

УДК 534.6.08

ИННОВАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ ГРАДУИРОВКИ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В РЕВЕРБЕРАЦИОННОМ ПОЛЕ ЛАБОРАТОРНОГО БАССЕЙНА

А.Е. Исаев, И.В. Черников, Н.Г. Щерблюк

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл.

isaev@vniiftri.ru

«Все сложное – не нужно,
все нужное – просто!»

М. Т. Калашников

Описана технология измерений по свободному полю для градуировки гидроакустических преобразователей в незаглушенном лабораторном бассейне. Технология основана на применении реверберационных полей шумового и линейно частотно модулированного сигнала в сочетании с обработкой методом скользящего комплексного взвешенного усреднения. Приводится описание программно-аппаратного комплекса и результаты испытаний технологии в измерительном бассейне ГЭТ 55-2011

Ключевые слова: гидроакустические преобразователи, градуировка, программно-аппаратный комплекс, измерительный бассейн

За годы применения программно-аппаратной реализации метода скользящего комплексного взвешенного усреднения (СКВУ) выполнен широкий круг исследований, способствовавший совершенствованию как самого метода СКВУ, так и программно-аппаратной реализации. Оценена степень подавления отражений в бассейнах различной формы и размеров, исследованы ограничения и характерные источники погрешностей. На ЛЧМ сигналах с точностью тонально импульсного метода выполнены градуировки гидроакустических приемников по полю методом взаимности и методом сравнения с опорным гидрофоном, составлены и подтверждены международными сличениями различного уровня бюджеты неопределенностей калибровки гидрофонов. Впервые в метрологической практике на ЛЧМ

сигналах осуществлены: градуировка в полосах частот приемника подводного шума, амплитудно-фазовая градуировка по полю векторного гидроакустического приемника. При этом частотный диапазон градуировки гидрофона по полю в незаглушенном бассейне с минимальным размером 6 м удалось расширить в сторону низких частот с 3,15 кГц до 250 Гц, а верхнюю граничную частоту градуировки векторного приемника увеличить с 2 до 12,5 кГц.

Под технологией (от др.-греч. τέχνη — искусство, мастерство, умение; λόγος — мысль, причина; методика) — в широком смысле принято понимать совокупность методов, процессов, используемых в какой-либо отрасли деятельности, а также научное описание способов технического производства; в узком — комплекс организационных мер, опера-

ций и приемов, направленных на изготовление, обслуживание, ремонт и/или эксплуатацию изделия с номинальным качеством и оптимальными затратами и обусловленных текущим уровнем развития науки, техники и общества в целом.

В соответствии с приведенным определением можно говорить о том, что во ВНИИФТРИ разработана и продолжает совершенствоваться инновационная технология измерений по полю для выполнения метрологических работ в реверберационных полях лабораторного бассейна. Технология включает в себя программно-аппаратную реализацию метода СКВУ, критерий качества реализации условий свободного поля, процедуры оперативного измерения подробной частотной зависимости комплексного передаточного импеданса пары излучатель-приемник, процедуры испытаний акустических свойств гидрофонов и их носителей различного конструктивного исполнения, градуировки гидроакустических приемников по полю методами взаимности и сравнения, включая измерения фазочастотных характеристик.

Дальнейшее совершенствование технологии подразумевает ее развитие в узком смысле, как-то: создание нормативно-технической базы и проведение организационных мероприятий, обеспечивающих разработку и поверку средств измерений подводного звука с требуемым метрологическим качеством.

В рамках настоящей статьи авторы хотят сосредоточить внимание

читателя на результатах, полученных на очередном этапе разработки технологии - использование шумового сигнала для градуировки гидроакустического приемника по полю в реверберационном поле бассейна с отражающими границами.

Технология измерений на шумовом сигнале

Краеугольным камнем или, как сегодня говорят, «know-how» технологии является получение подробных частотных характеристик по полю методом СКВУ [1]. Обработке СКВУ подвергают комплексную частотную зависимость пары излучатель - приемник, измеренную в реверберационном звуковом поле. Вызванные отражениями осцилляции частотной зависимости «выглаживают» скользящим комплексным взвешенным усреднением и получают частотную зависимость пары в свободном поле. Взвешивающую функцию рассчитывают, исходя из значений временных задержек отражений в точке приема относительно прямого сигнала излучателя, тем самым реализуют характеристику пропускания режектирующего пространственного фильтра, настроенного на подавление отражений в измерительном эксперименте. Настроенный таким образом режектирующий фильтр имеет максимально широкую область полезного пропускания и в несколько раз меньше, чем у прямоугольного (тонально импульсный метод) и других известных окон аподизации, «размытие» искомой характеристики по частоте

[2]. Адаптированность пространственного фильтра к сценарию отражений объясняет высокое (не менее 46 дБ) подавление возмущений, вызванных отражениями, достаточное для точных эталонных измерений.

Традиционные процедуры градуировки по полю предполагают излучение короткого тонального импульса. Для измерений используют начальную, свободную от отражений часть импульса, продолжительность которой в измерительном бассейне типичных размеров не превышает 2-3 мс. Результат измерений тонально импульсным методом – значение на частоте.

В противоположность тонально импульсному методу градуировка с использованием технологии основана на излучении продолжительных (от 1 до 3 секунд, что многократно превышает время реверберации в бассейне) сигналов с распределенной по частоте мощностью. Для измерений используют весь сигнал. Результат – частотная зависимость по свободному полю, измеренная с требуемой подробностью по частоте. Процедура градуировки включает следующие операции [3]:

- измерение временных задержек прихода первых отражений;
- формирование продолжительного сигнала излучения с распределенной по частоте мощностью;
- излучение сигнала и создание в бассейне реверберационного звукового поля;
- измерение тока через излучатель и напряжения на выходе приемника;

- расчет комплексной частотной зависимости передаточного импеданса пары излучатель-приемник в реверберационном поле бассейна;

- обработка частотной зависимости методом СКВУ и получение подробной частотной зависимости передаточного импеданса излучателя и приемника в свободном поле;

- расчет частотной характеристики чувствительности.

Результаты апробации и исследований технологии в реверберационном поле ЛЧМ сигнала достаточно подробно изложены в доступных источниках.

Использование в метрологических целях шумового реверберационного поля, существенно отличающегося по свойствам от реверберационного поля ЛЧМ сигнала, позволяет получать результаты измерений с малым числом общих источников погрешности, избежать промахов при градуировке, повысить достоверность и метрологическую надежность лабораторной модели гидроакустического приемника [4].

При измерениях передаточного импеданса в шумовом реверберационном поле ширину полосы частот сигнала излучения определяют, исходя из временных задержек отраженных сигналов. Измеряют спектр мощности тока через излучатель и взаимный спектр тока и выходного напряжения приемника. Комплексную частотную зависимость передаточного импеданса пары излучатель-приемник в реверберационном поле определяют как

отношение взаимного спектра к спектру мощности [5].

Алгоритм измерений по полю в реверберационном поле шумового сигнала изображен блок-схемой на рис. 1. Числовые реализации белого шума (БШ) генерируют программ-

ными средствами. Верхнюю граничную частоту в спектре шума задает частота дискретизации ЦАП. Белый шум преобразуют в полосовой (ПШ) с равномерным в установленной полосе частот спектром.

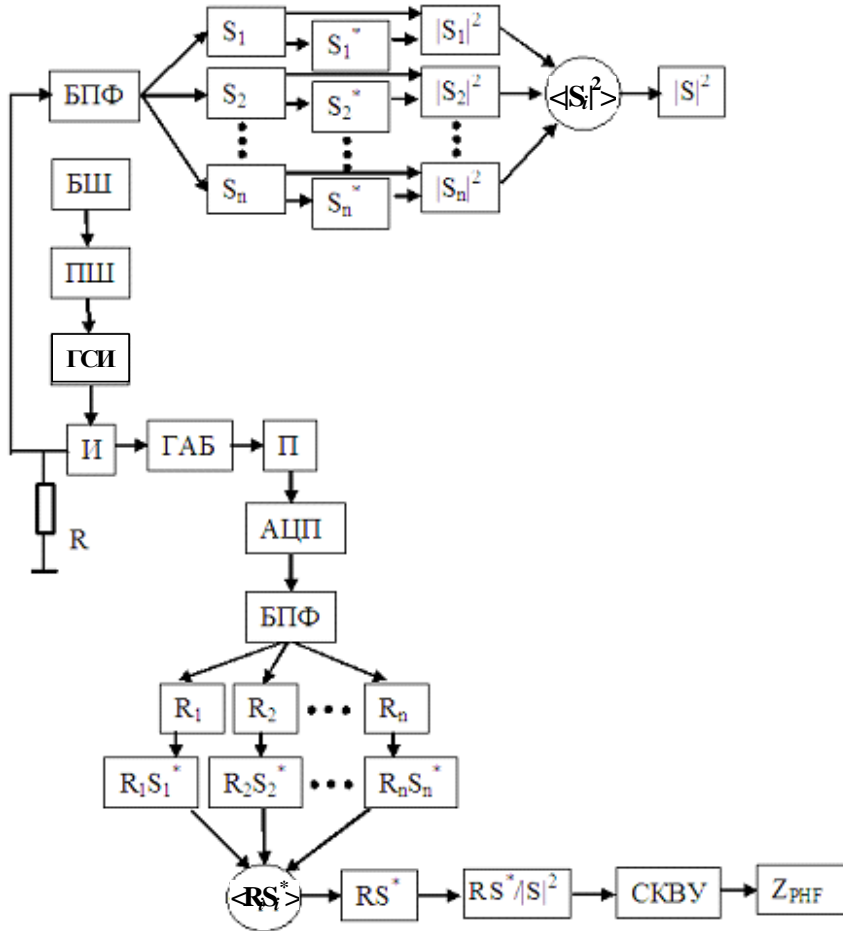


Рис. 1. Блок-схема алгоритма измерения передаточного импеданса излучатель-приемник в реверберационном поле шумового сигнала

На рис. 1 использованы следующие обозначения: ГСИ – генератор сигнала излучения, БПФ – операция быстрого преобразования Фурье;

S_1, S_2, \dots, S_n и $S_1^*, S_2^*, \dots, S_n^*$ – соответственно комплексные и сопряженные им спектры реализаций

сигнала излучения; $\langle \rangle$ – символ, означающий накопление спектра,

$$\text{например, } |S|^2 = \langle |S_i|^2 \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |S_i|^2;$$

И – излучатель; П – приемник, R – калиброванный резистор в цепи излучателя; АЦП – аналого-цифровой преобразователь, ГАБ – гидроакустический бассейн; R_1, R_2, \dots, R_n – комплексные спектры сигнала на выходе приёмника; RS^* – взаимный спектр, $RS^*/|S|^2$ – передаточный импеданс пары излучатель–приемник в реверберационном поле; СКВУ – операция скользящего комплексного взвешенного усреднения; Z_{PHF} – оценка передаточного импеданса пары излучатель–приемник в свободном поле.

Реализации ПШ через генератор ГСИ (ГСИ на схеме выполняет функции ЦАП и усилителя мощности) подают на излучатель, разделяя излучение реверберационными паузами. Таким образом, в измерительном бассейне создают реверберационное звуковое поле. Ток через излучатель получают, регистрируя напряжение на калиброванном резисторе R в цепи излучателя. Применяя операцию БПФ, для каждого сигнала излучения вычисляют комплексный S_i и комплексно сопряженный ему S_i^* спектры тока. Полученные спектры сохраняют с тем, чтобы впоследствии осуществить операции накопления спектра мощности $|S|^2$ и взаимного спектра RS^* . Число n реализаций сигнала излучения выбирают таким, чтобы сред-

неквадратичные отклонения функции частоты $\langle S_i^2 \rangle$ не превышали заданного порога.

Задерживая прием на время распространения волны от излучателя к приемнику, регистрируют предварительно усиленное (не показано на рис. 1) напряжение на выходе гидрофона П. Напряжение преобразуют в цифровую форму и передают в память компьютера (не показан на рис. 1), где вычисляют комплексные спектры R_1, R_2, \dots, R_n сигналов на приеме и взаимные спектры $R_1 S_1^*, R_2 S_2^*, \dots, R_n S_n^*$ сигналов приема и излучения. Накапливают взаимный спектр RS^* и вычисляют комплексную частотную зависимость передаточного импеданса пары излучатель–приемник в реверберационном поле $RS^*/|S|^2$, которую подвергают обработке СКВУ.

Математическая обработка

Из общей теории линейных систем следует, что комплексный спектр S_i входного сигнала излучателя и комплексный спектр R_i выходного сигнала приёмника связаны соотношением $R_i = Z_{\text{PH}} S_i, i = 1 \dots n$, где $Z_{\text{PH}} = Z_{\text{PH}}(f)$ – комплексный передаточный импеданс пары излучатель – приемник, который является функцией частоты. Для выделения Z_{PH} необходимо отфакторизовать выходной спектр R_i по спектру входного сигнала S_i , образовав так называемый взаимный спектр. $R_i S_i^* = Z_{\text{PH}} |S_i|^2$ Полученные взаим-

ные спектры комплексно усредняют по всем n реализациям, и, основываясь на тождестве $\langle R_i S_i^* \rangle = \langle Z_{PH} |S_i|^2 \rangle$, в качестве искомой оценки передаточного импеданса пары излучатель–приемник в реверберационном поле принимают

$$\text{величину } Z_{PH} = \frac{RS^*}{|S|^2}.$$

Величина Z_{PH} является комплексной, следовательно, содержит информацию не только об амплитудно-частотной, но и о фазочастотной характеристике пары излучатель–приёмник. Передаточный импеданс в свободном поле Z_{PHF} получают обработкой СКВУ частотной зависимости Z_{PH} [1].

Технология предусматривает применение апостериорного либо априорного редактирования экспериментальной частотной зависимости, которые выполняют на основе информации о частотных свойствах излучателя и приемника, трактов излучения и приема эталонной установки для уменьшения погрешности градуировки по полю [6, 7].

Программно-аппаратная реализация технологии

В отличие от обычных процедур подготовки к градуировке гидроакустического приемника технология предполагает измерение частотных характеристик тракта излучения и тракта приема эталонной установки, используемых в качестве априорной информации для построения редактирующих функций,

а также точное определение положений акустических центров излучателя и приемника. В зависимости от условий эксперимента положение акустического центра определяют либо акустическим способом с учетом поправок на размеры активных элементов излучателя и приемника [1], либо точно позиционируют геометрические центры преобразователей по лучу лазера [8], либо определяют смещение акустического центра преобразователя относительно опорной точки [9].

Технология позволяет измерять чувствительность гидроакустического приемника к скалярной (звуковое давление) и векторным (колебательная скорость, градиент давления) величинам акустического поля абсолютным методом с использованием обратимого приемника звукового давления [3, 10-12], и относительным методом с использованием опорного гидрофона [12, 13]. Векторные приемники градуируют, основываясь на устанавливаемой теоретически и подтверждаемой экспериментально связи между звуковым давлением и измеряемой приемником векторной величиной гидроакустического поля, реализуемого в эксперименте.

Точность фазовых характеристик, получаемых при градуировке гидрофона, обеспечивают, выполняя измерения методом неподвижной опорной точки и позиционируя опорную точку по лучу лазера [8, 14]. Для технологии во ВНИИФ-ТРИ разработан и запатентован оригинальный способ определения фа-

зового угла чувствительности гидрофона методом взаимности [15]. Способ предполагает размещение излучателя, обратимого преобразователя и гидрофона по схеме Люкера-Ван Бюрена, определение изменения фазового набега сигнала обратимого преобразователя при повороте преобразователя из исходного положения на 180° , использовании фазового набега для расчета фазового угла чувствительности. В погрешность полученного значения фазового угла не входит составляющая, обусловленная несовпадением геометрического и акустического центров, при этом обеспечиваются значительно меньшие в сравнении с методом неподвижной опорной точки разброс результатов, и зависимость разброса от частоты измерений [8].

Технология реализована в виде программно-аппаратного комплекса, аппаратная часть которого в частотном диапазоне 250 Гц – 250 кГц включает в себя измерительные приборы, электронные узлы и систему подводного позиционирования эталонной установки Э-4, в частотном диапазоне 200 – 500 кГц – уста-

новки Э-5 ГЭТ 55-2011.

Аппаратную часть комплекса на частоты 250 Гц – 250 кГц составляют:

- измерительные приборы (усилитель мощности Tabor 9400, предварительный усилитель SR 560);

- электронные блоки приемного и излучающего трактов установки Э-4 (устройство коммутационное УК, устройство входное УВ);

- автоматизированная система позиционирования преобразователей под водой;

- излучатели и приемники ГИ-32 Э, ГИ-33 Э, ГИ-34 Э, приемник КГП10;

- рабочее место оператора в виде компьютеризированной управляющей системы установки Э-4, оснащенной виртуальными генератором и осциллографом, реализованными на базе АЦП/ЦАП 14/2 фирмы ZetLab (частота преобразования 4-10 МГц, передача данных по шине PCI, 14-ти разрядный АЦП, 16-ти разрядный ЦАП). Вид рабочего места оператора и системы позиционирования преобразователей представлен на рис. 2.

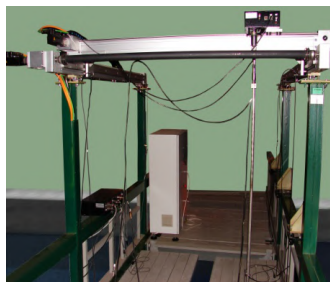


Рис. 2. Установки на частоты 250 Гц – 250 кГц: рабочее место оператора и автоматизированная система позиционирования преобразователей под водой

В аппаратную часть установки на частоты 200 – 500 кГц входят:

- измерительные приборы (генератор сигналов Tektronix AFG 3022B, усилитель мощности Tabor 9400, цифровой осциллограф LeCroy WR 44Xi-A);
- электронные блоки приемного и излучающего трактов установки Э-5 (устройство коммутационное УК, устройство входное УВ);
- автоматизированная координатная система установки Э-5 для поста-



Рис. 3. Установка на частоты 200 – 500 кГц: рабочее место оператора и приборная стойка на фоне малого бассейна

Программные средства комплекса разработаны на языке программирования Visual Basic.Net в среде Visual Studio и реализуют:

- функции генерации тонально импульсного, шумового и ЛЧМ сигналов (в том числе квадратурно дополненных);
- функции удалённого управления измерительными приборами, электронными блоками и системами позиционирования преобразователей;
- алгоритмы измерений частотных зависимостей и характеристик

новки и перемещений преобразователей под водой;

- система лазерного позиционирования излучателя и приемника;
- излучатель ГСФ0,5 и приемник ТС4034, специальный приемник Б;
- компьютеризированная управляющая система (рабочее место оператора).

Внешний вид установки на частоты 200 – 500 кГц приведен на рис. 3.



направленности пары излучатель - приемник в реверберационных полях тонально импульсного, ЛЧМ и шумового сигналов;

- процедуру обработки методом СКВУ;
- функции хранения и графического отображения экспериментальных данных и результатов, а также их документирование.

Программные средства управления построены по принципу доступных для пополнения библиотек функций, включающих в себя биб-

лиотеки функций управления:

- режимами работы измерительных приборов;
- параметрами режимов работы устройств ЦАП и АЦП;
- механизмами линейных и угловых перемещений систем позиционирования.

Программные средства управления параметрами процедуры измерений и обработки данных построены по модульному принципу в виде графических интерфейсов (окон операционной системы Windows). В качестве примера на рис. 4 представлено диалоговое окно графического интерфейса для управления параметрами измерения частотных зависимостей в реверберационных полях ЛЧМ и шумового сигналов. Кривыми зеленого и желтого цвета на экранах А и В графического интерфейса изображены соответственно:

- частотные зависимости передаточного импеданса пары излучатель-приемник по полю и в реверберационном поле шумового сигнала (экран А);
- частотные зависимости передаточного импеданса пары излучатель-приемник по полю и в реверберационном поле ЛЧМ сигнала (экран В). На экране С изображена осциллограмма напряжения на выходе гидрофона при шумовом сигнале излучения.

Диалоговое окно позволяет оператору:

- пользуясь панелью «Параметры белого шума», вводить параметры шумового сигнала излучения;

Альманах современной метрологии, 2015, №2

- по нажатию командной кнопки «Задержки» определять задержки прямого и отражённого сигналов.

По команде «Задержки» автоматически излучается одиночный тональный импульс с частотой, установленной в текстовом окне « f кон, кГц» панели «Параметры белого шума». Последовательность принятых гидрофоном прямого и отраженных тональных импульсов отображается на экране С графической панели. На рис. 5 представлен пример такой последовательности импульсов. Значения временной задержки определяют, перемещая курсор красного цвета в начало соответствующего импульса и устанавливают в соответствующем текстовом окне на панели «Сигнал гидрофона» двойным щелчком по окну левой кнопкой мыши.

Кнопками выбора устанавливают цикл измерений: частотная зависимость тока через излучатель (кнопка «Ток через ОП»), частотная зависимость выходного напряжения приёмника (кнопка «ОП → ГГ»). Активное состояние кнопки «ЛЧМ» означает, что в дополнение к шумовому сигналу искомая частотная характеристика автоматически будет измеряться на ЛЧМ сигнале. Процедуру измерений запускают командной кнопкой «Пуск».

На графических панелях А и В зависимости отображаются в частотном диапазоне, соответствующем числовым значениям в текстовых окнах панели «Параметры белого шума». Частотные зависимости, измеренные в реверберационном поле

ЛЧМ сигнала, отображаются на графической панели В в активном состоянии кнопки выбора «ЛЧМ».

Графические изображения обновляются после выполнения очередной операции усреднения спектра.

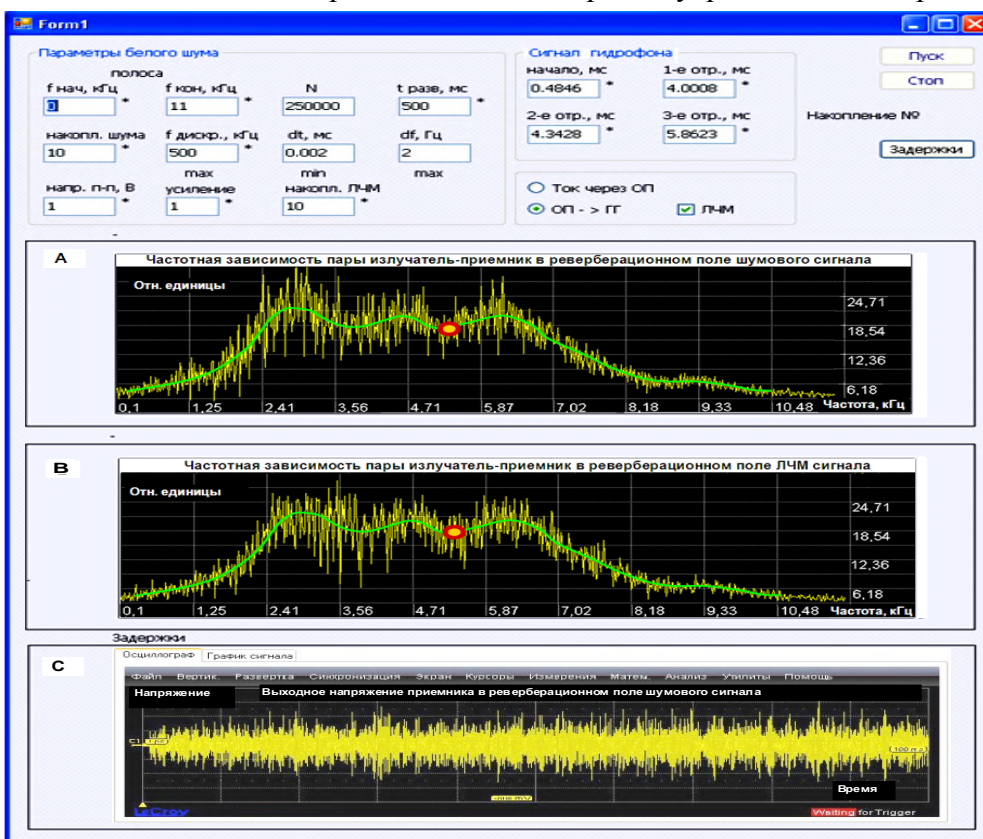


Рис. 4. Диалоговое окно графического интерфейса для управления параметрами измерений частотных зависимостей

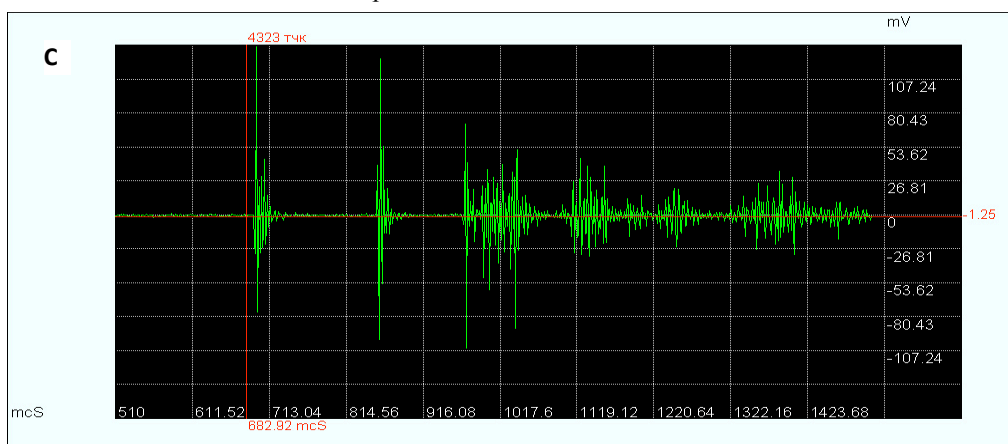


Рис. 5. Сигнал на графической панели для определения временных задержек отражений

Отработка технологии в шумовых реверберационных полях

Для оценки возможностей технологии и отладки ее программной реализации были выполнены:

- исследования звукового поля при излучении в бассейне продолжительных сигналов белого шума;
- измерения характеристик направленности гидроакустических приемников по полю тонально импульсным методом;
- измерения характеристик направленности по свободному полю и чувствительности приемников по свободному и диффузному полю в реверберационном поле шумового сигнала.

Излучатели и приемники

Для исследований распределения звукового давления в большом бассейне ГЭТ 55-2011 на частотах от 10 до 100 кГц были отобраны типовые гидрофоны ГИ-32 Э, ГИ-33 Э, ГИ-34 Э со сферическими активными элементами диаметром 10, 20 и 40 мм (см. рис. 6).

Чувствительность гидрофонов ГИ-32 Э, ГИ-33 Э, ГИ-34 Э в рабочем частотном диапазоне слабо зависит от частоты, характеристики направленности практически круговые. При выборе гидрофонов особое внимание уделяли временной стабильности. Для этого характеристики направленности и частотные характеристики на 1/3 октавных частотах измеряли на протяжении трех месяцев (в начале и конце недели). Временную стабильность оценивали по максимальному разбросу характеристик, который рассчитывали по

СКЗ значений, измеренных для каждой частоты, и сравнивали с неопределенностью типа А градуировки гидрофонов на установках ГЭТ 55-2011. Полученные в эксперименте разбросы не превосходили типичных значений неопределенности, на основании чего временная стабильность была признана удовлетворительной.

Отличительной особенностью шумового реверберационного звукового поля в бассейне является его структурирование на области свободного (прямая волна излучателя доминирует) и диффузного поля (преимущественное направление падения звуковой волны отсутствует), разделенных зоной перехода [16]. При исследованиях шумового реверберационного поля в бассейнах ГЭТ 55-2011 было важно оценить степень близости поля к свободному или диффузному, поскольку эта близость может влиять на качество измерений по полю.

Близость реверберационного поля к диффузному, как, впрочем, и качество измерений по полю, удобно оценивать, используя приемник с существенно неравномерной характеристикой направленности. В диффузном поле отсутствует понятие направленности приемника. Следовательно, какими бы глубокими и узкими провалами ни была изрезана характеристика направленности приемника по полю, на характеристике, измеренной в идеальном диффузном поле, провалы должны отсутствовать, а сама характеристика должна иметь вид окружности.

Если характеристика, полученная прямыми измерениями в шумовом реверберационном поле, заметно отличается от окружности, то звуковое поле существенно не диффузное. Изменение характера изрезанности и уменьшение глубины провалов характеристики направленности дают возможность проконтролировать и оценить количественно диффузность

звукового поля. И наоборот, близость формы характеристики направленности приемника в свободном поле и измеренной по полю в шумовом реверберационном поле на участках существенной неравномерности и провалов позволяет судить о качестве реализации условий свободного поля при измерениях в реверберационном поле.



Рис. 6. Гидрофоны ГИ-32 Э, ГИ-33 Э, ГИ-34 Э и кабели к ним (а)

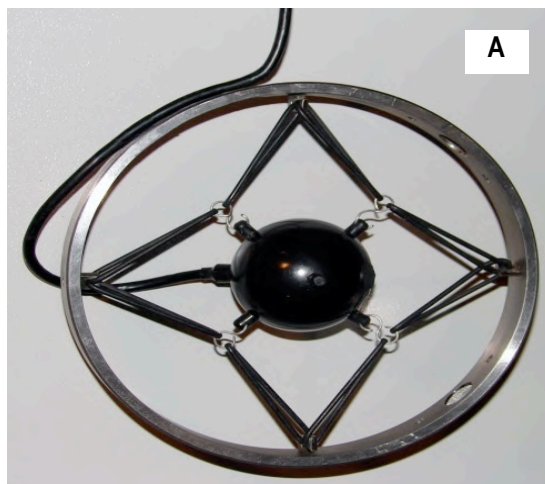


Рис. 7

Для оценки качества измерений по полю в реверберационном поле шумового сигнала, а также диффузности поля в большом и малом бассейнах ГЭТ были подобраны два специальных приемника с выраженными направленными свойствами. На рис. 7 и 8 изображены при-

емник А для измерений в большом бассейне ГЭТ 55-2011 и его характеристики направленности, измеренные на частотах 25 и 30 кГц в свободном поле на расстоянии 0,7 м от излучателя и в области диффузного поля.

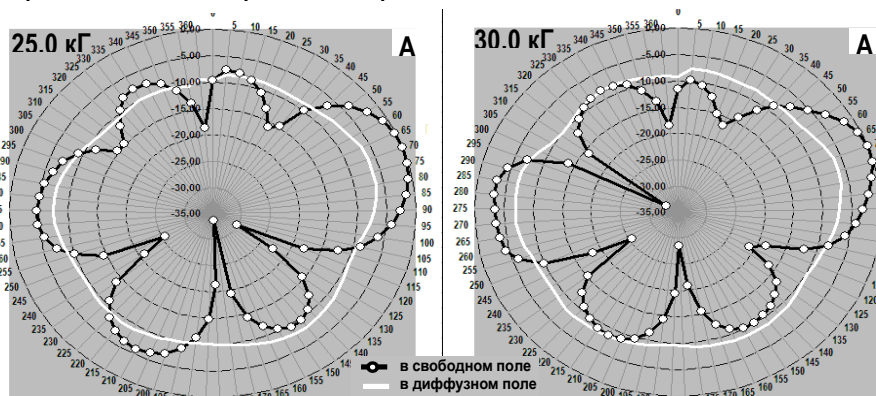


Рис. 8. Характеристики направленности приемника А, измеренные в свободном и в области диффузного поля

Характеристики в свободном поле изрезаны многочисленными узкими провалами глубиной до 35-40 дБ. Использование приемника с такими характеристиками направленности ужесточает условия испытаний технологии, позволяет наглядно продемонстрировать диффузность звукового поля, и одновремен-

но - возможности технологии при измерениях по полю.

При исследовании звукового поля на частотах 200 - 500 кГц в малом бассейне использовали гидрофоны ГСФ0,5 и ТС 4034 из состава ГЭТ 55-2011. Внешний вид гидрофонов приведен на рис. 9.

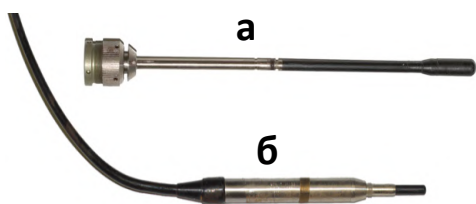


Рис. 9.

Гидрофоны ГСФ0,5 (а) и ТС 4034 (б) из состава ГЭТ 55-2011



Рис. 10.

Высокочастотный гидрофон на основе тонкого пьезоэлектрического диска диаметром 10 мм

На рис. 10 изображен приемник Б - высокочастотный гидрофон на основе тонкого пьезоэлектрического диска диаметром 10 мм, который был изготовлен во ВНИИФТРИ специально для испытаний технологии в малом бассейне ГЭТ 55-2011 на частотах выше 200 кГц.

На рис. 11 изображена подробная (с шагом 2 кГц) частотная характеристика приемника Б. Явно выра-

женные особенности частотной характеристики - подъемы на частотах 210 и 320 кГц и провал на частоте 270 кГц. Такие особенности принято связывать с частотами, на которых свойства направленности приемника проявляются в наибольшей степени. На рис. 12 представлены характеристики направленности приемника Б на этих частотах.

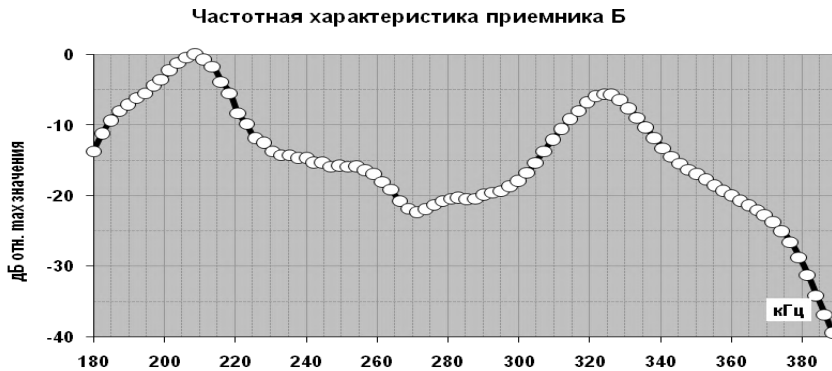


Рис. 11.

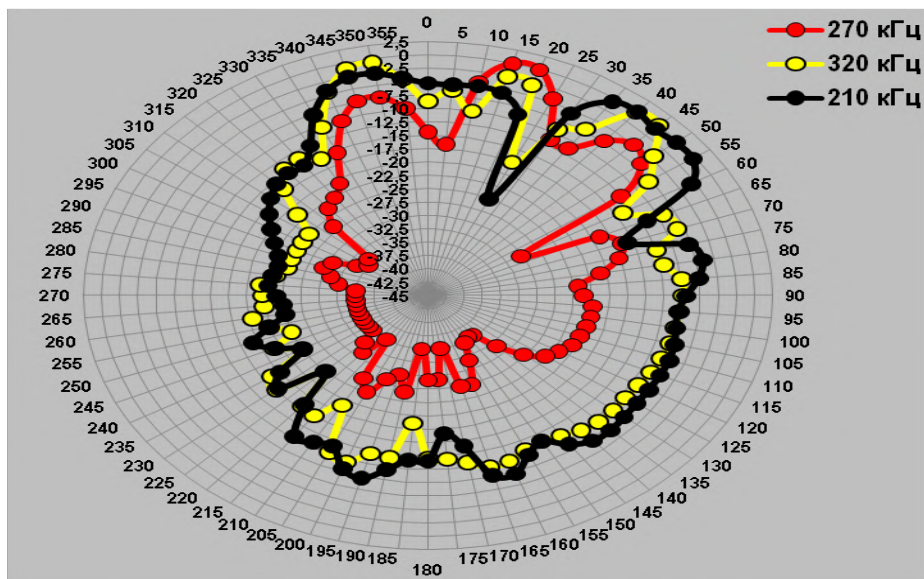


Рис. 12. Характеристики направленности приемника Б в свободном поле

Для диаграмм на рис. 12, так же, как и на рис. 8, характерны большая неравномерность и резкие узкие провалы, глубиной до 35 – 40 дБ. Такое поведение характеристик приемника также было расценено удобным как для визуального контроля и количественной оценки диффузности звукового поля, так и для оценки качества измерений по полю.

Реверберационное поле шумового сигнала в бассейнах ГЭТ55-2011

Перед испытаниями технологии выполнили исследования шумовых реверберационных полей в большом и малом бассейнах ГЭТ 55-2011. Не ставя себе целью в точности повторить исследования Д.З. Лопашева 1961-62 гг., придерживались тех же геометрических параметров эксперимента, чтобы иметь возможность сопоставить результаты с полученными более 50 лет назад на примитивной по нынешним понятиям технике, в отсутствие компьютеров, стандартных программ математической обработки и т.п. Причиной такого повторения отчасти стало желание сравнить квалификацию и профессионализм свои и специалистов тех лет. Размеры малого бассейна ГЭТ 55-2011 позволяют рассматривать его как масштабную 6:1 копию большого бассейна. При измерениях в малом бассейне геометрические параметры эксперимента выдерживали в пропорции 6:1.

На рис. 13 для частот 10, 20, 30, 40, 50, 60 и 80 кГц представлены

зависимости уровней звукового давления в полосе 3 кГц от расстояния между излучателем и приемником в шумовом реверберационном поле большого бассейна ГЭТ 55-2011. Разными цветами, аналогично тому, как это сделано в [4], на рис. 13 выделены области, которые в [16] названы областями свободного поля, диффузного поля и переходной зоной.

Наклонными штриховыми прямыми на рис. 13 показано поведение уровня звукового давления в идеальном свободном поле сферической волны, горизонтальными – уровень звукового давления в идеальном диффузном поле. Положение штриховых прямых соответствует прямым наилучшего (в смысле метода наименьших квадратов) приближения экспериментальных зависимостей. По отклонению экспериментальных зависимостей от прямых оценивали близость реверберационного поля к свободному и диффузному.

Оказалось, что выводы, сделанные более 50 лет назад, сохраняют свою актуальность и в настоящее время. Сопоставимость полученных результатов с результатами Д.З. Лопашева впечатляет. Приведенные в [16] значения отклонений экспериментальных зависимостей от опорных на $\pm (1 - 1,3)$ дБ, как в области свободного, так и в области диффузного поля, протяженность области свободного поля от 30 до 60 см от излучателя, значение граничного радиуса примерно равное 1 м, протяженность области диффузного поля

2 м и ее удаленность от излучателя на 2,5 м можно проверить по поведению экспериментальных кривых на рис. 13 в областях, выделенных соответствующими цветами.

Зависимости уровней звукового давления в полосе 3 кГц от расстояния до излучателя

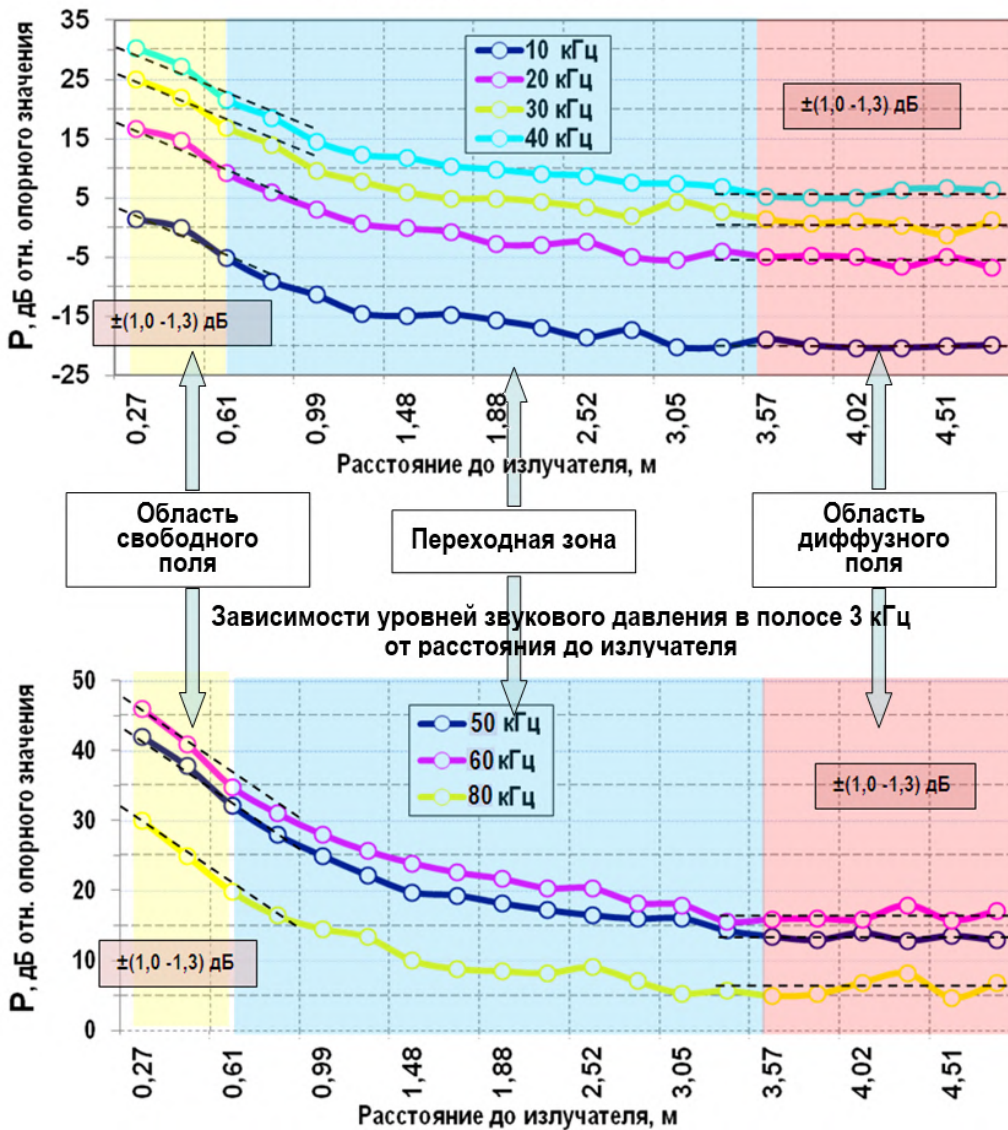


Рис. 13. Звуковое поле шумового сигнала в большом бассейне ГЭТ 55-2011

Большой энциклопедический словарь трактует приставку «квази...» (от лат. *quasi* якобы, как будто), как означающую: мнимый, ненастоящий (напр., квазиученый), почти, близко ... Смысловая нагрузка

приставка неоднозначна и несет в себе, в первую очередь, отрицание. Авторы по возможности избегали использовать приставку «квази» применительно к звуковому полю в области диффузного поля. Реверберационному звуковому полю в этой области бассейна ближе по смыслу термин «почти диффузное», в котором «почти» однозначно воспринимается как близость, что исключает двоякое понимание термина.

При оценке близости результатов, полученных в реверберационном звуковом поле с применением новой технологии к результатам измерений в свободном поле в качестве опорных принимали результаты тонально импульсного метода.

Во избежание терминологической путаницы при изложении результатов будем называть:

- характеристиками в свободном поле - результаты измерений тонально импульсным методом;
- характеристиками в диффузном поле - результаты прямых измерений в области диффузного поля;
- характеристиками по полю - результаты измерений в области диффузного поля с использованием новой технологии;
- чувствительностью по диффузному полю - чувствительность, полученную расчетным методом по результатам измерений с использованием новой технологии.

На рис. 8 кривыми белого цвета изображены характеристики направленности в диффузном поле, которые намного равномернее ха-

рактеристик в свободном поле: глубокие узкие провалы отсутствуют, а неравномерность не превышает 4-5 дБ.

Сравнив неравномерность характеристик направленности в диффузном поле и отклонения уровней звукового давления в области диффузного поля от горизонтальной прямой с погрешностью градуировок рабочих гидрофонов, можно считать звуковое поле в этой области бассейна хорошим приближением диффузного поля.

Диффузное и свободное поле – понятия в определенном смысле противоречащие и взаимно исключают друг друга. Свободное поле подразумевает абсолютно детерминированный случай распространения бегущей волны в отсутствие влияния каких-либо преград. Диффузное - характеризует абсолютный хаос, когда отсутствуют понятия прямой волны излучателя, направления приема (направленности приемника), зависимости акустических параметров поля от пространственной координаты. Другими словами, в диффузном поле нет места для свободного поля. Диффузное поле создают, излучая шумовой сигнал, тем самым достигают максимальной плотности звуковых мод и случайности фаз звуковых волн, максимально приближая звуковое поле к абсолютному хаосу.

Чем ближе характеристики реверберационного поля к характеристикам диффузного поля, тем сложнее задача измерений по полю. И наоборот, близость реверберацион-

ного поля к свободному звуковому полю упрощает задачу точных измерений по полю. При таком поведении звукового поля, когда с увеличением расстояния до излучателя поле все более отличается от свободного, приближаясь к диффузному, задача измерений по полю все более и более усложняется от «наиболее простой» в области свободного поля, до «неразрешимо сложной» в области диффузного поля. Это дает возможность исследовать границы применимости созданной технологии. Уменьшение отношения сигнал/помеха с расстоянием до излучателя дополнительно отягощает условия испытаний, но позволяет оценить помехозащищен-

ность измерений. В силу перечисленных обстоятельств условия для измерений по полю в шумовых реверберационных полях бассейнов ГЭТ 55-2011 были сочтены достаточно жесткими и весьма подходящими для испытаний новой технологии.

Результаты испытаний

Качество условий свободного поля обычно проверяют по экспериментальной зависимости, обратной зависимости звукового давления от расстояния до излучателя. Такие зависимости, полученные на частотах 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100 кГц в большом бассейне ГЭТ 55-2011 с применением новой технологии, приведены на рис. 14.

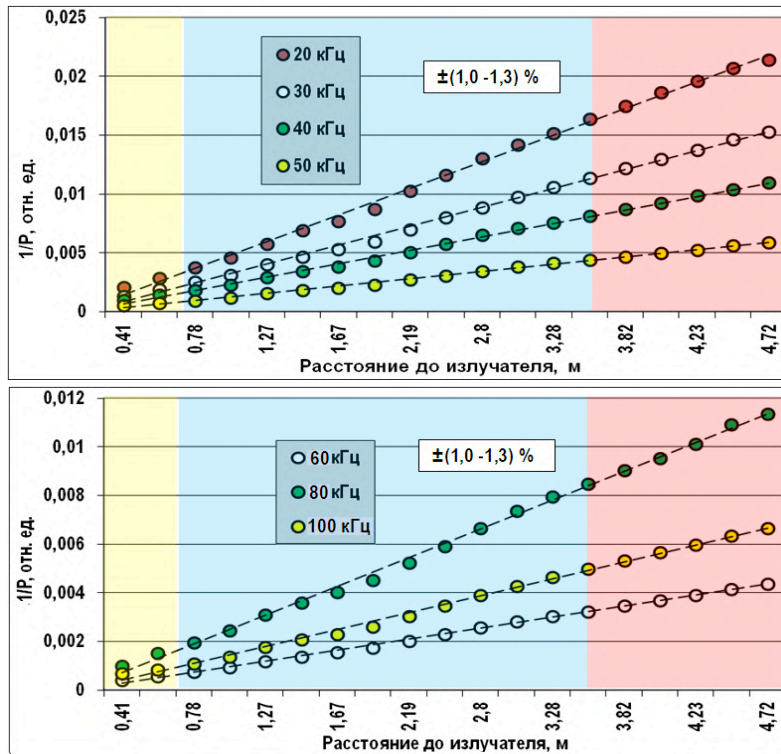


Рис. 14. Экспериментальные зависимости для проверки качества условий реализации свободного поля

Расстояние между излучателем и приемником увеличивали с 0,3 до 5 м с шагом, близким к 0,25 м. Пунктирные прямые на рис. 14 получены как прямые наилучшего (в смысле наименьших квадратов) приближения экспериментальных зависимостей и показывают поведение зависимостей в идеальном свободном поле сферической звуковой волны. Отклонения экспериментальных данных от прямых наилучшего приближения не превосходят 1,3%,

безотносительно того, в какой области бассейна (почти свободного, почти диффузного или переходной зоне) находился приемник и на какой частоте выполняли измерения.

На рис. 15 изображена приведенная к расстоянию 1 м частотная зависимость пары излучатель-приемник в свободном поле, измеренная тонально импульсным методом при расстоянии 0,5 м между излучателем и приемником.

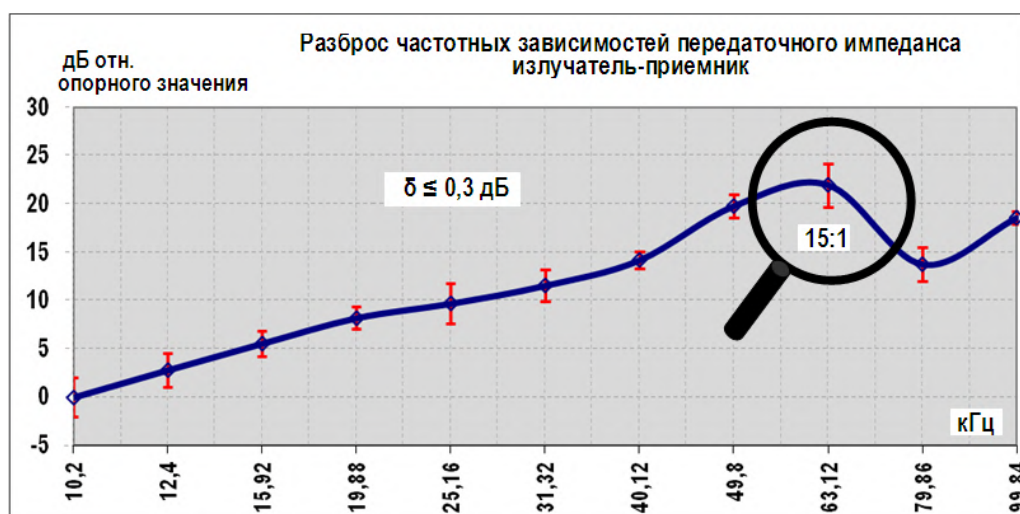


Рис. 15.

Для тех же излучателя и приемника в шумовом реверберационном поле при изменении расстояния между излучателем и приемником от 0,3 до 5 м с использованием новой технологии были измерены 19 частотных зависимостей по полю. Результаты также привели к расстоянию 1 м. Используя зависимость, полученную тонально импульсным методом, в качестве опорной, рассчитали среднеквадратические от-

клонения (СКО) зависимостей по полю от опорной. Полученные значения СКО показаны на рис. 15 планками погрешностей в увеличенном масштабе 15:1. Для всех частот СКО не превышают 0,3 дБ, хотя и включают результаты на предельных расстояниях между излучателем и приемником. Различия СКО, полученных в экспериментах на разных частотах и расстояниях, оказались незначительными и не показали зави-

симость СКО от частоты, либо от близости реверберационного поля к диффузному.

На рис. 16 приведены фазочастотные характеристики пары излучатель-приемник, измеренные в частотном интервале 32 - 63 кГц то-

нально импульсным методом при расстоянии 0,5 м между излучателем и приемником, и в области диффузного поля (на расстоянии 4 м от излучателя) с использованием технологии.

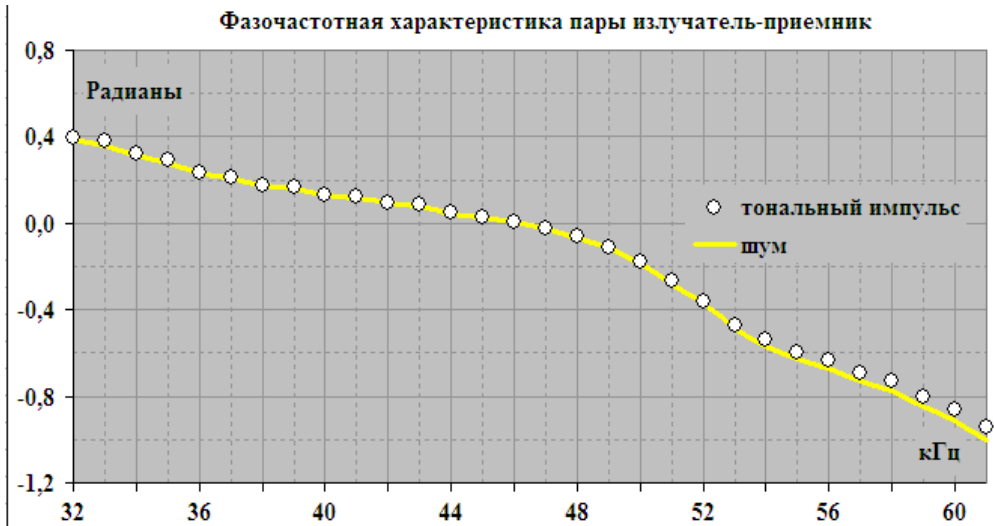


Рис. 16

Различия в значениях фазового угла, полученных разными методами в свободном и почти диффузном звуковых полях, увеличиваются с частотой, но не превышают 0,1 радиана, что соответствует точности современных эталонов для фазовой градуировки гидрофонов [8, 14].

В экспериментах с измерением характеристик направленности в большом бассейне использовали приемник А, который устанавливали в области диффузного поля на расстоянии 4,7 м от излучателя и ориентировали опорным направлением на излучатель. С помощью технологии измеряли частотные зависимости пары излучатель-приемник по

полю при изменении угла падения прямой волны излучателя на приемник. По полученным частотным зависимостям строили характеристики направленности на частоте и в частотных полосах. На рис. 17 показаны характеристики направленности приемника:

диаграмма 1 - на частотах 25 и 30 кГц в свободном поле (тонально импульсный метод);

диаграмма 2 - полученная прямыми измерениями в частотной полосе 3 кГц в почти диффузном поле;

диаграмма 3 - измеренная по полю в полосе 3 кГц в почти диффузном поле с использованием технологии;

диаграмма 4 - чувствительность по полученная расчетным методом.
диффузному полю в полосе 3 кГц,

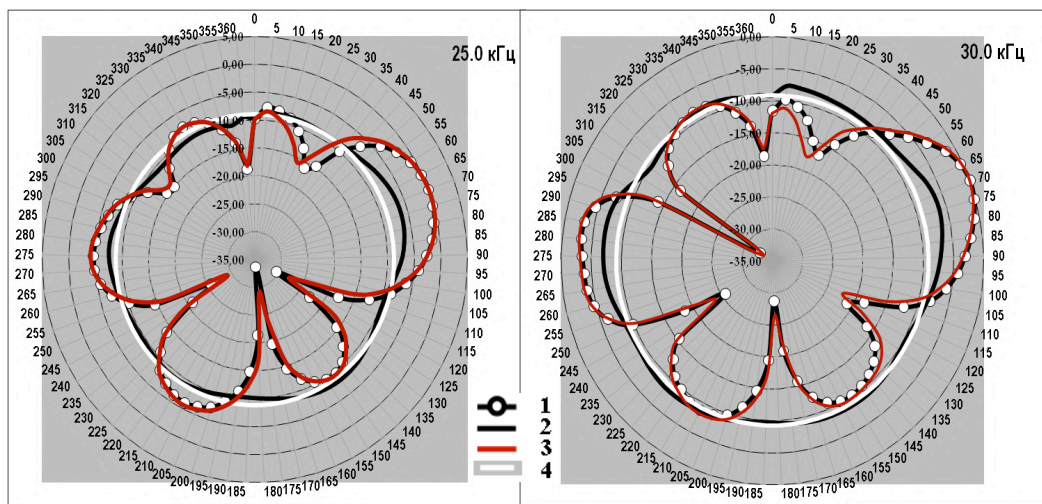


Рис. 17. Характеристики направленности приемника А

Как видно из представленных диаграмм, характеристика направленности по полю, измеренная в диффузной области реверберационного поля на расстоянии 4,7 м от излучателя, практически повторяет характеристику направленности, измеренную тонально импульсным методом при расстоянии 70 см между излучателем и приемником. Исключение составляет угловой интервал от 15 до 45°, где для обеих частот несовпадения характеристик можно расценить как существенные. Для характеристик на частоте 30 кГц заметны также расхождения на углах 115 - 125°. Выявленные расхождения не вызваны нарушением на этих углах условий свободного поля, реализуемых новой технологией. Отличия объясняются различиями влияния на результаты измерений смещения оси вращения приемника, когда расстояния между излучателем и приемни-

ком различаются в семь раз.

Подтверждением сказанному может служить почти полное совпадение диаграмм 1 и 3 на рис. 18 (различия заметны в угловом интервале 150° - 180°). Диаграммами 1 и 3 представлены характеристики направленности приемника Б, измеренные соответственно тонально импульсным методом и в диффузной области реверберационного поля малого бассейна ГЭТ 55-2011.

Такое совпадение характеристик направленности оказалось сюрпризом для самих экспериментаторов и свидетельствует о высокой эффективности разработанной технологии измерений.

Также были проведены эксперименты с целью проверки сопоставимости результатов измерений по полю в реверберационных полях ЛЧМ и шумового сигналов. В начале испытаний прогнозы относительно

успеха экспериментов существенно различались, но по мере устранения

выявившихся недоработок программно-аппаратного комплекса и

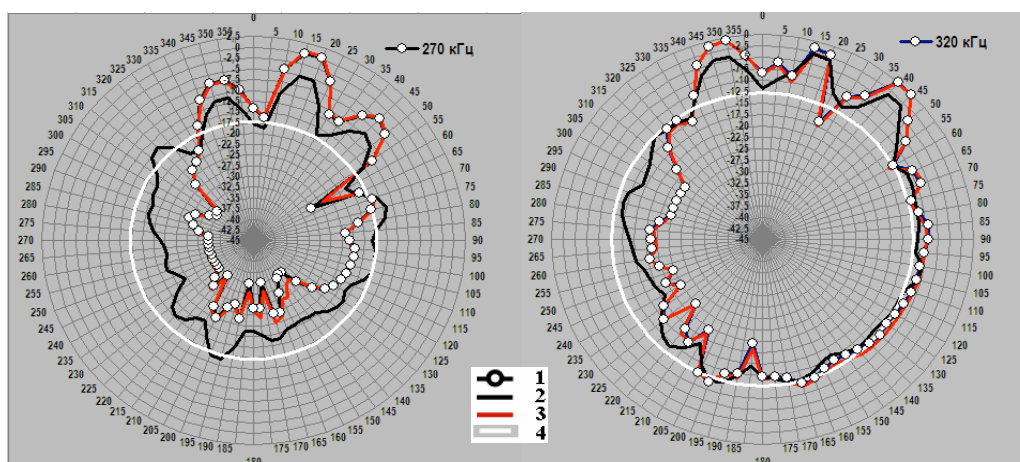


Рис. 18. Характеристики направленности приемника Б: 1- в свободном поле, 2 – прямые измерения в диффузной области реверберационного поля, 3 – измерения по полю в диффузной области реверберационного поля, 4 – чувствительность по диффузному полю

накопления опыта применения технологии несогласованность результатов в 3 % стали расценивать как промах, причину которого устанавливали. Невооруженного взгляда на экраны А и В рис. 4 достаточно, чтобы увидеть заметные различия зависимостей желтого цвета, показывающих результаты измерений передаточного импеданса пары излучатель-приемник в реверберационных полях ЛЧМ и шумового сигнала.

Один из распространенных способов устранить вызванные отражениями возмущения заключается в подборе гладкой кривой, которая повторяла бы основной тренд экспериментальной зависимости. Для этого экспериментальную зависимость аппроксимируют по методу наименьших квадратов с использова-

нием сплайнов [18]. Выполнив такую аппроксимацию желтых кривых на экранах А и В кубическими сплайнами, получили отличия гладких кривых до 3 дБ. Различия частотных зависимостей по полю, полученных методом СКВУ (кривые зеленого цвета на экранах А и В), не превосходят 2 %. Это свидетельствует о преимуществе метода СКВУ при подавлении отражений даже в отсутствие информации о поведении искомой частотной зависимости.

При измерениях в малом бассейне использовали гидрофоны, которые являются приемниками скалярной величины акустического поля - звукового давления. В большом бассейне при измерениях характеристик направленности градуировали приемник градиента звукового дав-

ления КГП10 (векторной величины акустического поля) на частотах, много превосходящих верхнюю граничную частоту приемника 12,5 кГц. На частотах 25 и 30 кГц характеристика направленности КГП10 резко отличается характерной для диполя: ее искажают дополнительные резкие

провалы глубиной 30–35 дБ. Это обстоятельство также было использовано для ужесточения условий испытаний технологии. На рис. 19 приведены характеристики направленности КГП10, измеренные с использованием технологии на частотах рабочего диапазона приемника.

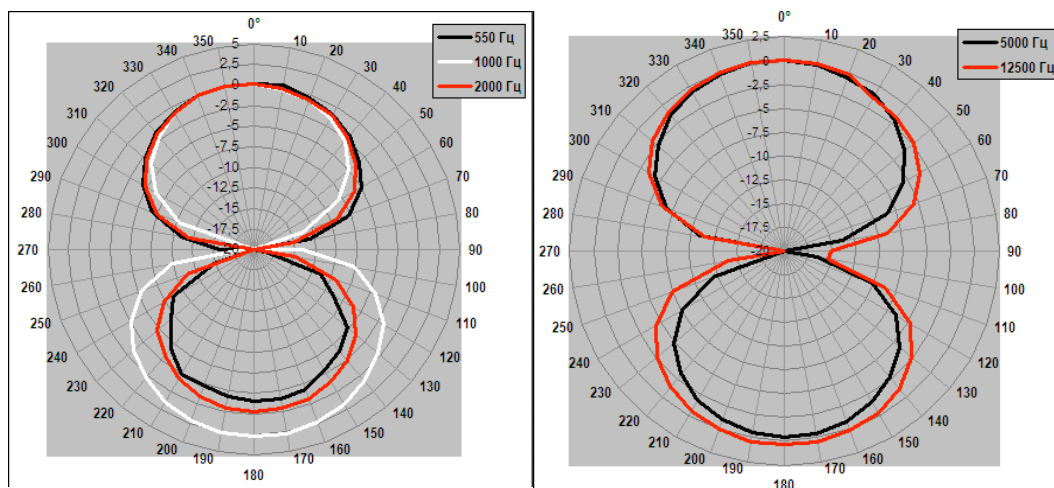


Рис. 19.

Диаграммы на рис. 19 имеют форму, характерную для диполя, что типично для характеристик направленности векторного приемника. До настоящего времени градуировки векторных приемников выполняли в стоячей волне камеры малого объема в частотном диапазоне, ограниченном сверху критической частотой камеры (1 – 2 кГц), поскольку выполнить градуировку векторного приемника по полю не представлялось возможным. Попытки расширить частотный диапазон камеры на более высокие частоты успехом не увенчались. Применение технологии позволяет градуировать векторные приемники по полю в частотном

диапазоне от 500 Гц и выше, оставляя за стоячей волной частоты, на которых погрешности измерений в камере удовлетворительны.

Практические критерии диффузного звукового поля

Переход от метрологии скалярных величин к метрологии векторных величин вызывает необходимость переосмыслить некоторые считавшиеся общепризнанными понятия, в том числе понятие диффузного поля и его критериев. Необходимость этого связано с тем, что авторы вынужденно пользовались термином «почти диффузное поле». Существует множество формулировок, раскрывающих те или иные

стороны понятия диффузного поля. Наиболее изящно определение диффузного поля сформулировано в Р50.2.037-2004 со ссылкой на МЭК 50(801): «Диффузное поле – звуковое поле, в котором **в заданной области** плотность энергии статистически равномерна, а **направления распространения** в каждой точке имеют случайные распределения».

Это определение появилось из статистической теории реверберации, которая налагает на поле требования изотропности и однородности, и имеет очевидные недостатки:

- определение оперирует понятием заданной области, что является явным нарушением однородности, поскольку в определении поля явно выделена область, вне которой требование однородности не соблюдается;

- требуется домыслить, что направление распространения относится не к звуковой волне, а к потоку акустической энергии.

Определение позволяет дать общее физическое представление о процессах формирования звукового поля в помещении и выполнить достаточно простой расчет некоторых его характеристик: время реверберации, общее поглощение, постоянная помещения и т. п. При этом, определение не позволяет учесть распределение в пространстве амплитуд и фаз сигнала, т. к. оперирует среднеэнергетическими значениями характеристик звукового поля. Не опираясь на понятие звуковой волны, статистическая теория реверберации описывает с помощью времени ре-

верберации процесс послезвучания, который по своей физической сути есть процесс затухания звуковых волн в помещении. С другой стороны, представляя реверберацию не как волновой процесс, а как процесс уменьшения энергии во времени, определение способствует однозначному пониманию этого и других терминов на основе понятия диффузного поля.

Другие определения явно опираются на понятие звуковой волны. Так, определение: «Звуковое поле, в котором возникает большое количество отраженных волн с различными направлениями, в результате чего удельная плотность звуковой энергии одинакова по всему полю, называется диффузным полем» объясняет, как создать диффузное поле.

Определение «диффузное поле» – это поле, в котором энергия отраженных звуковых волн преобладает над энергией прямого звука» дает практический критерий проверки качества поля.

Понятие диффузного поля позволяет измерить акустическую мощность источника шума по величине звукового давления в помещении, а также градуировать приемник звукового давления. Вместе с тем изотропность (одно из определяющих свойств диффузного поля) проявляется в инвариантности звукового давления к пространственной координате. При этом остается неясным, как интерпретировать сигнал на выходе приемника градиента давления, помещенного в такое зву-

ковое поле.

Определения диффузного поля, опирающиеся на понятие звуковой волны, недостаточны, поскольку в действительности относятся к реверберационному полю. При большом числе отражений реверберационное поле становится почти диффузным в том смысле, что СКЗ звукового давления во всех точках поля равны, что обеспечивает выполнение свойства однородности (средние по времени значения плотности звуковой энергии во всех точках равны). При этом не следует забывать, что обратное утверждение, вообще говоря, неверно, поскольку не выполняется, например, для поля стоячих звуковых волн. Более того, однородность не означает изотропности - направления прихода потоков энергии в каждой точке поля равновероятны и средние значения энергии по различным направлениям одинаковы. И главное нарушение свойства диффузного поля в реверберационном поле – отсутствие устойчивой интерференционной картины. В реверберационном поле, при любом числе отражений существует устойчивая интерференция, на чем и основана идея метода СКВУ.

Показанная возможность измерять, более того, точно измерять метрологические характеристики векторного приемника по полю в почти диффузном поле выглядит неожиданной даже для специалистов. Результаты измерений в реальных звуковых полях могут разительно отличаться и даже противоречить тому, что можно ожидать исходя из

общепринятых и традиционных представлений. Представленные результаты следует воспринимать как напоминание о том, что на практике измерения выполняют не в идеальных условиях того или иного «определения» (в данном случае определения диффузного поля), а в реальном звуковом поле, которое всегда остается реверберационным. Его отличие от диффузного и позволило выполнять градуировки по полю с точностью первичных эталонов [17].

Понимая, что идеального диффузного поля в природе не существует, приходим к парадоксальному заключению. В одной и той же точке звукового поля в бассейне можно с достаточной степенью точности выполнить измерения чувствительности по диффузному полю и по свободному полю. Иными словами: в одной и той же области бассейна звуковое поле можно рассматривать как почти диффузное либо как свободное. Термин почти диффузное поле соответствует понятиям правильности и прецизионности измерений, в то время как термин квазидиффузное (якобы диффузное) поле подводит к мысли, что измерения прецизионны, но результаты нельзя считать правильными.

Практический вывод. Если на выходе приемника, помещенного в такое звуковое поле, поставить вольтметр СКЗ, получим чувствительность по диффузному полю. Если выходное напряжение обрабатывать методом СКВУ, то получим чувствительность по свободному полю. Зная зависимость чувстви-

тельности по полю от направления падения волны, можно рассчитать чувствительность по диффузному полю значительно точнее, чем это позволяют сделать прямые измерения. Это происходит потому, что из всех свойств диффузного поля определяющим для градуировки приемника является свойство изотропности.

При решении измерительной задачи критерии звукового поля нельзя рассматривать в отрыве от свойств помещенного в поле приемника. В [2] показано, что возможность выполнить градуировку по свободному полю в гидроакустическом бассейне с отражающими границами неразрывно связана с инерционными свойствами приемника, которые следует учитывать, устанавливая критерии свободного поля. Аналогичное справедливо и для диффузного поля.

Сегодня весьма актуальна задача реализации преимуществ в помехозащищенности векторного (направленного) приемника при измерениях в мелком море. Наличие в точке приема отраженных сигналов делает условия измерений в мелком море весьма схожими с условиями в отражающем бассейне. В этой ситуации неизбежно возникнет вопрос: какую чувствительность – по свободному или диффузному полю следует использовать для направленного приемника при расчете звукового давления по выходному напряжению. Основываясь на результатах, полученных при испытаниях технологии измерений, можно попытаться

по результатам экспериментов в лабораторном бассейне построить модель приемника, адекватную измерениям в мелком море.

Временная обеспеченность бассейна

Остается незаслуженно недооцененным такой, присущий градуировке тонально импульсным методом аспект, как большая продолжительность измерительного эксперимента. При этом возможность быстро выполнять измерения при тех же точностях принято относить к разряду второстепенных и несущественных с точки зрения метрологии.

Сегодня в бассейне ГЭТ 55-2011 эксплуатируют пять эталонных установок различного назначения (ГЭТ 55-2011, РЭ УГГ-1 ВЭТ 55-1-96, РЭ МБ2/1, РЭ МБ2/2.). На рис. 20 изображен вид бассейна сверху. Перегруженность бассейна измерительными установками, с одной стороны, исключает возможность монтажа в помещении бассейна новой эталонной техники, затрудняет работы по совершенствованию и расширению возможностей эталонной базы. С другой стороны, штатное функционирование любой из установок вынуждает останавливать работу остальных. Причина даже не в помехе, которую создает другим установкам прямой акустический сигнал (излучение и прием можно синхронизировать), а в реверберации звука в бассейне, которая по продолжительности превосходит полезный сигнал в 50 раз (500 мс против 3 мс).

Большой объем выполняемых в бассейне поверочных работ дополнительно обостряет ситуацию, когда эталонные установки подолгу находятся в режиме ожидания свободного временного окна. Это неэкономично, неэффективно, затягивает и удорожает метрологические работы, создает проблему временной обеспеченности бассейна, если пользоваться термином, характеризующим ограничение времени готовности измерительного полигона в связи с сезонными факторами, непогодой, волнением моря и т.п.

С учетом реверберационных пауз измерения тонально импульс-

ным методом частотных зависимостей и характеристик направленности с мелким шагом по частоте занимают от нескольких суток до недель, тогда как с использованием технологии измерительный эксперимент по получению исчерпывающей лабораторной метрологической модели приемника [4] по продолжительности немногим превосходит традиционные измерения характеристики направленности на частоте.

В 2014 г. начаты проектно-исследовательские работы по созданию нового специального многофункционального метрологического бассейна ФГУП «ВНИИФТРИ», на базе

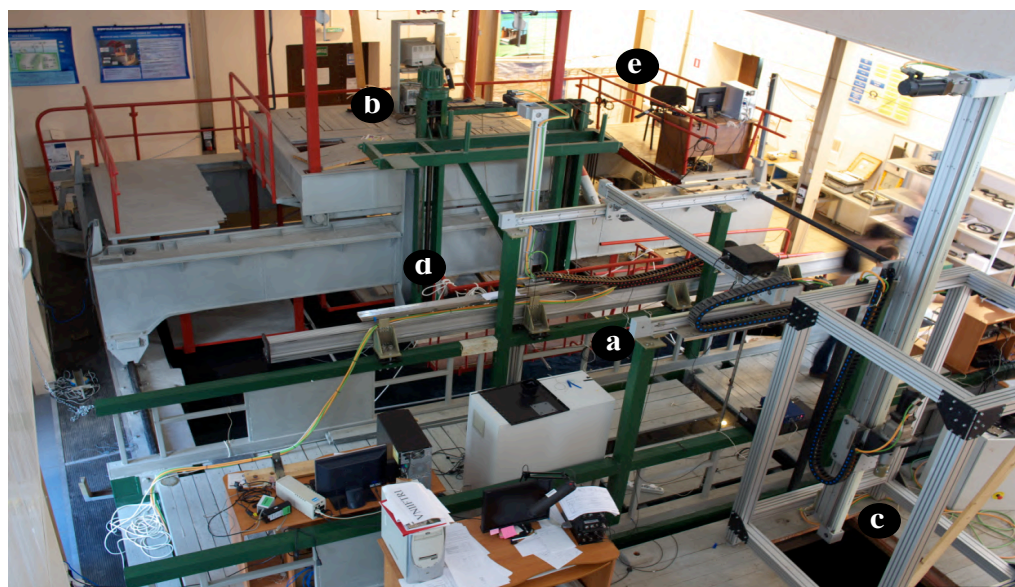


Рис. 20. Гидроакустический бассейн Государственного специального первичного эталона ГЭТ 55-2011: а – эталонная установка ГЭТ 55-2011, б - ВЭТ 55-1-96, с и d – позиционирующие устройства МБ-2, е – рабочий эталон УГГ-1

которого в период до 2020 г. будут реконструированы и технически перевооружены государственные эта-

лоны единиц гидроакустических и гидрофизических величин, а также выполнены мероприятия, направ-

ленные на повышение научно-технического уровня государственных эталонов, расширение возможностей и оптимизацию эталонной базы страны. В создаваемом многофункциональном бассейне планируется разместить и эксплуатировать не менее десяти эталонных установок. Новый бассейн по своим размерам будет значительно превосходить бассейн ГЭТ 55-2011, а значит, время реверберации увеличится. Соответственно время измерения тонально импульсным методом возрастет пропорционально времени реверберации, а производительность бассейна уменьшится. При этом проблема «акустической» совместимости только обострится, что самым отрицательным образом скажется на функционировании нового метрологического центра.

Чтобы хоть частично ослабить последствия этой проблемы предусматривалось оборудовать новый бассейн звукоизолирующей шторой, которая бы позволяла делить бассейн на зоны с тем, чтобы звуковое поле, создаваемое в одной зоне, не создавало акустических помех для другой. Обстоятельства складываются так, что ряд причин (высокая стоимость, отсутствие у изготовителя опыта создания такой шторы и т.п.) могут вынудить отказаться от использования звукоизолирующей шторы. Тогда проблема совместимости эталонов, а соответственно временной обеспеченности многофункционального бассейна встанет в полный рост.

Мало замеченный аспект про-

блемы – большая продолжительность измерений на тональных импульсах не только усугубит проблему временной обеспеченности многофункционального бассейна, но имеет отрицательные последствия в метрологическом смысле. Продолжительный измерительный эксперимент нарушает один из основных принципов в метрологии – единство условий измерений, что неизбежно влечет за собой увеличение погрешности, поскольку возникают дополнительные источники, связанные с изменением климатических условий и помеховой обстановки, временной нестабильностью, случайными внешними факторами и т.п.

Заключение

Созданная технология существенно изменяет общепринятые представления о возможностях метрологических работ в лабораторном гидроакустическом бассейне, позволяет многократно повысить информативность измерительного эксперимента (в сравнении с измерениями на тональных импульсах), получать исчерпывающую модель акустического приемника, по результатам градуировки решать не только задачу верификации, но и задачу валидации приемника.

Технология измерений в шумовых реверберационных полях:

- демонстрирует высокие, на уровне первичных эталонов, показатели качества измерений по свободному полю на частотах от 500 Гц до 500 кГц вне зависимости от близости реализуемого в эксперименте реверберационного поля к диффуз-

ному полю;

- позволяет выполнять быстрые измерения по полю в широком диапазоне частот с эталонной точностью и требуемой подробностью по частоте (до практически непрерывных), получать характеристики направленности, амплитудно и фазочастотные характеристики чувствительности акустических приемников, то есть, в отсутствие безэхового гидроакустического бассейна выполнять измерения как в безэховой камере;

- позволяет существенно расширить частотный диапазон градуировки по полю в гидроакустическом бассейне в сторону низких частот, определять метрологические характеристики приемника по диффузному полю и в полосах частот.

Технология позволяет одинаково эффективно выполнять исследования как приемников скалярной величины - звукового давления, так и приемников векторных величин акустического поля (градиент звукового давления, колебательная скорость и т.п.).

Сегодня авторы не могут предоставить достаточных данных, что-бы продемонстрировать возможности и ограничения применения технологии для метрологических целей в воздушной акустике. Тем не менее, можно ожидать, что для широкого круга рутинных градуировок технология поможет ослабить требования к безэховой и реверберационной камерам, значительно упростить и удешевить стоимость метрологических работ.

Альманах современной метрологии, 2015, №2

Литература

1. Исаев А.Е. Точная градуировка приемников звукового давления в водной среде в условиях свободного поля. Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2008, 369 с.

2. Исаев А. Е. Критерий качества реализации условий свободного поля при градуировке гидроакустического приемника в бассейне с отражающими границами// Измерительная техника, 2014, № 5, с. 48-53.

3. Исаев А. Е., Матвеев А. Н., Сильвестров С. В. Патент № 2390968, Российская Федерация, С2. Кл. H04R 29/00. Способ градуировки гидрофона по полю при излучении непрерывного сигнала в измерительном бассейне с отражениями/ Опубликовано 27.05.2010, БИ № 15.

4. Исаев А.Е., Поликарпов А.М., Черников И.В. Акустические сигналы и поля для метрологических работ в лабораторном гидроакустическом бассейне. Статья в настоящем номере, с.76-102.

5. Исаев А.Е. Способ измерения комплексной частотной зависимости передаточного импеданса пары излучатель-приемник в свободном поле. Заявка на изобретение № 2014133504, приоритет от 15.08.2014.

6. Исаев А.Е., Матвеев А.Н., Некрич Г.С. Поликарпов А.М. Градуировка приемника градиента давления по полю в отражающем бассейне с применением ЛЧМ сигнала// Акустический журнал, 2013, Т. 59, № 6, с. 773-781.

7. Исаев А.Е., Матвеев А.Н. Применение метода скользящего

комплексного взвешенного усреднения для восстановления неравномерной частотной характеристики приемника// Акустический журнал. 2010, т. 56, № 5, с. 651-654.

8. Исаев А.Е., Матвеев А.Н., Поликарпов А.М., Щерблюк Н.Г. Измерение фазочастотной характеристики чувствительности гидрофона по полю методом взаимности// Измерительная техника. 2013, № 6, с. 56-58.

9. Исаев А.Е. Патент № 2516607, Российская Федерация, С1. Кл. H04R 1/44. Способ определения пространственного смещения акустического центра гидрофона относительно его геометрического центра/ Опубликовано 20.05.2014, БИ № 14.

10. Исаев А.Е. Способ определения амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик чувствительности по полю гидроакустического приемника. Заявка на изобретение № 2014144052, приоритет от 31.10.2014.

11. Исаев А.Е., Матвеев А.Н., Некрич Г.С., Поликарпов А.М. Комплексная градуировка приемника градиента давления с использованием процедуры метода взаимности // Акустический журнал, 2014, т. 60, № 1, с. 48-55.

12. Еняков А.М., Исаев А.Е., Матвеев А.Н. и др. Российско-китайские пилотные сличения результатов калибровок гидрофонов в диапазоне частот от 250 Гц до

200 кГц// Измерительная техника. 2011. № 6. с. 33-37.

13. Исаев А.Е. Способ определения чувствительности по полю гидроакустического приемника. Заявка на изобретение № 2014140074, приоритет от 03.10.2014.

14. Nayman G., Robinson S. Phase calibration of hydrophones by the free-field reciprocity method / Proc. of the 11th European Conference on Underwater Acoustics // Edinburgh, 2012, p. 1437-1444.

15. Исаев А.Е. Патент № 2509441, Российская Федерация, С1. Кл. H04R 29/00. Способ определения фазового угла комплексной чувствительности гидрофона методом взаимности/ Опубликовано 10.03.2014, БИ № 7.

16. Лопашев Д.З. Исследование звукового поля в большом измерительном бассейне/ Исследования в области акустических и гидроакустических измерений// Труды институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов СССР. Вып. 73(133). М.: Стандартгиз, 1963, с. 31- 40.

17. Stephen P. Robinson et al. An international key comparison of free-field hydrophone calibrations in the frequency range 1 to 500 kHz// JASA. 2006, vol. 120, № 3, p. 1366-1373.

18. Robinson S. Review of methods for low frequency transducer calibration in reverberant tanks. PL Report CMAM 034. ISSN 1369-6785. 1999.