание» осцилляций из одной характеристики в другую. Во фронтальном угловом секторе осцилляции усреднённых частотных зависимостей не возрастают с увеличением частоты в отличие от не усредненных зависимостей. Этот эффект объясняется компенсацией увеличения рассеяния источником вследствие расширения полосы усредняемых частот.

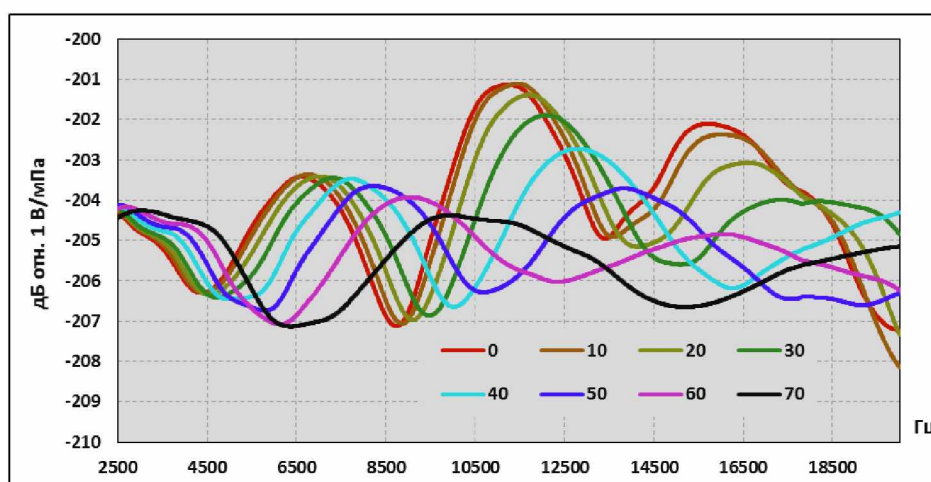


Рисунок 3.11 – ЧХЧ *m*-регистратора во фронтальном угловом секторе, усредненные в третьоктавной частотной полосе

Основное изменение зависимостей во фронтальном, боковом и тыльном угловых секторах – пропадание частых осцилляций, обусловленных рассеянием звука удаленным источником. Это означает, что усреднение привело к подавлению влияния рассеяния звука удаленным источником, и выявить перемещение этого источника по усредненным зависимостям невозможно.

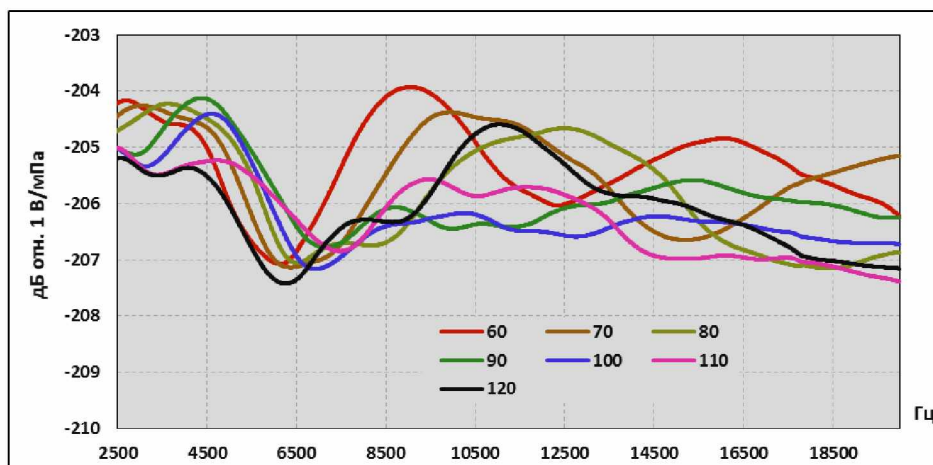


Рисунок 3.12 – ЧХЧ m -регистратора в боковом угловом секторе, усредненные в третьооктавной частотной полосе

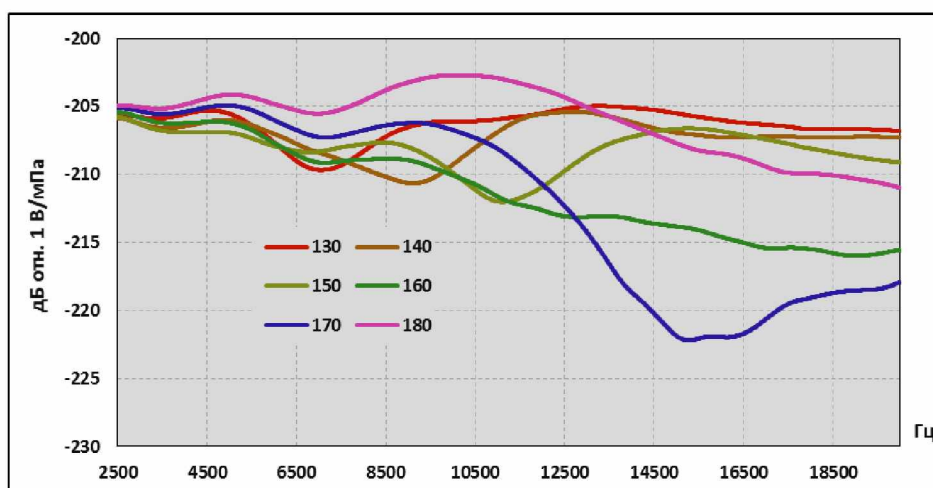


Рисунок 3.13 – ЧХЧ m -регистратора в тыльном угловом секторе, усредненные в третьооктавной частотной полосе

Для выявления положения и перемещения источников рассеяния в пространстве при изменении угла падения звуковой волны предложено использовать кепстральные характеристики регистратора, полученные преобразованием Фурье ЧХ. Для пояснения этого приёма представлен рисунок 2.17, на котором положение максимума кепстра осцилляции частотной зависимости указывает временную задержку τ волны, отраженной поверхностью бассейна, относительно прямой волны излучателя. Произведение временной задержки на скорость звука τc равно разности хода прямой и отраженной волны в точку приёма. По разности хода, исходя из геометрических параметров эксперимента, можно оценить удаленность источника отражений от точки приёма.

Таким же образом, по максимумам кепстра осцилляций ЧХ можно судить об удаленности от точки приёма источника рассеяния звуковой волны, обусловившего эту осцилляцию ЧХ. А по семейству кепстральных характеристик можно отследить изменение удаленности источника

рассеяния в зависимости от угла падения звуковой волны. Семейство кепстральных характеристик приведено на рисунке 3.14 в трехмерном изображении (разность хода прямой и рассеянной волн τc в см, угол падения волны, градации цвета – амплитуда). Переход от синего цвета, через красный, к желтому соответствует изменению амплитуды кепстра от минимума к максимуму.

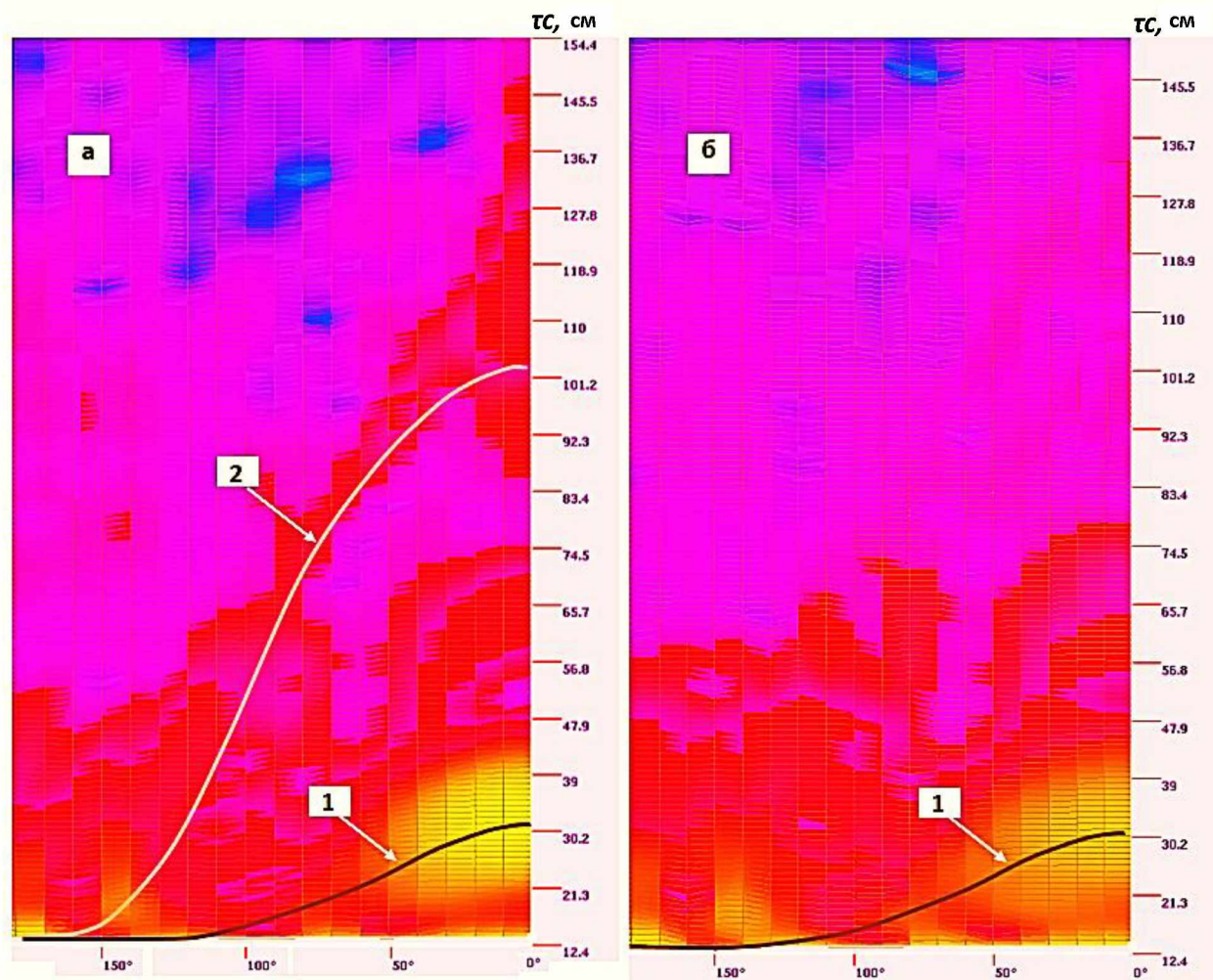


Рисунок 3.14 – Траектории перемещения источников рассеяния (фронтальная и тыльная торцевые поверхности корпуса регистратора) при измерении характеристик направленности

В эксперименте, при изменении угла падения звуковой волны излучателя P , источники рассеяния R_1 и R_2 , расположенные в центрах торцевой и тыльной поверхностей m -регистратора, перемещаются вокруг точки приема H (место расположения гидрофона) по круговым орбитам, как это изображено на рисунке 3.15. При этом разности хода прямой и рассеянной источниками волн $r_{PR1H} = r_{PR1} + r_{R1H} - r_{PH}$ и $r_{PR2H} = r_{PR2} + r_{R2H} - r_{PH}$ изменяются, вызывая соответствующие изменения осцилляций частотной характеристики.

целью выяснения границ применимости метода в бассейне заданных размеров. Для этого были выполнены работы по улучшению акустических свойств *m*-регистратора.

Поскольку подробные ЧХЧ позволили не только определить удаленность доминирующих источников рассеяния, но и определить проблемные элементы конструкции корпуса *m*-регистратора, направлением работы стало ослабление влияния рассеяния на этих элементах и исследование их влияния с помощью разработанного метода.

Традиционно в гидроакустике для ослабления рассеяния применяют материалы с акустическим импедансом, близким к волновому сопротивлению воды. Однако в воздушной акустике этот приём по понятным причинам не используется. Вместо согласования импедансов, используют акустически обтекаемые формы шумомера и относят микрофон от корпуса. Если акустически обтекаемая форма позволяет уменьшить силу источника рассеяния, то увеличение расстояния между микрофоном и корпусом шумомера ослабляет не силу источника, а его влияние. Увеличение расстояния приводит к сокращению периода осцилляций, обусловленных рассеянием на корпусе. Разработанный метод использует усреднение в частотном интервале, ширину которого определяют размеры используемого в эксперименте бассейна. Поэтому представляет интерес оценить влияние такого усреднения на получаемую ЧХЧ с тем, чтобы определить необходимость восстановления осцилляций для корректной оценки неравномерности ЧХЧ ГПУ. Разработанный метод измерений ЧХЧ ГПУ допускает возможность восстановления осцилляций методом деконволюции.

Разработанный метод позволяет выполнять измерения на низких частотах, где влияние рассеяния чрезвычайно мало. При этом уменьшение осцилляций с уменьшением частоты будет свидетельствовать о том, что причина осцилляций ЧХЧ – источник рассеяния, локализованный на элементе конструкции ГПУ, а не эффекты, связанные с механическим резонансом, вибрацией и т.п.

Возможности оценивать силу источника рассеяния и его удаленность от точки приёма, в совокупности с возможностью получать подробные ЧХЧ, позволяют рассчитать чувствительность приёмника в полосе частот и оценить преимущества использования такой чувствительности в зависимости от характера рассеяния и угла падения звуковой волны.

3.7.1 Ослабление силы источников рассеяния применением акустически обтекаемой формы корпуса регистратора

Принцип создания акустически обтекаемой формы, основанный на плавном уменьшении поперечного сечения в направлении точки приёма, был опробован в конструкции штанг для позиционирования преобразователей в установке ГЭТ 55-2011 [5]. Этот принцип согласуется с закономерностями, известными в том числе в радиолокации и воздушной акустике.

С целью получения акустически обтекаемой формы и обеспечения сопоставимости результатов на торцевые поверхности m -регистратора были установлены купола оживальной формы из тонкого пластика. В куполах имеются небольшие отверстия для заполнения водой. Внешний вид конструкции m -регистратора с куполами показан на рисунке 3.16.



Рисунок 3.16 – Внешний вид конструкции m -регистратора с куполами

ЧХЧ при падении звуковой волны в угловом секторе от 0° до 70° представлены на рисунке 3.17.

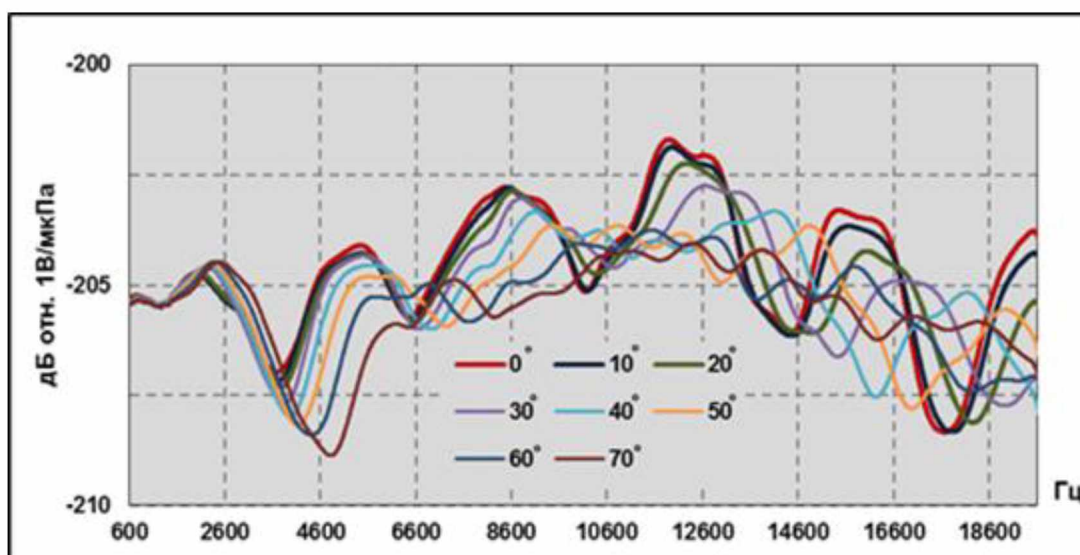


Рисунок 3.17 – ЧХЧ m -регистратора с куполами
при изменении угла падения звуковой волны от 0° до 70°

Характер поведения зависимостей не претерпел принципиальных изменений в сравнении с m -регистратором без куполов. Частотные зависимости сходятся к чувствительности гидрофона на частотах ниже 1 кГц. Наибольший размах осцилляций частотных зависимостей – при фронтальном падении звуковой волны. При изменении угла падения звуковой волны частотные зависимости также образуют семейство кривых, плавно перетекающих из одной в другую. Неравномерность ЧХЧ регистратора уменьшилась с 18 дБ до 7 дБ. Положение экстремумов осцилляций свидетельствует о том, что положения источников рассеяния практически не изменилось. Уменьшение размаха осцилляций показывает ослабление силы этих источников.

Согласованность результатов, полученных при исследованиях *m*-регистратора с куполами и без них подтверждает, правильность предложенной измерительной процедуры. Поскольку в обоих экспериментах применяли усреднение в одинаковых частотных интервалах, расширение экстремумов зависимостей на рисунке 3.17 в сравнении с экстремумами зависимостей на рисунке 3.7 вызвано ослаблением рассеяния, а не усреднением.

На рисунке 3.18 приведены ЧХЧ гидрофона *m*-регистратора при углах падения звуковой волны от 0° до 90° . Максимальное расхождение зависимостей, полученных в диапазоне частот измерений перед установкой гидрофона в *m*-регистратор составляет 3,5 дБ, что соизмеримо с неравномерностью ЧХ на рисунке 3.17. Таким образом, применением простейших средств удалось существенно ослабить рассеяние на корпусе *m*-регистратора и улучшить его акустические свойства.

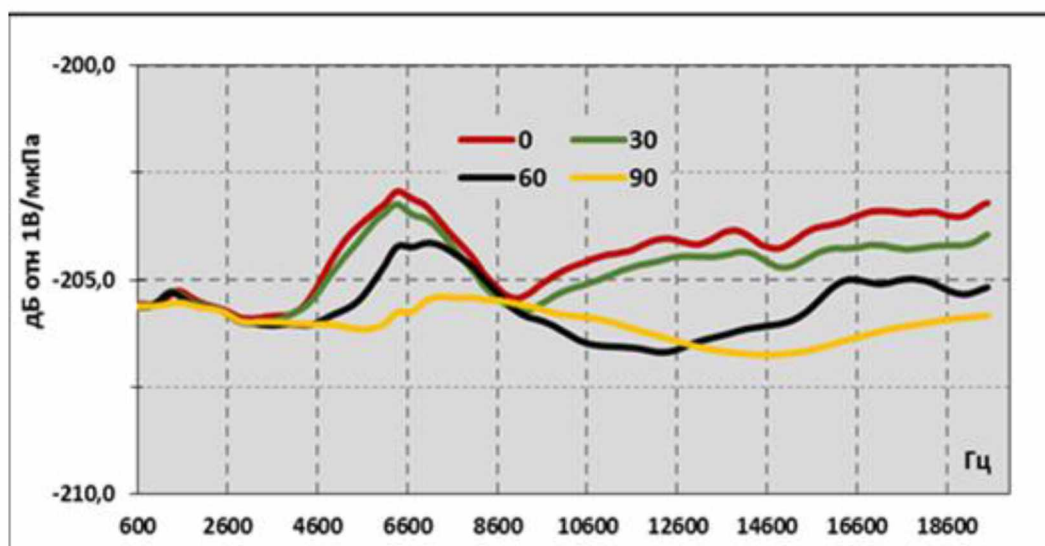


Рисунок 3.18 – ЧХЧ гидрофона при изменении угла падения звуковой волны от 0° до 90°

Вместе с тем, характер поведения частотных зависимостей, период и размах доминирующих осцилляций не позволяют использовать полученную конструкцию для измерения широкополосных сигналов и не дают возможности применить частотные коррекции при измерениях в полосах частот (например, в третьоктавных полосах).

3.7.2 Увеличение расстояния между гидрофоном и корпусом регистратора

Для уменьшения влияния рассеяния гидрофон был установлен на расстоянии 830 мм от фронтальной торцевой поверхности корпуса *m*-регистратора, с сохранением куполов. Внешний вид *m*-регистратора с отдаленным гидрофоном показан на рисунке 3.19.

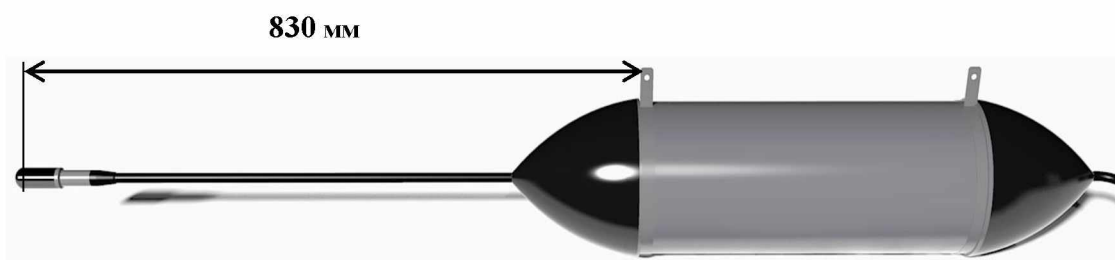


Рисунок 3.19 – Внешний вид конструкции *m*-регистратора с отдаленным гидрофоном

Как было упомянуто выше, этот приём используют в конструкции шумомера. Первые конструкции шумомера имели большие габариты, и чтобы исключить влияние корпуса, микрофон относили на достаточно большое расстояние, используя кабель. По мере совершенствования элементной базы габариты шумомера уменьшились и микрофон стали устанавливать на корпусе шумомера, как показано на рисунке 3.20. При этом применяли меры по обеспечению акустической обтекаемости корпуса вблизи места расположения микрофона.



Рисунок 3.20 – Внешний вид традиционного шумомера

ЧХЧ такого шумомера показана сплошной кривой на рисунке 3.21. Следует обратить внимание на осцилляции ЧХЧ, возникающие на частотах выше 1 кГц. Эти осцилляции обусловлены рассеянием на заднем торце корпуса шумомера, не имеющем акустически обтекаемой формы.

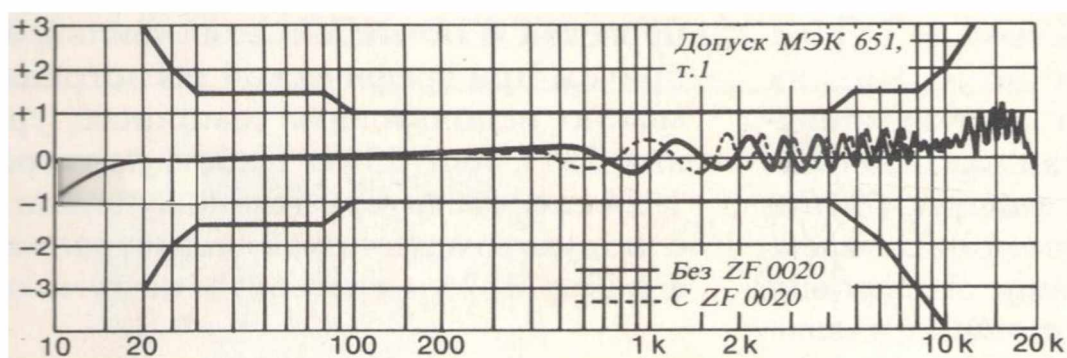


Рисунок 3.21 – ЧХЧ шумомера

Пунктирной кривой показана ЧХЧ шумомера при использовании осушителя ZF 0020, который крепится между микрофоном и предусилителем, что увеличивает расстояние между микрофоном и корпусом шумомера на 50 мм. Как видно по поведению пунктирной кривой, осцилляции ЧХЧ шумомера сохранились, но их период изменился обратно пропорционально расстоянию до заднего торца корпуса шумомера. Такое изменение свидетельствует о том, что источник, вызывающий осцилляции, расположен на заднем торце корпуса шумомера. Косвенное подтверждение этому можно получить, сопоставив ХН *m*-регистратора на рисунке 3.10 и шумомера на рисунке 3.22.

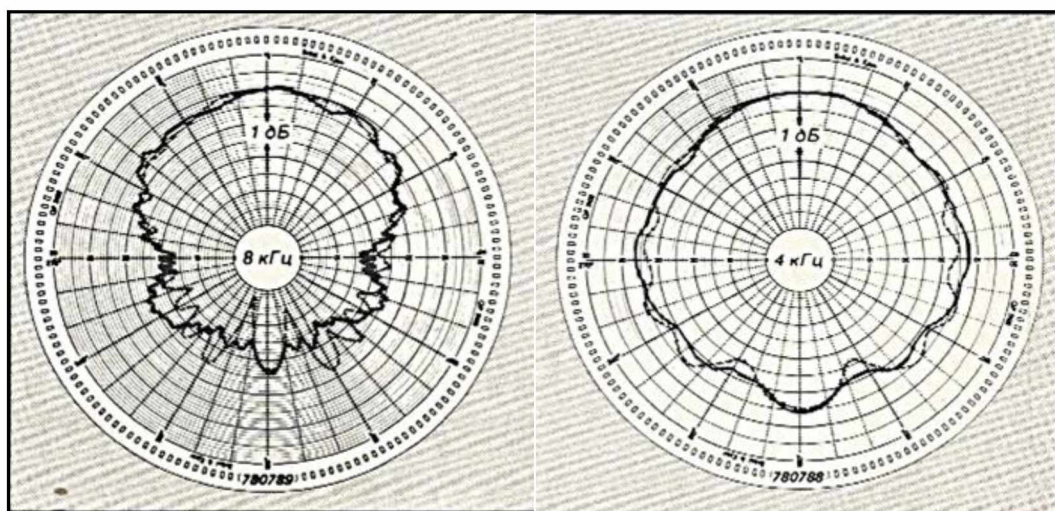


Рисунок 3.22 – Характеристики направленности шумомера

В обоих случаях диаграммы имеют характерный максимум при угле падения звуковой волны 180° , то есть в направлении, противоположном опорному. Для диаграммы направленности самого гидрофона, в отличие от регистратора и шумомера, на углах, соответствующих приёму с тыльного направления, характерно появление провала.

На рисунке 3.23 приведены ЧХЧ при фронтальном падении звуковой волны: 1 – гидрофона, 2 – *m*-регистратора с куполами на корпусе и отдаленным гидрофоном.

На ЧХЧ *m*-регистратора хорошо заметны небольшие и частые осцилляции на частотах выше 5 кГц. Малый размах осцилляций позволяет наглядно и убедительно выполнить сравнение этих двух зависимостей.

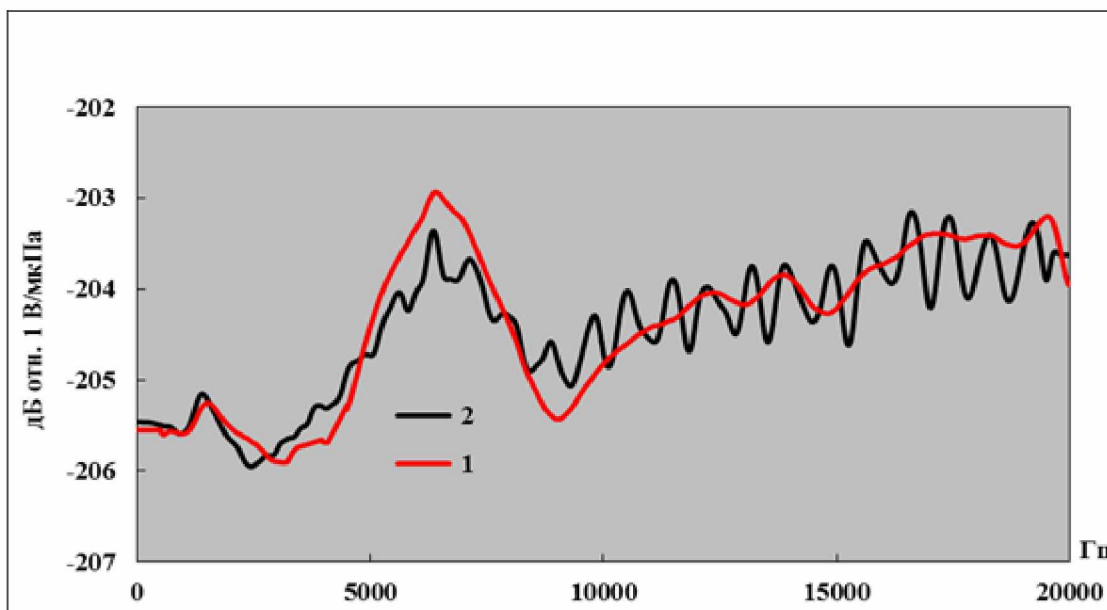


Рисунок 3.23 – ЧХЧ при фронтальном падении звуковой волны:
– *m*-регистратор с отдаленным гидрофоном, 2 – гидрофон.

Разработанный метод позволил выявить осцилляции ЧХЧ, размах которых не превышает 1 дБ. Частотные зависимости практически совпадают на частотах ниже 5 кГц. При этом выявились недостатки метода, которые в ранее рассмотренных экспериментах не оказывали существенного влияния на результаты. Увеличение расстояния между гидрофоном и корпусом приводит к двум последствиям: размах осцилляций ЧХЧ уменьшается, а период осцилляций сокращается. Если период осцилляций становится сопоставимым с частотным интервалом усреднения, настраиваемого на подавление отражений от границ бассейна, усреднение дополнительно уменьшает размах осцилляций ЧХЧ относительно его действительного значения. Это уменьшение тем сильнее, чем дальше гидрофон отнесен от корпуса. В результате получается заниженная оценка размаха осцилляций ЧХЧ.

3.7.3 Коррекция частотных зависимостей методом деконволюции

Для усовершенствования метода измерений ЧХЧ ГПУ предложено дополнить его процедурой, позволяющей уменьшать искажения формы получаемой частотной зависимости путём коррекции характеристики пропускания пространственного фильтра, реализуемого обработкой по методу СКВУ.

При обработке по методу СКВУ характеристика пропускания пространственного фильтра формируется как произведение характеристик пропускания фильтров одиночных отражений. Характеристика пропускания фильтра одиночного отражения описывается функцией вида $\frac{\sin x}{x}$ [5]. 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:

$$A(\tau) = 1 / \sqrt{\left(1 - \left(\frac{\tau}{a\tau_i}\right)^2\right)^2 + \left(\frac{\tau}{b\tau_i}\right)^2}, \quad (12)$$

где a и b – безразмерные параметры;

τ – переменная, имеет размерность времени.

Применение корректирующей функции такого вида проиллюстрировано на рисунке 3.24. Кривой 1 изображена функция пропускания фильтра одиночного отражения, кривой 2 корректирующая функция, кривой 3 – скорректированная функция пропускания.

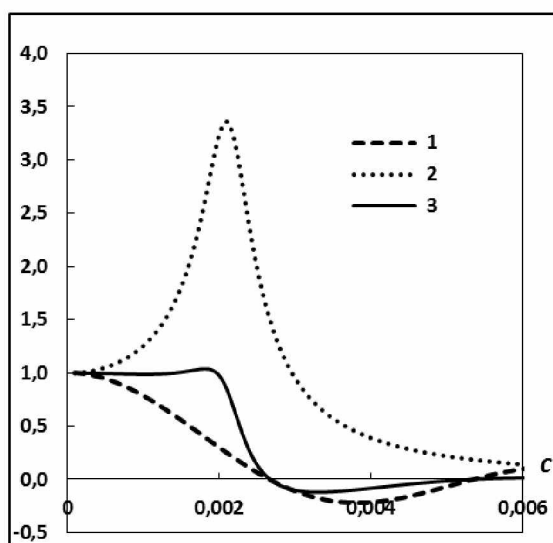


Рисунок 3.24 – Коррекция характеристики пропускания пространственного фильтра

В подавляющем большинстве случаев размеры бассейна превышают размер калибруемого ГПУ. При этом временная задержка первого отражения от стенок бассейна всегда много больше задержки отражения от элемента конструкции ГПУ, наиболее удаленного от точки расположения гидрофона. В этой ситуации форма скорректированной характеристики пропускания на участке, примыкающем слева к положению её первого нуля, не имеет практического значения. Параметры a и b подбирают так, чтобы поведение функции $A(\tau)$ было близким к поведению функции $\left[\frac{\sin x}{x}\right]^{-1}$ для $0 \leq \tau \leq 0,8 \tau_i$. При этом максимум корректирующей функции будет расположен левее первого нуля функции пропускания фильтра одиночного отражения. Это обеспечивает близкую к плоской вершину и крутой спад скорректированной функции пропускания.

Итоговая корректирующая функция для n фильтров одиночных отражений получается, как произведение n корректирующих функций. При использовании метода СКВУ обычно подавляют не более трех отражений ($n \leq 3$). Обратим внимание, что значения параметров a и b

не зависят от положения нуля корректируемой функции пропускания, поэтому в эксперименте они были общими для всех корректирующих функций. Исходя из практической целесообразности критерием оптимальности при подборе параметров a и b служила 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 3.25 приведены итоговая функция пропускания при подавлении трёх отражений обработкой по методу СКВУ – кривая 1 и скорректированная итоговая функция пропускания – кривая 2.

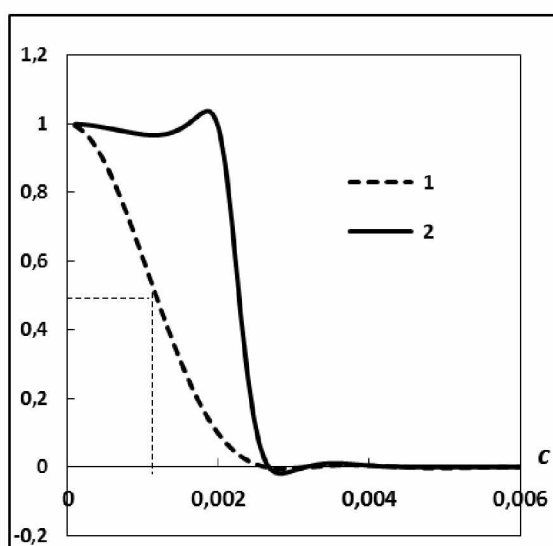


Рисунок 3.25 – Функция пропускания при подавлении трёх отражений обработкой по методу СКВУ – кривая 1 и скорректированная функция пропускания – кривая 2

Предложенная коррекция была опробована при измерении ЧХЧ m -регистратора с куполами и отдаленным гидрофоном в незаглушенном бассейне с размерами $6 \times 6 \times 10$ м. Задержка времени прихода первого отражения от границ бассейна составляла 2,9 мс. ЧХЧ, полученная с использованием обработки по методу СКВУ, корректировалась следующим образом:

- по задержкам отражений, подавленных обработкой по методу СКВУ, рассчитываются функции коррекции фильтров одиночных отражений, далее – итоговая функция коррекции;
- с помощью преобразования Фурье определяется кепстр частотной зависимости, который умножается на итоговую корректирующую функцию;
- искомая частотная зависимость определяется, как обратное преобразование Фурье скорректированного кепстра.

На рисунке 3.26 изображено преобразование Фурье (кепстр) ЧХЧ m -регистратора, полученной в результате подавления первых трех отражений от стенок бассейна (кривая 1) и скорректированный кепстр – произведение кепстра на итоговую корректирующую функцию

(кривая 2).

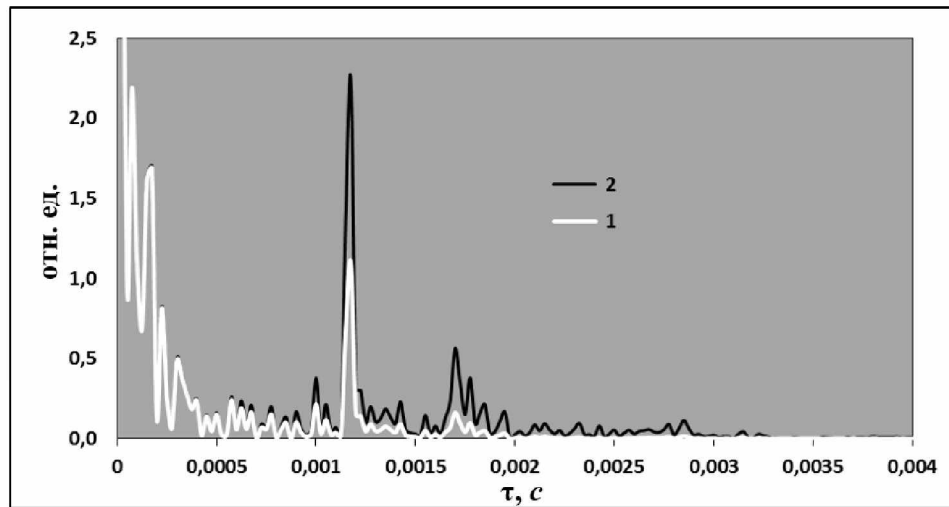


Рисунок 3.26 – Преобразование Фурье (кепстр) ЧХЧ *m*-регистратора

На зависимостях выделяется пик, положение которого на оси абсцисс соответствует периоду осцилляции, а величина – размаху осцилляции ЧХЧ *m*-регистратора. Осцилляция обусловлена рассеянием звука на обращенном к гидрофону торце корпуса *m*-регистратора. Задержка рассеянной волны составляет 1,17 мс, что соответствует разности хода 1,7 м (расстояние от гидрофона до торца корпуса 830 мм, разность хода – 1,66 м). В результате обработки по методу СКВУ размах осцилляции оказался уменьшен примерно в 2 раза (показано на рисунке 3.25 пунктирными линиями).

Для того, чтобы при измерениях ЧХЧ точно учесть влияние корпуса *m*-регистратора, необходимо было восстановить размах осцилляций, уменьшенный обработкой по методу СКВУ.

На рисунке 3.27 кривой 1 изображена ЧХЧ при фронтальном падении звуковой волны, полученная при измерении ЧХЧ *m*-регистратора в бассейне с использованием предложенного метода. Кривой 2 изображена ЧХЧ с восстановленной осцилляцией. После применения описанной выше коррекции размах осцилляции увеличился примерно в 2 раза.

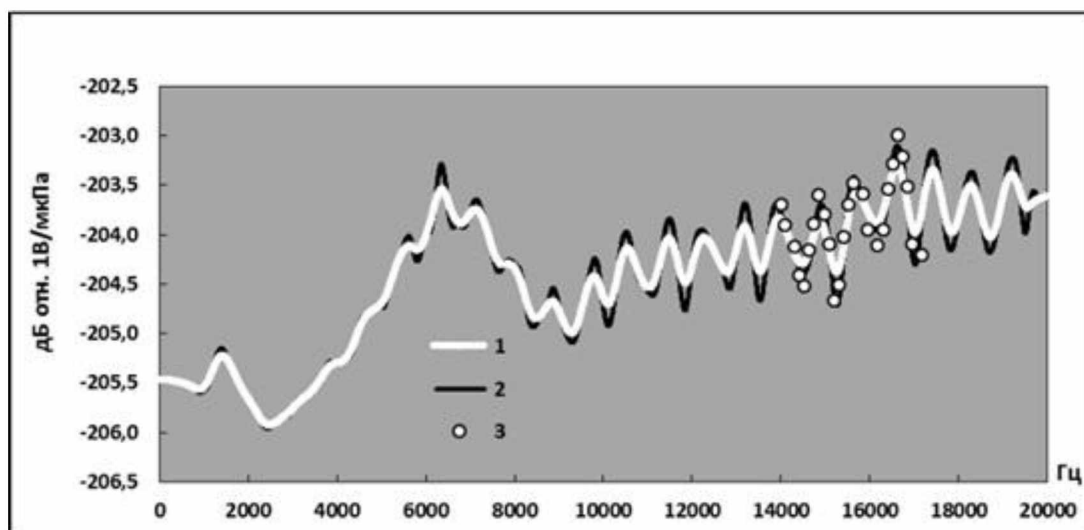


Рисунок 3.27 – ЧХЧ *m*-регистратора при фронтальном падении звуковой волны

Точками 3, положение которых практически совпадает с кривой 2, показаны результаты, полученные тонально-импульсным методом. Различия кривых 1 и 2 достигают 0,5 дБ. Это означает, что при оценке инструментальной погрешности измерений УПШ с использованием кривой 1, составляющая, обусловленная осцилляцией ЧХЧ, была бы занижена на 0,5 дБ. Это сравнимо с требованиями к общей неопределённости калибровки регистратора, предназначенного для измерений УПШ.

Калибровку гидрофонов по полю в бассейне выполняют на дискретных частотах третьоктавного ряда, используя тонально-импульсный метод измерений. В отличие от гидрофона, при калибровке регистратора необходимо получать подробные ЧХЧ, при этом трудоёмкость измерений тонально-импульсным методом многократно возрастает. Эта необходимость обусловлена несколькими причинами. По подробным ЧХЧ определяют чувствительность приёмника в полосах частот, которую используют при измерениях УПШ. Для того, чтобы по размаху осцилляций оценить инструментальную погрешность, также требуется большое число измерений, поскольку необходимо выявить положения экстремумов ЧХЧ. Правильность измерений удастся оценить только в конце эксперимента по форме полученной ЧХЧ.

Это можно пояснить на примере эксперимента с *m*-регистратором. При измерениях тонально-импульсным методом на осциллограмме выходного напряжения приёмника выбирают участок, который используют для оценки амплитуды напряжения. Обычно критерием выбора этого участка является установление выходного напряжения (неизменность амплитуды). В выполненном эксперименте с *m*-регистратором этот критерий требует существенного уточнения. На осциллограмме выходного напряжения присутствуют два участка установившегося напряжения. На первом участке, расположенном в пределах 1,17 мс от начала приёма, сигнал

обусловлен только прямой волной излучателя. Амплитуда напряжения на этом участке содержит информацию о ЧХ собственно гидрофона. Второй участок расположен в пределах последней миллисекунды, предшествующей приходу волны, отраженной ближайшей стенкой бассейна. На этом участке на гидрофон падают прямая волна излучателя и волна, рассеянная корпусом регистратора. По амплитуде напряжения на этом участке можно оценить чувствительность регистратора. Этот участок использован при контрольных измерениях.

Положение второго участка определялось не по осциллограмме принятого тонального импульса, а по кепстру частотной зависимости, измеренной с использованием ЛЧМ-сигнала. Участок кепстра в интервале задержек от 1,5 до 2 мс дополнительно искажен рассеянием от тыльного торца регистратора, влияние которого также должно быть учтено. Таким образом, чтобы выбрать участок осциллограммы, пригодный для измерений тонально-импульсным методом, необходимо использовать кепстр частотной зависимости, для чего сначала нужно получить частотную зависимость, измеренную либо при непрерывном изменении частоты сигнала излучателя, либо при малых приращениях частоты.

При калибровке сложных объектов неопределённость, вносимая усреднением при использовании метода СКВУ, увеличивается. Примером такого объекта является, рассмотренный в настоящей работе, *m*-регистратор с отнесенным от корпуса гидрофоном. В ситуации, когда гидрофон настолько удален от корпуса регистратора, что расстояние до отражающей звуковую волну элемента корпуса сопоставимо с расстоянием до отражающей стенки бассейна, требуется коррекция искажений, вносимых усреднением по методу СКВУ. Изложенный выше метод восстановления экспериментальной ЧХЧ показал свою эффективность, что подтверждает хорошее совпадение с результатами, полученными тонально-импульсным методом.

3.7.4 Выводы по результатам экспериментов

При измерениях тонально-импульсным методом реализуется прямоугольное временное окно (пространственный фильтр с прямоугольной характеристикой пропускания). В этом смысле тонально-импульсный метод можно принять за эталонный метод измерений. Предложенный способ коррекции позволяет приблизить форму характеристики пропускания пространственного фильтра, реализуемого при обработке по методу СКВУ, к прямоугольной. Это дает возможность, при измерении ЧХЧ таких сложных объектов как регистратор, получать результаты близкие к результатам тонально-импульсного метода, при этом обеспечивая измерения непрерывных частотных зависимостей вплоть до самых низких частот.

Для рутинных калибровок регистратора предпочтительно использовать ЛЧМ-сигнал и предложенный метод, включая изложенный выше метод восстановления ЧХЧ. Для проверки правильности выполненной коррекции целесообразно проводить измерения на контрольных

частотах тонально-импульсным методом. При выборе контрольных частот следует опираться на поведение непрерывных частотных зависимостей, полученных с помощью предложенного метода. Таким образом, при измерении ЧХЧ регистратора с вынесенным гидрофоном целесообразно использовать обе техники измерений, чтобы недостатки одной перекрыть преимуществами другой.

Целью экспериментов, выполненных с различными вариантами конструкции *m*-регистратора, было подтверждение достоверности и точности результатов, получаемых с применением предложенного метода, обоснование возможности выявлять в условиях ограниченных габаритов и недостаточного звукопоглощения гидроакустического бассейна элементы конструкции, ухудшающие акустические свойства приёмника, а также возможности использовать для этих целей предложенный метод. Возможность выполнять исследования в контролируемых лабораторных условиях на этапе компоновки образца позволяет оценить правильность основных технических решений, экономить средства и время на создание приёмника.

Важным преимуществом предложенной метода измерения ЧХЧ ГПУ является возможность выполнять измерения на таких низких частотах, где влияние дифракции пренебрежимо мало. Это позволяет на низких частотах использовать чувствительность гидрофона в качестве опорной чувствительности при анализе результатов калибровок приёмника. Достоверность результатов, полученных с использованием предложенного метода, подтверждают:

- близость на низких частотах ЧХЧ ГПУ при различных углах падения звуковой волны к ЧХЧ гидрофона;
- возможность надежного выделения положения источников рассеяния при различных углах падения звуковой волны (существенно изменяются как сила источника, так и время прихода рассеянной волны);
- уменьшение размаха и сохранение периода осцилляций при установке куполов на корпус *m*-регистратора;
- уменьшение размаха и периода осцилляций при увеличении расстояния между гидрофоном и корпусом *m*-регистратора;
- выполнение закона обратной пропорциональности между периодом осцилляций локализованного источника рассеяния и задержкой прихода рассеянной волны;
- совпадение результатов измерений с результатами, полученными тонально-импульсным методом.

Точность предложенного метода подтверждают результаты восстановления осцилляций с малым размахом и близость формы ЧХЧ *m*-регистратора к форме ЧХЧ гидрофона.

Выполненные эксперименты позволяют сформулировать некоторые рекомендации по разработке и компоновке ГПУ. Чтобы получить приемлемые акустические свойства ГПУ необходимо:

- максимально удалять от гидрофона все узлы, вызывающие рассеяние звука (уменьшается размах осцилляций, расстояние дальнего поля при приёме полосового сигнала также уменьшается);
- всем узлам, окружающим гидрофон, важно придать акустически обтекаемые формы, рассматривая рассеяние только в направлении точки приёма;
- при конструировании обтекателя отдавать предпочтение не его акустической прозрачности, а обеспечению минимального рассеяния;
- при создании образца выполнять исследования его акустических свойств с использованием разработанного метода;
- при исследованиях образцов с гидрофоном, отдаленным от контейнера с аппаратурой, предусматривать коррекцию ЧХЧ, подобную предложенной.

Результаты экспериментов подтверждают выносимые на защиту положения 2 и 3:

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. ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ПРИ ИЗМЕРЕНИЯХ ПОДВОДНОГО ШУМА

4.1 Учёт направленных свойств гидроакустического приёмного устройства при измерениях окружающего шума

Для разных целей измерений в воздушной акустике стандартизованы: требования к приёмнику звука; методики измерений; методы калибровки приёмника и использование данных калибровки. Например, для измерений в заглушенной камере используют микрофон, откалиброванный в свободном поле; для измерений окружающего шума используют микрофон, откалиброванный в диффузном поле.

Возросшее внимание к экологии моря привело к необходимости измерять окружающий шум в океане. При измерениях окружающего шума мощность принимаемого звукового сигнала распределена по частоте, а преимущественное направление приёма отсутствует. Для таких измерений при калибровке приёмника вместо чувствительности, определенной в соответствии с МЭК 60565, необходимо определять чувствительность приёмника по диффузному полю.

Чувствительность по МЭК 60565 [1] – это чувствительность в свободном поле, на фиксированной частоте, при падении плоской звуковой волны на приёмник с опорного направления. Стандартизованная в воздушной акустике чувствительность по диффузному полю – это чувствительность в полосе частот при падении звуковой волны на приёмник со всех направлений.

Чувствительность в полосе частот при угле падения звуковой волны φ_i рассчитывается по формуле (13) [5]:

$$M_H(f_0, \varphi_i, \Delta f) = \sqrt{\frac{1}{\Delta f} \int_{f_0 - \frac{\Delta f}{2}}^{f_0 + \frac{\Delta f}{2}} M_H^2(f, \varphi_i) df}, \quad (13)$$

где $M_H(f, \varphi_i)$ – ЧХЧ регистратора при угле падения звуковой волны φ_i ;

f_0 – центральная частота полосы частот;

Δf – номинальная ширина полосы частот.

Из-за невозможности достижения необходимой точности при определении чувствительности в диффузном поле лабораторного бассейна [7, 23], в данной работе в качестве названия чувствительности для измерений окружающего ПШ, наряду с термином «чувствительность по диффузному полю», будет использоваться термин «круговая чувствительность». По аналогии с чувствительностью по диффузному полю в воздушной акустике, круговая чувствительность $M_H^{кр}(f_0, \Delta f)$ вычисляется по формуле (14) при изменении угла падения звуковой волны φ_i от 0° до 360° :

$$M_H^{кр}(f_0, \Delta f) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n M_H^2(f_0, \varphi_i, \Delta f)}, \quad (14)$$

где n – количество отсчётов угла падения звуковой волны φ_i .

Измерительные гидрофоны характеризуются малой неравномерностью ХН и ЧХЧ. Именно на эти свойства гидрофона опираются стандарты на измерения шума корабля, устанавливая, в качестве одного из основных требований к гидрофону, требование его ненаправленности (omni-directional hydrophone) [48, 51, 52]. Ненаправленный гидрофон идеально подходит и для измерений окружающего шума, поскольку значения чувствительности гидрофона по свободному и диффузному полю численно совпадают или очень близки. Если при измерениях шума локализованного источника (корабля) свойство ненаправленности приёмника весьма желательно, потому что позволяет упростить процедуру измерений, то при измерении окружающего шума ненаправленность приёмника является обязательным требованием. На примере ГПУ, использованного для измерения окружающего шума в море, можно показать к чему приводит игнорирование этого требования [53, 54].

На рисунке 4.1 с шагом 1/6-октавы изображены: ЧХЧ гидрофона по МЭК – кривая 1, и ЧХЧ ГПУ с тем же гидрофоном по МЭК – кривая 2. ЧХЧ гидрофона слабо зависит от частоты и близка к плоской на частотах ниже 40 кГц. ЧХЧ ГПУ изрезана осцилляциями, вызванными рассеянием звуковой волны конструкцией ГПУ. Размах осцилляций достигает 8,5 дБ и не уменьшается с частотой. Кривой 3 на рисунке 4.1 изображена ЧХЧ ГПУ в третьоктавных полосах частот в опорном направлении. Кривая 3 не имеет резких изменений на высоких частотах, которые сглажены усреднением в широких частотных полосах. Осцилляции на низких частотах обусловлены уменьшением частотного интервала усреднения (ширины третьоктавной полосы).

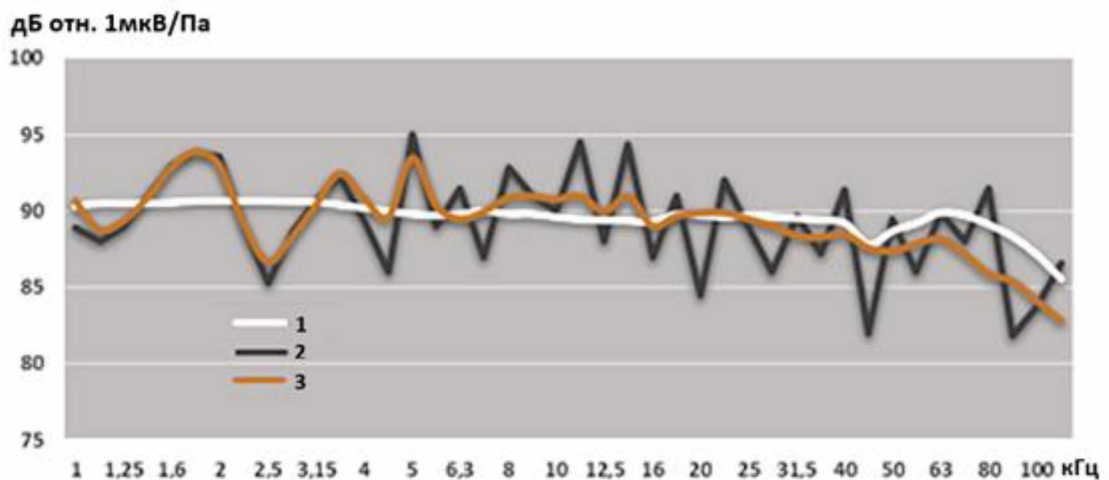


Рисунок 4.1 – ЧХЧ гидрофона по МЭК (кривая 1), ГПУ по МЭК (кривая 2), ГПУ в третьоктавных полосах частот (кривая 3)

Использование результатов измерений ЧХЧ в третьоктавных полосах частот привело к неожиданному результату при измерениях окружающего шума в море. На рисунке 4.2 представлены третьоктавные спектры УПШ.

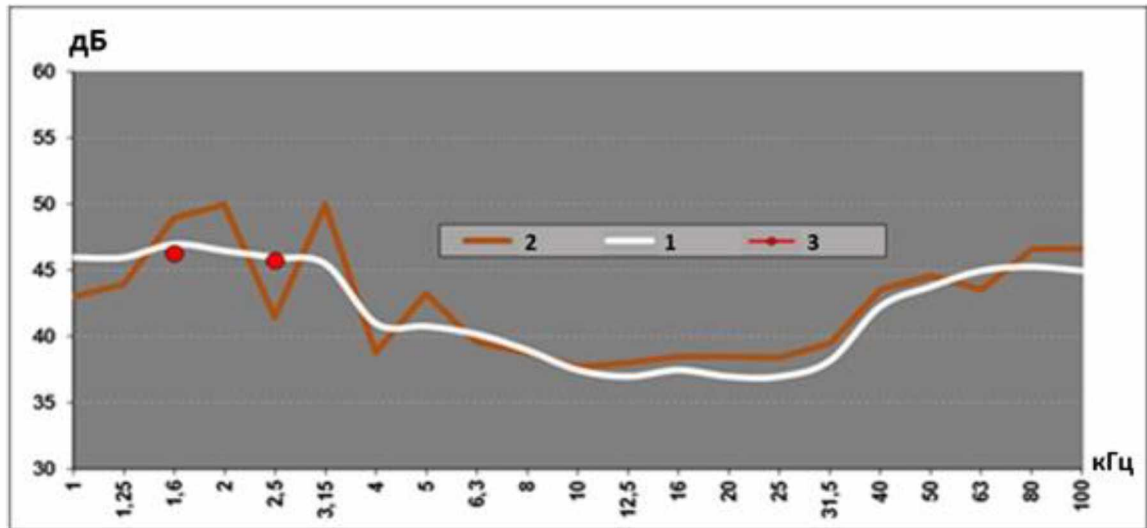


Рисунок 4.2 – Третьоктавные спектры УПШ,
кривая 1 – измеренные гидрофоном, откалиброванным по МЭК 60565,
кривая 2 – измеренные ГПУ, откалиброванным в третьоктавных частотных полосах

Различия кривых 1 и 2 на частотах выше 6,3 кГц не превышают 1,5 дБ, что можно считать приемлемым при существующих нормах на измерения ПШ. На частотах ниже 6,3 кГц различия возрастают до 4,5 дБ, причем поведение кривой 2 повторяет осцилляции ЧХЧ ГПУ (см. рисунок 4.1). Использование чувствительности в третьоктавных частотных полосах в опорном направлении не привело к повышению точности измерений на низких частотах. Это объясняется тем, что результаты калибровки использовались не корректно – не при измерениях шума с опорного направления, а при измерении окружающего шума в отсутствии преимущественного направления падения звуковой волны на ГПУ

При исследованиях *m*-регистратора было установлено, что наибольшее влияние рассеянной звуковой волны проявляется при её падении с опорного направления и является причиной значительных провалов и выбросов на ХН ГПУ в опорном направлении на частотах экстремумов ЧХЧ. Подобные искажения ХН типичны для ГПУ симметричной формы, имеющих локализованный источник рассеяния, например, регистратор. И осцилляции ЧХЧ при фронтальном падении звуковой волны превышают осцилляции при боковом падении и вносят основной вклад в неравномерность ХН.

Следствием калибровки в третьоктавных полосах частот стало уменьшение неравномерности ХН на высоких частотах. На низких частотах этого не произошло, и направленные свойства регистратора проявились в результатах измерений спектра окружающего шума.

На рисунке 4.2 отдельными точками (ряд 3) показаны УПШ, рассчитанные с использованием круговой чувствительности ГПУ. Использование такой чувствительности уменьшило расхождения в результатах измерений окружающего шума на низких частотах.

Процедуру калибровки ГПУ для измерений окружающего шума целесообразно усовершенствовать таким образом, чтобы избавиться от влияния на чувствительность направленности ГПУ: требование «калибровка в третьоктавных полосах частот» необходимо дополнить требованием «калибровка по диффузному полю». Это не исключает калибровки этого же самого ГПУ по свободному полю. В воздушной акустике стандартизовано измерение трёх ЧХЧ у одного микрофона: по свободному полю, по давлению и 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 [7, 23]. Решение может быть основано на использовании подробных ЧХЧ ГПУ по свободному полю [55, 56, 57, 58, 59, 60, 61].

Предложенный метод позволяет в условиях лабораторного бассейна получать подробные ЧХЧ ГПУ по свободному полю вплоть до самых низких частот, на которых направленностью ГПУ можно пренебречь. В свою очередь, подробные ЧХЧ дают возможность, как в воздушной акустике, выполнять калибровку ГПУ по диффузному полю расчётным методом.

ЧХЧ микрофона по свободному полю получают в безэховой камере. Примечательно отличие ситуации с калибровкой ГПУ – излучая полосовой сигнал в лабораторном бассейне, создаётся реверберационное звуковое поле; в реверберационном поле выполняется точная калибровка по свободному полю; чувствительность по свободному полю используется для вычисления ЧХЧ ГПУ по диффузному полю.

Метод вычисления чувствительности шумомера по диффузному полю по взвешенным значениям чувствительности по свободному полю для различных направлений падения звуковой волны стандартизован в воздушной акустике. Представляется целесообразным выполнить соответствующие исследования с различными типами 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, потребует общих усилий, поскольку выходит за рамки возможностей одной лаборатории.

4.2 Особенности калибровки регистратора для измерений шума судов

Основное применение регистратора – измерение окружающего шума. При этом, стандарт ISO/DIS 17208-2:2017 [52] рекомендует при измерениях шума судна вместо гидрофонов использовать автономные регистраторы, как наиболее экономичный способ построения схем развёртывания приёмников. Рассмотрим особенности калибровки регистратора для использования в таких целях.

Стандарты на измерения шума судна предписывают измерять уровень шума в третьоктавных полосах частот. Поскольку ЧХЧ регистратора существенно отличается от равномерной ЧХЧ гидрофона, из этого требования вытекает необходимость использования чувствительности регистратора в соответствующих полосах частот, а не на центральных частотах третьоктавных фильтров, как это делают для гидрофона.

Измерения выполняются, обеспечивая фиксированную ориентацию приёмника в пространстве. При проходе судна испытательным курсом (test course) угловой сектор измерений составляет от $\pm 30^\circ$ [48, 52] (см. рисунок 4.3) до $\pm 45^\circ$ [52] (см. рисунок 4.4). Приёмники располагают на разных глубинах, как это показано на рисунок 4.5, при этом для разных приёмников угловые сектора различаются.

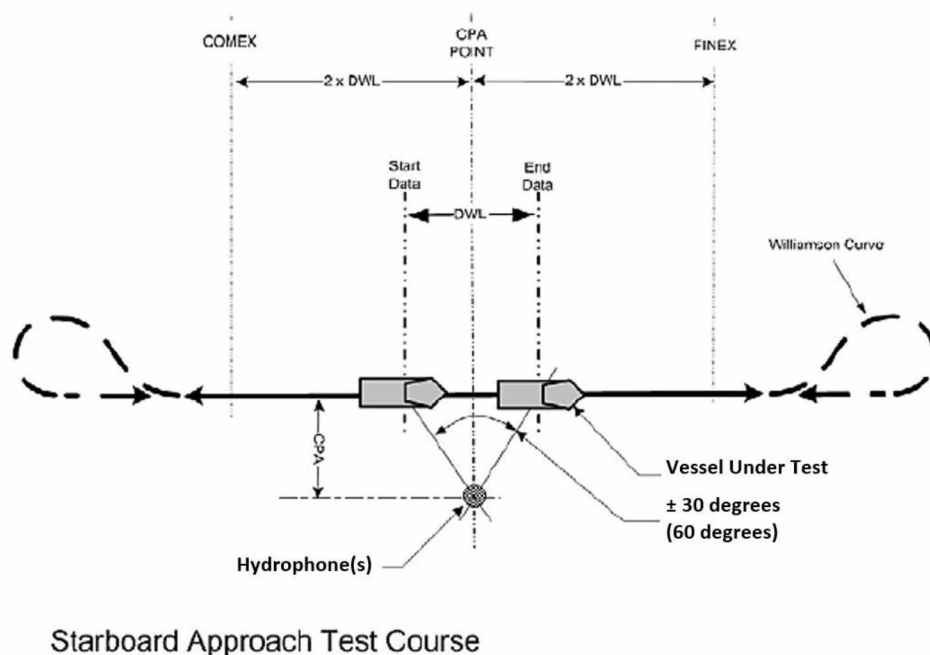


Рисунок 4.3 – Угловой сектор измерений при акустических испытаниях судна (ANSI S12.64-2009 и ISO/DIS 17208-2:2017)

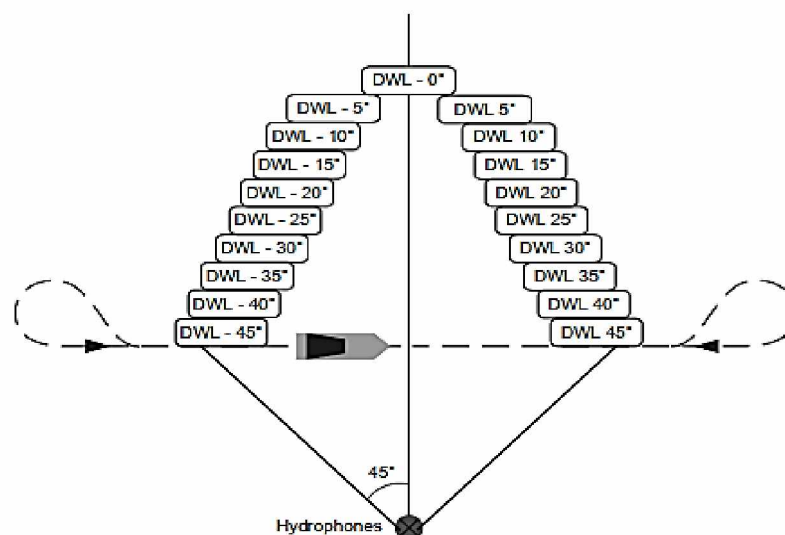


Рисунок 4.4 – Угловой сектор измерений при акустических испытаниях судна (Rule Note NR 614 «Underwater Radiated Noise (URN)»)

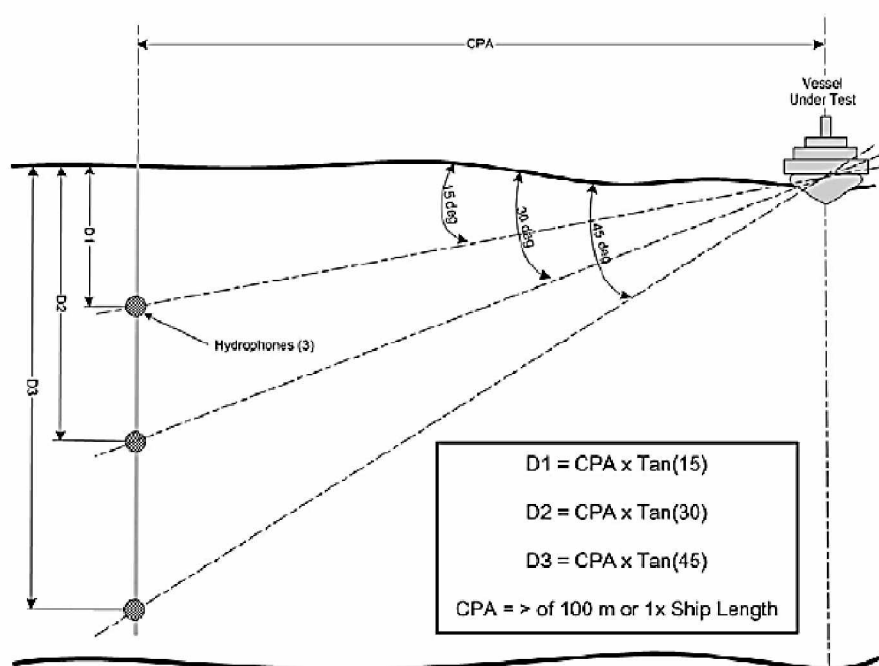


Figure 1 – Grades A and B hydrophone geometry.

Рисунок 4.5 – Геометрия развертывания приемников при испытаниях судна (ANSI S12.64-2009 и ISO/DIS 17208-2:2017)

Требование ISO/DIS 17208-2:2017 [52] к ненаправленности регистратора (при неопределённости измерений шума судна 4,0 дБ в мелкой воде, 3,5 дБ в глубокой воде и допуске на неопределённость калибровки приёмника 2 дБ) означает, что, в отсутствии других источников неопределённости, неравномерность ХН регистратора должна быть меньше 3 дБ. Аналогичные требования к направленности регистратора и в других стандартах на измерения шума корабля

[48, 52]. Очевидно, что выполнить такие требования к направленности регистратора весьма затруднительно – гидрофон приходится удалять на большое расстояние от корпуса регистратора, что существенно усложняет конструкцию системы позиционирования регистратора.

Более практичным представляется подход, основанный на использовании секторальной чувствительности. Чувствительность в полосе частот определена в [5] как среднее квадратическое значение ЧХЧ приёмника в номинальной полосе частот фильтра. Секторальной чувствительностью в полосе частот будет среднее квадратическое значение чувствительности в полосе частот в угловом секторе измерений. При этом подразумевают угловой сектор, расположенный в наклонной плоскости, проходящей через акустический центр регистратора и номинальную траекторию перемещения акустического центра корабля.

Такое определение полностью соответствует измерению шума корабля по классам В и С [48, 52]. При измерениях по классам В и С напряжение на выходе приёмника усредняется в едином временном интервале данных, границы которого точно соответствуют проходу корабля в угловом секторе измерений. Поскольку в этом случае результат усреднения напряжения в полосе частот в угловом секторе измерений будет представлен одним числом, то и чувствительность регистратора должна быть охарактеризована одним числом, наиболее адекватным измерительной ситуации.

Такой способ учета ХН регистратора можно также использовать при измерениях, когда временное окно данных делят на короткие выборки, для каждой из которых выполняют коррекцию на изменение расстояния между акустическими центрами корабля и регистратора – измерения по [51] и по классу А в [48, 52].

В зависимости от способа крепления регистратора значения секторальной чувствительности следует определять во фронтальном или боковом угловых секторах. Однако, если крепление допускает изменение ориентации регистратора в процессе измерений, то вместо требования к допустимой неравномерности ХН регистратора появляется требование к неравномерности секторальной ХН регистратора, выполнить которое значительно проще.

Чувствительность в полосе частот в угловом секторе $\Delta\varphi$ (секторальная чувствительность), заданном начальным φ_1 и конечным φ_n значениями углов падения звуковой волны на регистратор, вычисляется, как среднее квадратическое значение чувствительностей регистратора в полосе частот при изменении угла падения звуковой волны от φ_1 до φ_n , по формуле (15):

$$M_H^{\text{сект}}(f_0, \Delta\varphi, \Delta f) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n M_H^2(f_0, \varphi_i, \Delta f)}, \quad (15)$$

где n – количество отсчётов угла падения звуковой волны φ_i в секторе от φ_1 до φ_n .

Приведённая секторальная чувствительность в полосе частот рассчитывается по формуле (16):

$$m_H(f_0, \Delta\varphi, \Delta f) = 20 \lg \frac{M_H^{\text{сект}}(f_0, \Delta\varphi, \Delta f)}{M_H(f_0, \varphi_{\text{оп}}, \Delta f)}. \quad (16)$$

На рисунке 4.6 изображены ХН приведённой чувствительности m -регистратора с гидрофоном, отнесенным от корпуса на 830 мм: кривыми 1 – в третьоктавных полосах с центральными частотами 6,3 кГц, 10 кГц, 12,5 кГц и 16 кГц; кривыми 2 и 3 – для тех же частотных полос в угловых секторах $\pm 45^\circ$ и от 45° до 135° .

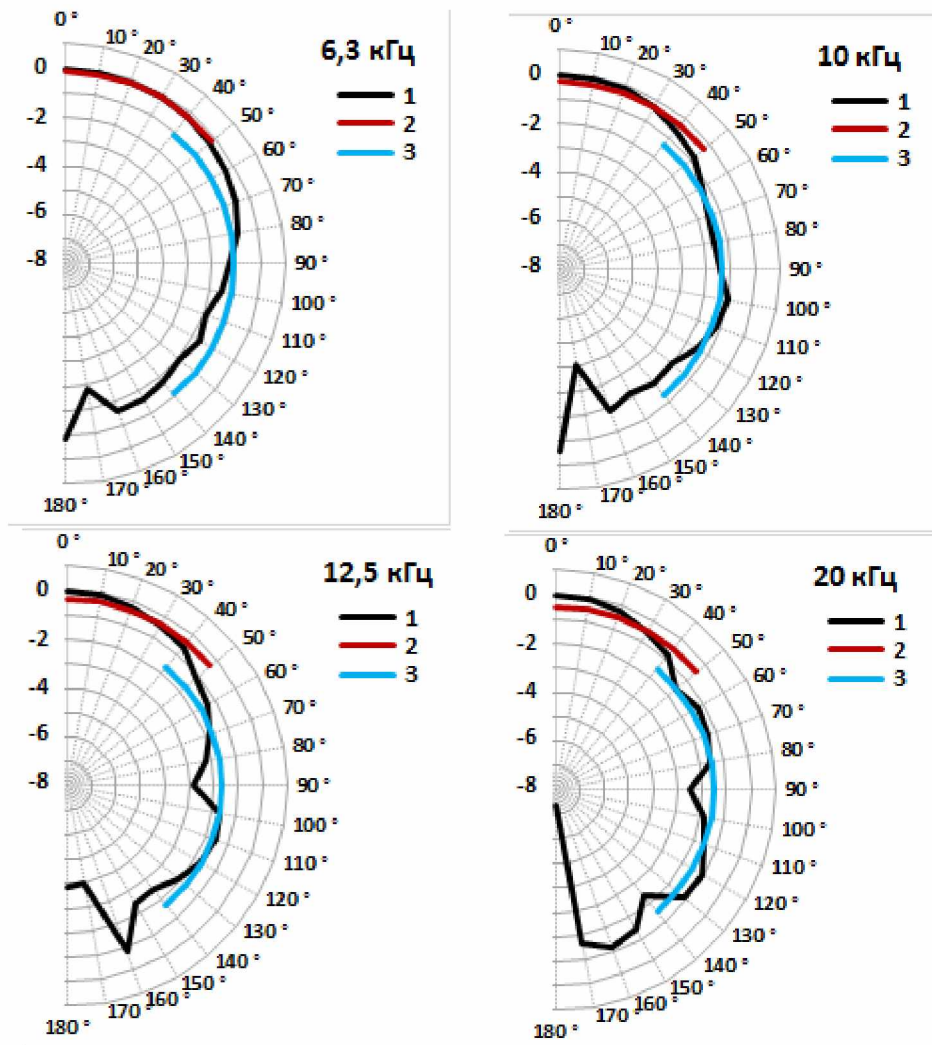


Рисунок 4.6 – Характеристики направленности приведённой чувствительности m -регистратора

Несмотря на принятые меры по уменьшению рассеяния, неравномерность ХН, полученных усреднением чувствительности в третьоктавных полосах частот, достигает 2,8 дБ при углах падения звуковой волны от -135° до 135° . При такой неравномерности ХН суммарная неопределённость результатов измерений может выйти за пределы, установленные в стандартах. При использовании секторальной чувствительности составляющая неопределённости,

обусловленная направленностью приёмника, не превысит 1,2 дБ. При этом неравномерность секторальной ХН регистратора будет находиться в пределах долей децибела.

При построении характеристик, представленных на рисунке 4.6, использованы ЧХЧ *m*-регистратора в горизонтальной плоскости, то есть при получении секторальной чувствительности не учтена глубина погружения регистратора. Очевидно, что при калибровке регистратора для измерений шума судна должен быть учтён угол наклона прямой, проходящей через акустические центры регистратора и судна, как показано на рисунке 4.5.

4.3 Выводы к главе

Прямое применение МЭК 60565 для калибровки ГПУ для измерения ПШ не позволяет получить чувствительность, адекватную условиям измерений, и приводит к необоснованно завышенной оценке неопределённости результатов измерений. Исходя из опыта измерений шума в воздушной акустике, необходимо расширить номенклатуру характеристик ГПУ. При выполнении стандартизованных измерений шума коммерческого судна предложено использовать чувствительность ГПУ в угловых секторах измерений, которая позволяет адекватно учесть направленные свойства ГПУ и избежать завышенной оценки неопределённости результатов измерений. При измерениях окружающего ПШ для целей мониторинга морской среды предложено использовать круговую чувствительность ГПУ. Следует ожидать, что использование чувствительности ГПУ, полученной применительно к решаемой задаче измерений, поможет существенно повысить как достоверность, так и точность результатов измерений ПШ.

В рамках обеспечения единства измерений в отсутствии эталона измеряемой величины – ПШ, термин «правильность (trueness)» означает степень близости среднего значения, полученного на основании большой серии результатов измерений, к принятому опорному значению. При этом выстраивается цепочка понятий: правильность – опорное значение – валидация – верификация, которые обеспечивают связь требований, устанавливаемых к приёмнику и методам его калибровки, с предполагаемым использованием приёмника.

И при лабораторных измерениях, и при измерениях шума в море измеряемой величиной является звуковое давление. Однако смысловая нагрузка термина «звуковое давление», и набор параметров, которыми характеризуют звуковое давление в зависимости от цели измерений совершенно различны. В силу неидеальности ГПУ, решение задач валидации требует использовать разные наборы характеристик ГПУ для разных задач измерений. Следовательно, выполнять калибровку ГПУ, предназначенного для измерений ПШ, нужно либо применительно к измерениям шума локализованного источника, либо к измерениям окружающего шума, либо, как это делают в воздушной акустике, получать и использовать для одного и того же ГПУ два

значения чувствительности, каждое для своей измерительной задачи. Примерами этого являются секторальная и круговая чувствительность.

Если обратиться к полученной в НФЛ ЧХ регистратора AURAL-M2 (рисунок 1.1), то в третьоктавной полосе 40 кГц размах осцилляций, обусловленный рассеянием фронтальной поверхностью корпуса регистратора, можно оценить в 17 дБ. Это соответствует рассеивающей способности 85 % и погрешности измерения УПШ в этой полосе частот 17 дБ. Период осцилляции составляет примерно 8 кГц, что соответствует удаленности блестящей точки (фронтальной поверхности) от гидрофона примерно на 20 см. Ширина третьоктавной полосы с центральной частотой 40 кГц составляет примерно 9,1 кГц. При таком соотношении между шириной полосы измерений и удаленности блестящей точки блестящая точка выпадает из области приема. При измерениях УПШ в третьоктавной полосе частоты 40 кГц, влияние корреляционной компоненты блестящей точки, удаленной от гидрофона на 20 см, на результат измерений будет ослаблено не менее чем в 5 раз. Результатом такого ослабления будет уменьшение погрешности измерения УПШ с 17 дБ до 1,6 дБ. Сказанное справедливо, если при калибровке вместо чувствительности на гармоническом сигнале определяли чувствительность в третьоктавной полосе частот. На рисунке 1.1 видна попытка получить оценку такой чувствительности усреднением результатов, полученных при калибровке регистратора на гармонических сигналах, показано пунктирной кривой синего цвета.

Приведенный пример показывает, что даже для конструкций с большим рассеянием за счет «правильной» калибровки удастся получать значительный выигрыш в точности измерений.

В свою очередь, уменьшение «акустического» размера означает сокращение зоны ближнего поля при приёме полосовых сигналов в сравнении с приёмом гармонических сигналов.

Совокупность полученных результатов и предложенных способов определения чувствительности подтверждают выносимое на защиту положение 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 опорного направления или в заданном угловом секторе.

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 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.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- АЦП/ЦАП – аналого-цифровое и цифро-аналоговое преобразования;
- БПФ – быстрое преобразование Фурье;
- ГПУ – гидроакустическое приёмное устройство;
- ГПО – гомоморфная время-селективная постобработка;
- ИХ – импульсная характеристика;
- КМО – камера малого объёма;
- КШД – контроллер шаговых двигателей;
- ЛЧМ-сигнал – линейно-частотно модулированный сигнал;
- МКМВ – Международный комитет мер и весов (фр. Bureau International des Poids et Mesures, BIPM);
- МЭК – Международная электротехническая комиссия (англ. International Electrotechnical Commission, IEC);
- НФЛ – Национальная физическая лаборатория Великобритании (англ. National Physical Laboratory, NPL);
- ПИ – передаточный импеданс;
- ПШ – подводный шум;
- ПФ – передаточная функция;
- СВЗ – спектрометрия временных задержек;
- СИ – средство измерений;
- СКВУ – скользящее комплексное взвешенное усреднение;
- УПШ – уровень подводного шума;
- ФНЧ – фильтр низких частот;
- ХН – характеристика направленности;
- ЧХЧ – частотная характеристика чувствительности;
- ЧХ – частотная характеристика;
- ЧХЧ – частотная характеристика чувствительности;
- m*-регистратор – массогабаритный макет регистратора подводного шума AURAL-M2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IEC 60565 (2006). Подводная акустика. Гидрофоны. Калибровка в частотном диапазоне от 0,01 Гц до 1 МГц [Текст]; МКС 17.140.50, 2006. – 168 с.
2. **Европейский парламент и Совет Европейского Союза**. Директива 2008/56/ЕС устанавливающая рамочное законодательство Сообщества в области морской природоохранной политики (Рамочная директива морской стратегии) [Текст]. – Брюссель, 2008 – 19 с.
3. **Кособродов, Р.А.** Влияние дифракции звука на носители гидроакустической аппаратуры на результаты измерений [Текст] / Р.А. Кособродов, В.Н. Некрасов // Акустический журнал. – 2001. – № 3 (47). – С. 382–388.
4. **Наумов, С.С.** Метод спектрометрии временных задержек в натурных гидроакустических измерениях [Текст]: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.03; 01.04.06 / Наумов Сергей Сергеевич. – Н. Новгород, 2005. – 22 с.
5. **Исаев, А.Е.** Точная градуировка приёмников звукового давления в водной среде в условиях свободного поля [Текст]: монография / А.Е. Исаев; под ред. П.А. Красовского. – Менделеево: ВНИИФТРИ, 2008. – 369 с.
6. **Матвеев, А.Н.** Разработка и исследование методов градуировки гидроакустического приёмника при излучении сигналов с линейной частотной модуляцией [Текст]: дис. ... канд. тех. наук: 05.11.15 / Матвеев Антон Николаевич. – Менделеево, 2015. – 105 с.
7. **Черников, И.В.** Разработка и исследование методов и средств градуировки гидроакустических приёмников по полю с использованием шумового сигнала [Текст]: дис. ... канд. тех. наук: 05.11.06 / Черников Илья Владимирович. – Менделеево, 2016. – 96 с.
8. **Heyser, R.C.** Acoustical Measurements by Time Delay Spectrometry [Текст] // Journal of the Acoustical Society of America. – 1967. – vol. 15. – P. 370–382.
9. **Heyser, R.C.** Loudspeaker Phase Characteristics and Time Delay Distortion [Текст] // Journal of the Acoustical Society of America. – 1969. – vol. 17. – P. 30–41.
10. **Heyser, R.C.** Determination of Loudspeaker Signal Arrival Times, Parts I, II & III [Текст] // Journal of the Acoustical Society of America. – 1971. – vol. 1–25. – 225 p.
11. **Heyser, R.C.** Time Delay Spectrometry - An Anthology of the Works of Richard C. Heyser [Текст] / New York: Acoustical Society of America, 1988. – 275 p.
12. **Vanderkooy, J.** Another Approach to Time-Delay Spectrometry [Текст] // Journal of the Acoustical Society of America. – 1986 – vol. 34. – P. 523–538.
13. **Greiner, R.** A Digital Approach to Time Delay Spectrometry [Текст] / R. Greiner, J. Wania, G. Noejovich // Journal of the Acoustical Society of America. – 1989 – vol. 37. – P. 593–602.
14. **D'Antonio, P.** Complex Time Response Measurements Using Time-Delay Spectrometry (Dedicated to the late Richard C. Heyser) [Текст] / P. d'Antonio, J. Konnert // Journal of the Acoustical Society of America. – 1989. – vol. 37. – P. 674–690.
15. **Herlufsen, H.** Dual Channel FFT Analysis (Part I, II) [Текст] // Brüel & Kjær. Technical Review. – 1984. – № 1. – 57 p.
16. **Shoukens, J.** Measurement of Frequency Response Functions in Noise Environments [Текст] / J. Shoukens, R. Pintelon // IEEE Trans. Instrum. Meas. – 1990. – vol. 39.
17. **Shoukens, J.** Broadband versus Stepped Sine FRF Measurements [Текст] / J. Shoukens, R. Pintelon, Y. Rolain // IEEE Trans. Instrum. Meas. – 2000. – № 2.

18. **Berman, J.M.** The Application of Digital Techniques to the Measurement of Loudspeakers [Текст] / J.M. Berman, L.R. Fincham // Journal of the Acoustical Society of America. – 1977. – vol. 25. – P. 370–384.
19. **Fincham, L.R.** Refinements in the Impulse Testing of Loudspeakers [Текст] // Journal of the Acoustical Society of America. – 1985. – vol. 41. – P. 133–140.
20. **Dunn, C.** Distortion Immunity of MLS-Derived Impulse Response Measurements [Текст] / C. Dunn, M.O. Hawksford // Journal of Audio Engineering Society. – 1993. – vol. 41. – P. 314–335.
21. **Borish, J.** An Efficient Algorithm for Measuring the Impulse Response Using Pseudo-Random Noise [Текст] / J. Borish, J. Angell // Journal of Audio Engineering Society. – 1983 – vol. 33 – P. 478–488.
22. **Barrera Figueroa, S.** A time selective technique for free-field reciprocity calibration of condenser microphones [Текст] / S. Barrera Figueroa, K. Rasmussen, F. Jacobsen // Journal of the Acoustical Society of America. – 2003. – vol. 114. – P. 1467–1476.
23. **Лопашёв, Д.З.** Исследование звукового поля в большом измерительном бассейне. Исследования в области акустических и гидроакустических измерений [Текст] // Труды институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов СССР. – М.: Стандартгиз. – 1963. – Вып. 73 (133). – С. 31–40.
24. **Müller, S.** Transfer-Function Measurement with Sweeps [Текст] / S. Müller, P. Massarani // Journal of Audio Engineering Society. – 2001. – vol. 49. – P. 443–471.
25. Р 50.2.037-2004 ГСИ. Измерения гидроакустические. Термины и определения [Текст]. – М.: Госстандарт России, 2004. – 63 с.
26. IEC 60050-801 Международный электротехнический словарь. Глава 801. Акустика и электроакустика [Текст]; МКС 01.040.17, 17.140, 17.140.50, 1994. – 178 р.
27. **Рандалл, Р.Б.** Частотный анализ [Текст]: монография. – Дания: ДК-2850 Нерум, 1989. – 379 с.
28. **Кулиев, Ю.Н.** Пьезоприёмники давления [Текст]: монография. – Ростов-на-Дону: Ростовский университет, 1976. – 152 с.
29. **Robinson, S.P.** An international key comparison of free-field hydrophone calibrations in the frequency range 1 to 500 kHz [Текст] // Journal of the Acoustical Society of America. – 2006. – vol. 120. – P. 1366–1373.
30. **Исаев, А.Е.** Повышение частотного разрешения при обработке акустических сигналов методом скользящего комплексного взвешенного усреднения [Текст] / А.Е. Исаев, А.Н. Матвеев // Акустический журнал. – 2010. – № 2 (56). – С. 277–283.
31. **Исаев, А.Е.** Нижняя частота градуировки гидрофона «по полю» при излучении тональных сигналов в незаглушенном бассейне [Текст] // Измерительная техника. – 2010. – № 1. – С. 20–24.
32. **Исаев, А.Е.** Уменьшение влияния переходного процесса при градуировке гидрофонов «по полю» на низких частотах с использованием квадратурно-дополненных гармонических сигналов [Текст] // Измерительная техника. – 2010. – № 4. – С. 20–24.
33. **Beatty, L.G.** Use of the complex exponential expansion as a signal representation for underwater acoustic calibration [Текст] / L.G. Beatty, J. D. George, A.Z. Robinson // Journal of the Acoustical Society of America. – 1978. – vol. 63. – P. 1782–1794.
34. **Ainsleigh, P.L.** Modelling exponential signals in a dispersive multipath environment [Текст] / P.L. Ainsleigh, J.D. George // IEEE Int. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing. – 1992. – vol. 5. – P. 457–60.

35. **Ainsleigh, P.L.** Signal modelling in reverberant environments with application to underwater electroacoustic transducer calibration [Текст] / P.L. Ainsleigh, J.D. George // Journal of the Acoustical Society of America. – 1995. – vol. 98 – P. 270–279.
36. **Robinson, S.P.** Signal-modelling methods applied to the free-field calibration of hydrophones and projectors in laboratory test tanks [Текст] / S.P. Robinson, G. Hayman, P.M. Harris, G.A. Beamiss // Measurement Science and Technology. – 2018. – vol. 29. – article id. 085001.
37. **Исаев, А.Е.** Градуировка приёмника градиента давления по полю в отражающем бассейне с применением ЛЧМ сигнала [Текст] / А.Е. Исаев, А.Н. Матвеев, Г.С. Некрич, А.М. Поликарпов // Акустический журнал. – 2013. – № 6 (59). – С. 773–781.
38. **Исаев, А.Е.** Комплексная градуировка приемника градиента давления с использованием процедуры метода взаимности [Текст] / А.Е. Исаев, А.Н. Матвеев, Г.С. Некрич, А.М. Поликарпов // Акустический журнал. – 2014. – № 1 (60). – С. 48–55.
39. **Исаев, А.Е.** Использование сигналов с распределённой по частоте мощностью для лабораторной градуировки гидроакустического приёмника [Текст] / А.Е. Исаев, И.В. Черников // Измерительная техника. – 2015. – № 10. – С. 64–67.
40. **Маслов, В.К.** Современные технологии анализа и обработки информации в физико-технических измерениях [Текст]: монография. – Менделеево: ВНИИФТРИ, 2010. – 583 с.
41. ISO 18406:2017 Гидроакустика. Измерение излучаемого подводного звука от ударов при забивке свай [Текст]; МКС 17.140.30, 2017. – 40 с.
42. **Николаенко, А.С.** Лабораторная калибровка гидроакустического приемника по полю на низких частотах [Текст] / А.С. Николаенко, А.Е. Исаев // Измерительная техника. – 2018. – № 01. – С. 54–59.
43. МЭК 565 (565 A): 1977 Международная электротехническая комиссия. Градуировка гидрофонов [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 1981.
44. ANSI S 1.20 Procedures for calibration of underwater electro-acoustic transducers [Текст]; МКС 17.140.50, 1988.
45. GB/T 3223 Acoustics. Free field calibration method of underwater sound transducers [Текст]; МКС 17.140.10, 1994
46. **Румынская, И.А.** Основы гидроакустики [Текст]: монография. – Л.: Судостроение, 1979. – 209 с.
47. Электронная аппаратура [Текст]: каталог / Дания: Брюль и Кьер, 1992. – С. 215.
48. ANSI/ASA S12.64 (R2014) Quantities and Procedures for Description and Measurement of Underwater Sound from Ships. Part 1: General Requirements [Текст] // Acoustical Society of America. – 2009. – 21 p.
49. **Совет Европейского Союза.** Директива 92/43/ЕЭС о сохранении естественных мест обитания, а также дикой фауны и флоры [Текст]. – Брюссель, 1992.
50. **Ширман, Я. Д.** Теоретические основы радиолокации: учебное пособие для вузов. – М.: Советское радио, 1970. – 560 с.
51. Rule Note NR 614 Underwater Radiated Noise (URN) [Текст] // Bureau Veritas. – 2018. – 17 p.
52. ISO/DIS 17208-2 Underwater acoustics – Quantities and procedures for description and measurement of underwater noise from ships – Part 2: Determination of source levels from deep water measurements [Текст]; МКС 17.140.30. – 2019. – 88 p.
53. **Nikolaenko, A.S.** Calibration of the receiver for the measurement of ambient underwater noise [Текст] / Isaev A.E., Nikolaenko A.S. // Proc. of the 45th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering INTER-NOISE 2016. – Hamburg: DEGA 2016. – P. 7050–7057.

54. **Николаенко, А.С.** Метод измерений частотной характеристики приёмника подводного шума в условиях лабораторного бассейна [Текст] / А.Е. Исаев, А.С. Николаенко // Сборник МВТФ «АРМИЯ-2016». – 2016 – С. 63.

55. **Исаев, А.Е.** Лабораторная градуировка гидроакустического приёмника в реверберационном поле шумового сигнала [Текст] / А.Е. Исаев, И.В. Черников // Акустический журнал. – 2015. – № 5 (61). – С. 1–9.

56. **Николаенко А.С.** Подавление реверберационных искажений сигнала приемника с использованием передаточной функции бассейна [Текст] / А.Е. Исаев, А.С. Николаенко, И.В. Черников // Акустический журнал. – 2017. – № 2 (63). – С. 1–10

57. **Исаев, А.Е.** Критерий качества реализации условий свободного поля при градуировке гидроакустического приемника в бассейне с отражающими границами [Текст] // Измерительная техника. – 2014. – № 5. – С. 48–53.

58. **Исаев, А.Е.** Лабораторная градуировка приемника для измерений уровней подводного шума корабля [Текст] // Измерительная техника. – 2015. – №1. – С. 53–58.

59. **Исаев, А.Е.** Два подхода к градуировке гидрофона по полю при непрерывном излучении в незаглушенном бассейне [Текст] / А.Е. Исаев, А.Н. Матвеев // Измерительная техника. – 2008. – № 12. – С. 47–51.

60. **Исаев, А.Е.** Градуировка гидрофонов по полю при непрерывном излучении в реверберирующем бассейне [Текст] / А.Е. Исаев, А.Н. Матвеев // Акустический журнал. – 2009. – № 2 (55). – С. 1–10.

61. **Николаенко А.С.** Лабораторная калибровка гидроакустического приемника по полю на низких частотах [Текст] / А.Е. Исаев, А.С. Николаенко // Измерительная техника. – 2018. – № 1. – С. 54–59.