

УДК 53.082+534.6.08

**ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕДАЧИ ЕДИНИЦЫ  
КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СКОРОСТИ ЧАСТИЦ  
ВОДНОЙ СРЕДЫ В ГОСУДАРСТВЕННОМ  
ПЕРВИЧНОМ ЭТАЛОНЕ ГЭТ 55-2017**

**А.Е. Исаев, А.Н. Матвеев, Г.С. Некрич, А.М. Поликарпов**

*ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл.  
isaev@vniiftri.ru*

*Делай просто, насколько возможно, но не проща этого...  
Альберт Эйнштейн*

*Для обоснования возможности передавать единицу по полю приёмнику колебательной скорости частиц водной среды в условиях незаглушённого гидроакустического бассейна предложен приём, основанный на внесении «эталонного» искажения в прямую волну излучателя волной, отражённой от границы раздела вода—воздух. Предложенный приём в сочетании с обработкой по методу СКВУ позволил экспериментально установить возможность в реверберационном звуковом поле бассейна выделять векторную величину прямой волны излучателя и применить в ГЭТ 55-2017 непрерывный полосовой сигнал для передачи единицы колебательной скорости на частотах от 1 до 10 кГц.*

*To substantiate the possibility of transferring the unit across the field to the receiver of the oscillating velocity of the particles of the aquatic environment under conditions of a reverberant hydroacoustic water tank, a technique is proposed based on introducing a “reference” distortion into the direct wave of the radiator by the wave reflected from the water-air interface. The proposed technique in combination with the processing by the method of SCVU allowed to experimentally establish the ability to allocate the vector value of the radiator's direct wave in the reverberation sound field of the water tank and use a continuous band signal in the GET 55-2017 to transmit a unit of oscillating velocity at frequencies from 1 to 10 kHz.*

*Ключевые слова: приёмник колебательной скорости частиц водной среды, калибровка по полю, непрерывный полосовой сигнал, реверберационное звуковое поле бассейна, метод скользящего комплексного взвешенного усреднения.*

*Key words: receiver of the oscillatory velocity of particles of the aquatic environment, field calibration, continuous band-pass signal, reverberation sound field of the water tank, method of sliding complex weighted averaging.*

Даже самые современные звукопоглощающие покрытия не позволяют кардинально подавить эхосигналы от стенок бассейна. Для реализации условий свободного поля при воспроизведении и передаче единицы звукового давления в гидроакустическом измерительном бассейне обычно излучают тональные импульсы, прямой сигнал излучателя выделяют, применяя временную селекцию (тонально-импульсный метод). Выбор этого способа обусловлен следующими обстоятельствами:

- для передачи единицы используют лабораторный гидрофон, размеры которого малы в сравнении с длиной звуковой волны;
- чувствительность гидрофона не имеет резких изменений с частотой;

- воспроизведение и передачу единицы от первичного эталона до рабочих СИ осуществляют на стандартных частотах третьоктавного ряда [1];
- диапазон измерений по полю простирается вплоть до частот, на которых воспроизведение и передачу единицы осуществляют по давлению в камере малого объема.

Если под воспроизведением векторных величин понимать создание в гидроакустическом бассейне звуковой волны с известными векторными параметрами, то для этого можно использовать тонально-импульсный метод, используя в качестве излучателя гидрофон с известной чувствительностью на излучение. Таким способом на достаточном удалении от излучателя создают бегущую сферическую звуковую волну с известным на коротком временном интервале звуковым давлением. Векторные величины созданной звуковой волны в выбранной точке звукового поля могут быть определены, используя известные соотношения между звуковым давлением и выбранной векторной величиной, например, колебательной скоростью частиц водной среды (далее — колебательной скоростью) [2, 3]. Иными словами, воспроизведение векторной величины не требует обязательного участия приёмника векторной величины (ВП).

Поскольку передача векторной единицы на всех уровнях поверочной схемы осуществляется с помощью ВП, то его присутствие в точке звукового поля, в которой воспроизведена единица, обязательно. При этом особенности воспроизведения и передачи единиц векторных величин звуковой волны ограничивают возможности использования временной селекции тонального импульса.

Конструкция гидрофона отработана и не содержит элементов, которые могли бы стать причиной значительной дифракции звуковой волны, падающей на гидрофон. На частотах ниже нескольких килогерц чувствительность гидрофона слабо зависит от частоты, шаг шириной 1/3 октавы становится достаточно мелким для того, чтобы значения на частотах третьоктавного ряда с избыточностью представляли поведение частотной характеристики (ЧХ), и получать более детальную ЧХ нет необходимости.

В отличие от гидрофона, ВП представляет собой активный элемент, колеблющийся на подвесах, закреплённых на жёсткой обычно стальной раме. Рассеяние звука на раме становится значимым, начиная с 4–6 кГц, и в диапазоне выше 6–8 кГц частоты третьоктавного ряда не позволяют представить поведение ЧХ ВП с необходимой точностью.

Частотные характеристики чувствительности приёмника градиента звукового давления на рис. 1 иллюстрируют, насколько различное представление о качестве рабочего СИ могут давать зависимости, измеренные на частотах третьоктавного ряда тонально-импульсным методом и непрерывные. Тонально-импульсные точки лежат на практически прямой линии с наклоном 6 дБ на октаву. Непрерывная кривая выявляет значительные до 3 дБ

осцилляции, по которым удалось определить проблемные элементы конструкции приёмника.

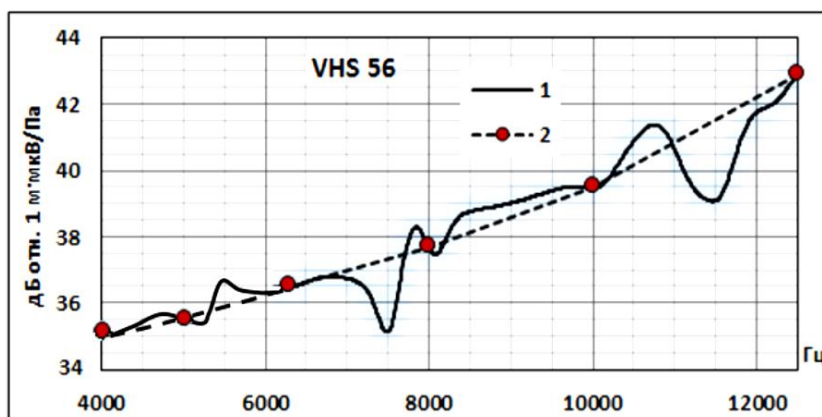


Рис. 1. Частотная характеристика чувствительности приёмника градиента давления типа VHS 56: 1 — непрерывная; 2 — на частотах третьоктавного ряда

Если передавать единицу такому СИ на редкой сетке частот, то полученная информация окажется недостаточной не только для корректной оценки его метрологических свойств, но и для вычисления неопределённости полученных с использованием СИ результатов измерений.

Чтобы иметь представление о поведении такой частотной зависимости, например, для оценки её неравномерности в диапазоне частот, на частотах выше 6 кГц шаг изменения частоты должен быть значительно меньше 100 Гц. С учётом реверберационных пауз для калибровки ВП с таким мелким шагом по частоте тонально-импульсным методом могут потребоваться не одни сутки. Продолжительный эксперимент нарушает один из основных принципов метрологии — неизменность условий измерений, что неизбежно влечёт за собой увеличение погрешности, поскольку возникают дополнительные источники, связанные с изменением климатических условий, помеховой обстановки, временной нестабильностью, случайными внешними факторами и т.п.

Измерения в море выполняют в третьоктавных полосах частот. Изменения ЧХ чувствительности ВП на рис. 1 могут достигать нескольких дБ в пределах третьоктавной полосы. В этой ситуации использование чувствительности на центральной частоте третьоктавной полосы приведёт к увеличению погрешности измерений шума в полосе частот.

Решение этой проблемы найдено для приёмников звукового давления и состоит в использовании энергетической чувствительности в третьоктавной полосе частот, которую получают расчётным методом по подробной ЧХ чувствительности.

Возможность получения подробной ЧХ на первичном эталоне позволяет передавать единицу методом сравнения вплоть до рабочего СИ. Для измерения подробной ЧХ тонально-импульсным методом необходимо уменьшать шаг по частоте, однако очень мелкий шаг приводит к избыточности получаемой информации, неоправданному увеличению трудоёмкости и времени эксперимента. Чтобы использовать крупный шаг, необходимо заранее либо иметь представление о поведении измеряемой ЧХЧ, либо знать положение её экстремумов, для чего изначально необходимо получить детальную ЧХ.

Однако шаг по частоте — не единственная проблема при использовании тонально-импульсного метода. При измерениях на частотах вблизи экстремумов ЧХ длительность переходного процесса в приёмнике значительно увеличивается, соответственно точность тонально-импульсного метода уменьшается вплоть до невозможности выполнить измерение высокочастотных экстремумов. На рис. 1 ширина таких экстремумов, как положительных, так и отрицательных, не превосходит 500 Гц. В бассейне с минимальным размером 6 м частотное разрешение измерений тонально-импульсным методом составляет 500 Гц, что явно недостаточно для точной калибровки, с каким бы мелким шагом не перестраивали частоту тонального импульса. Отметим, что по удивительному стечению обстоятельств третьоктавные частотные точки на рис. 1 совпадают с частотами перегибов ЧХ, вследствие чего тонально-импульсные точки лежат близко к непрерывной кривой.

При калибровке гидрофон представляют точкой — акустическим центром, относительно которой выполняют вычисления и преобразования. Конечные размеры активного элемента реального гидрофона (даже сферической формы) приводят к тому, что начало приёма акустического сигнала опережает время прихода звуковой волны в точку расположения акустического центра. Несовершенство модели проявляется в следующем: фазовая характеристика чувствительности гидрофона приобретает нарастающую с частотой составляющую  $kr$  ( $k$  — волновое число,  $r$  — радиус активного элемента), что выглядит, как нарушение принципа казуальности — реакция гидрофона опережает воздействие на гидрофон.

Распространённые на практике конструкции ВП созданы на основе распределённого в пространстве двухэлементного приёмника, каждый из элементов имеет свой акустический центр, что ещё больше усложняет модель приёмника и его калибровку.

Принятый тональный импульс при калибровке ВП искажён больше, чем при калибровке гидрофона. В отличие от гидрофона выходной сигнал каждого канала ВП — суперпозиция сигналов с выходов двух разнесённых в пространстве приёмных элементов (акустических центров). При облучении ВП тональным импульсом переходным процессом искажены выходные сигналы каждого приёмного элемента, что приводит к затягиванию во вре-

мени искажений выходного сигнала ВП. Подвес ВП также увеличивает продолжительность переходного процесса.

По своим размерам ВП значительно превосходит гидрофон, что вынуждает увеличивать расстояние между излучателем и ВП и приводит к уменьшению продолжительности тонального импульса. Короткий тональный импульс не позволяет выполнять измерения на низких частотах. Как следствие, вместо перекрытия диапазонов калибровки в бассейне и камере малого объема образуется частотный разрыв, в котором невозможно выполнить калибровку ВП.

На рис. 2 изображена огибающая сигнала на выходе приёмника колебательной скорости при излучении квадратурно дополненной пары тональных импульсов с частотой заполнения 4 кГц [4]. Искажения переходным процессом настолько велики и продолжительны, что установившегося участка огибающей не наблюдается. На частоте 4 кГц удаётся получить лишь довольно грубую оценку амплитуды. С уменьшением частоты продолжительность переходного процесса возрастает, что делает калибровку на частотах ниже 4 кГц ещё более проблематичной.

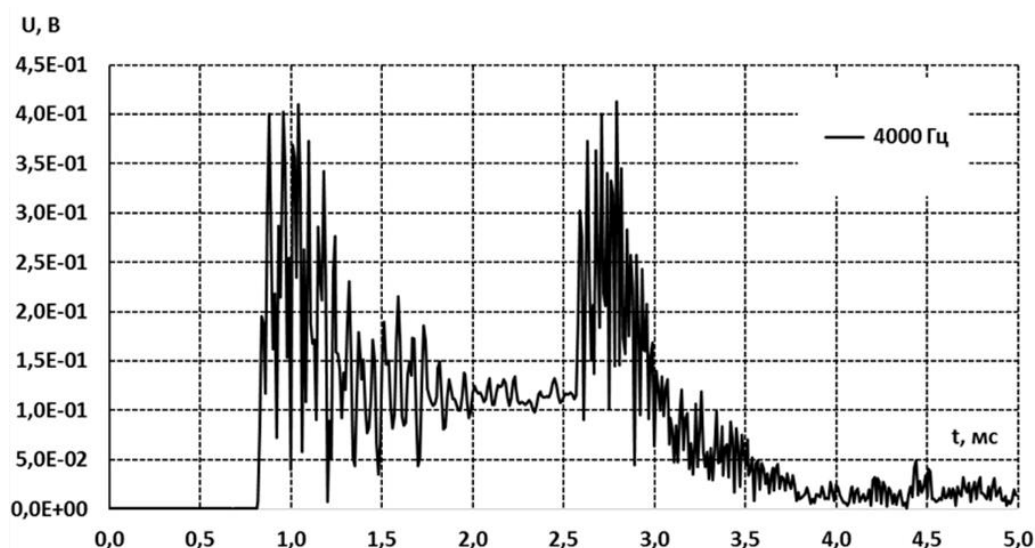


Рис. 2. Огибающая сигнала на выходе приёмника колебательной скорости при излучении квадратурно дополненной пары тональных импульсов

Избежать влияния искажений переходными процессами, выполнять измерения быстро с лучшим в сравнении с тонально-импульсным методом частотным разрешением и получать частотную зависимость по полю с требуемой детализацией по частоте позволяет техника измерений, основанная на подавлении реверберационных искажений частотной зависимости, измерен-

ной при непрерывном излучении в бассейне сигналов с распределённой по частоте мощностью. «Know-how» техники составляет пост-обработка экспериментальной частотной зависимости методом скользящего комплексного взвешенного усреднения (СКВУ), который был разработан во ФГУП «ВНИИФТРИ» для калибровки средств измерений уровней подводного шума.

За годы применения техники выполнен широкий круг исследований, способствовавший совершенствованию как самого метода СКВУ и его программно-аппаратной реализации, так и расширению области его применения. Оценена степень подавления реверберационных искажений в бассейнах различной формы и размеров, исследованы ограничения и характерные источники погрешностей [5]. На ЛЧМ и шумовых сигналах с эталонной точностью выполнены калибровки по полю гидроакустического приёмника звукового давления методом взаимности и методом сравнения с опорным гидрофоном [6, 7].

Составлены и подтверждены международными сличениями, включая ключевые сличения Международного Комитета мер и весов, бюджеты неопределённостей калибровки гидрофонов [8, 9]. Впервые в метрологической практике осуществлена амплитудно-фазовая калибровка гидроакустических преобразователей различного типа [10, 11], калибровка приёмника подводного шума, результатом которой является энергетическая чувствительность в третьоктавной полосе частот [12]. Техника применена для исследований акустических характеристик материалов, гидрофонов и их носителей различного конструктивного исполнения [13–15]. В незаглушённом бассейне глубиной 6 м нижнюю частоту калибровки по полю приёмника звукового давления удалось уменьшить с 3 кГц до 100–150 Гц [16]. Для уменьшения погрешности калибровки техника предусматривает применение апостериорного либо априорного редактирования экспериментальной частотной зависимости, которые выполняют на основе информации о частотных свойствах трактов излучения и приёма эталонной установки [17, 18].

При передаче единицы ВП особое значение имеет точность определения фазочастотных характеристик. Выходные сигналы приёмных каналов ВП представляют собой напряжения, пропорциональные проекциям преобразуемой ВП векторной величины на опорные направления каналов. Чтобы избежать искажений результата измерений, фазовые характеристики каналов ВП должны быть либо идентичны, либо точно известны с тем, чтобы иметь возможность учесть соответствующие поправки в результатах измерений.

При измерениях с использованием разработанной техники точность фазовых характеристик обеспечивают, выполняя измерения методом неподвижной опорной точки и позиционируя опорную точку по лучу лазера [19]. В зависимости от условий эксперимента положение акустического центра приёмника определяют либо акустическим способом [20], либо определяют смещение акустического центра преобразователя относительно опорной

точки [10, 21, 22]. Способ определения фазового угла чувствительности гидрофона методом взаимности позволяет исключить составляющую погрешности, обусловленную несовпадением геометрического и акустического центров [23], при этом обеспечиваются значительно меньший в сравнении с методом неподвижной опорной точки разброс результатов и зависимость разброса от частоты измерений.

В противоположность традиционному тонально-импульсному методу в основу техники положено излучение продолжительных (многократно превышающих время реверберации в бассейне) сигналов с распределённой по частоте мощностью [20]. Для измерений используют весь излучённый сигнал, обработке подвергают комплексную частотную зависимость, измеренную в реверберационном звуковом поле. Вызванные отражениями искажения частотной зависимости подавляют скользящим комплексным взвешенным усреднением. Взвешивающую функцию рассчитывают, исходя из значений временных задержек отражений. Тем самым реализуют характеристику пропускания режетирующего пространственного фильтра, настроенного на отражения в измерительном эксперименте. Адаптированность пространственного фильтра к сценарию отражений объясняет высокое (не менее 46 дБ) подавление реверберационных искажений, что достаточно для эталонных измерений. При этом за один акт излучения получают не значение на частоте (тонально-импульсный метод), а зависимость по полю в частотном диапазоне излучения, измеренную с требуемой подробностью по частоте.

Метод СКВУ хорошо зарекомендовал себя при калибровке гидрофона — приёмника скалярной величины звукового поля. Пост-обработка основана на подавлении в экспериментальной частотной зависимости интерференционных осцилляций, обусловленных влиянием отражённых границами бассейна звуковых волн, которые всегда задержаны по времени относительно прямой волны излучателя. Разность фаз скалярных величин прямой и отражённых волн в точке приёма (акустическом центре приёмника) определяется разностью времён прихода волн. В то же время, возможность использовать СКВУ для калибровки приёмников векторных величин не так очевидна.

В сравнении со скалярными величинами, механизм сложения векторных величин сложнее. Фаза выходного сигнала канала ВП определяется не только запаздыванием отражённых волн по времени, но и углами их падения на приёмник. При калибровке тонально-импульсным методом (в отсутствие отражённых звуковых волн) активный элемент ВП совершает колебания коллинеарно направлению распространения прямой волны излучателя. В реверберационном звуковом поле бассейна помимо прямой волны излучателя на приёмник с самых различных направлений падают звуковые волны, отражённые границами бассейна. При приёме непрерывного сигнала форма колебаний активного элемента усложняется по мере прихода каждой отражённой волны, которая добавляет свою компоненту к его вектору колеба-

ний. В результате активный элемент приёмника совершает движение относительно опорных направлений каналов по сложным 3D-траекториям, радикально отличающимся от траектории при приёме тонального импульса. Возникающие при этом в подвесах активного элемента собственные колебания сложной формы могут искажать эти траектории, добавляя дополнительную анизотропию к анизотропным свойствам активного элемента.

Известным примером подобного эффекта служит возникновение трансосевого и поперечного колебаний при калибровке акселерометров. Чувствительность к подобным колебаниям характерна для всех конструкций акселерометров. Поскольку влияние такой чувствительности может быть значительным, допустимые пределы этого влияния устанавливаются в нормативных документах. К вибростолам, применяемым при калибровке акселерометров, предъявляются жёсткие требования по отсутствию поперечных колебаний, поскольку невозможно точно учесть их влияние с помощью поправок из-за неопределённости влияния фаз осевого и поперечного колебаний.

Калибровка в поле плоской стоячей звуковой волны и на тональных импульсах — аналог вибростенда без поперечных колебаний. В то же время, калибровка в реверберационном звуковом поле бассейна в большей степени соответствует условиям применения ВП при его использовании по назначению. Измерения в море нельзя представить приёмом звуковой волны, распространяющейся в определённом направлении. При измерениях в натуральных условиях всегда большее или меньшее влияние оказывают отражённые звуковые волны и волны посторонних источников, падающие на приёмник с произвольных направлений. Это вынуждает экспериментально подтвердить возможность использования метода СКВУ для передачи единицы ВП. При этом чувствительность в опорном направлении, измеренная методом СКВУ, должна совпадать с результатами, полученными в поле стоячей волны либо тонально-импульсным методом. Однако выполнению такой проверки препятствует разрыв в диапазоне частот калибровки, не обеспеченный другими первичными методами. Этот разрыв обусловлен тем, что гарантировать необходимую для подтверждения корректности метода СКВУ точность калибровки ВП в звуковом поле стоячей волны можно на частотах не выше 500 Гц, а тональный импульс можно применять, начиная с 6 кГц. Результат, полученный методом СКВУ в диапазоне от 500 Гц до 6 кГц, невозможно напрямую сравнить с результатами других первичных методов, что вынуждает искать способы подтверждения правильности калибровки методом СКВУ, не основанные на прямом сравнении результатов измерения чувствительности ВП.

В отсутствие возможности каким-либо образом (например, расчётным) получить опорные значения ЧХ ВП был поставлен 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.

Например, частотная зависимость, измеренная при наличии единственной отражённой звуковой волны, будет искажена возникающей вследствие интерференции прямой и отражённой волн осцилляцией, описываемой гармонической функцией. Амплитуда, частота и фаза функции однозначно определяются геометрическими параметрами эксперимента и коэффициентом отражения. Справедливость этого утверждения неоднократно подтверждена многочисленными экспериментами, в том числе с использованием тональных импульсов. Чтобы подтвердить корректность использования метода СКВУ с эталонной точностью, эксперимент необходимо выполнить в строго контролируемых условиях. Для этого в качестве отражающей поверхности была выбрана граница раздела сред вода—воздух (поверхность воды в бассейне). Как отражающая поверхность эта граница 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 отражённых звуковых волн, начиная с частот в сотни герц;
- соотношение длины волны и размеров бассейна позволяют использовать законы и соотношения геометрической акустики.

### Параметры интерференционной осцилляции

В присутствии прямой и одной отражённой гармонических волн точечного источника для звукового давления  $\dot{p}_\Sigma(f)$  в точке размещения ВП можем записать:

$$\begin{aligned} \dot{p}_\Sigma(f) &= \frac{r_0}{r_{dir}} \dot{p}_o(f) + \frac{r_0}{r_{ref}} \dot{p}_o(f) \dot{W}_{ref}(f) e^{-j(k\Delta r)} = \\ &= \frac{r_0}{r_{dir}} \dot{p}_o(f) \left[ 1 + \frac{r_{dir}}{r_{ref}} \dot{W}_{ref}(f) \cdot e^{-j(k\Delta r)} \right], \end{aligned} \quad (1)$$

где волновое число  $k = 2\pi f / c$ ;  $f$  — частота;  $c$  — скорость звука в воде;  $\Delta r$  — разность хода прямой  $r_{dir}$  и отражённой  $r_{ref}$  волн;  $\dot{W}_{ref}(f)$  — комплексный коэффициент отражения по звуковому давлению;  $\dot{p}_o(f)$  — звуковое давление, создаваемое точечным источником на опорном расстоянии  $r_0$ .

В правой части выражения (1) множитель  $\frac{r_0}{r_{dir}} \dot{p}_o(f)$  описывает поведение в точке приёма частотной зависимости звукового давления точечного источника. Множитель в квадратных скобках описывает изменения звукового давления в точке приёма вследствие интерференции прямой и отражённой звуковых волн. Интерференционная осцилляция  $\dot{\Omega}_p(f) = \frac{r_{dir}}{r_0} \frac{\dot{p}_\Sigma(f)}{\dot{p}_o(f)} - 1$  описывается гармонической функцией с амплитудой  $\frac{r_{dir}}{r_{ref}} |\dot{W}_{ref}(f)|$ , фазой  $\arg(\dot{W}_{ref}(f))$  и имеющим размерность частоты периодом  $\Delta f = \frac{c}{\Delta r}$ . Нетрудно проверить, что в присутствии единственной отражённой волны таким же выражением описывается интерференционная осцилляция частотной зависимости передаточного импеданса (ПИ) пары излучатель—приёмник [24]. При отражении звуковой волны от границы вода—воздух модуль и аргумент коэффициента отражения будем принимать равными единице и  $\pi$  соответственно.

В поле сферической звуковой волны на расстоянии  $r$  от точечного излучателя колебательная скорость  $\dot{v}(f)$  связана со звуковым давлением соотношением [2]:

$$\dot{v}(f) = \frac{1}{\rho c} \frac{\sqrt{k^2 r^2 + 1}}{r} \dot{p}(f) e^{-j \arctg\left(\frac{1}{kr}\right)}, \quad (2)$$

где  $\rho$  — плотность воды.

Ситуацию при наличии единственной отражённой волны будем рассматривать для случая распространения прямой и отражённой волн в опорном направлении ВП, нормальном к границе раздела сред. Выражение для интерференционной осцилляции частотной зависимости колебательной скорости в точке расположения приёмника получим подстановкой соотношения (2) в (1). Учитывая принятые допущения относительно коэффициента отражения, а также идентичность выражений для интерференционной осцилляции частотных зависимостей колебательной скорости и ПИ пары излучатель—ВП, запишем  $\dot{\Omega}(f)$  в терминах передаточных импедансов:

$$\dot{\Omega}_v(f) = \frac{\dot{Z}_\Sigma(f)}{\dot{Z}_{f-f}(f)} - 1 = \frac{r_{dir}^2 \sqrt{k^2 r_{ref}^2 + 1}}{r_{ref}^2 \sqrt{k^2 r_{dir}^2 + 1}} e^{-j \left( k\Delta r + \left( \arctg\left(\frac{1}{kr_{ref}}\right) - \arctg\left(\frac{1}{kr_{dir}}\right) + \pi \right) \right)},$$

где  $\dot{Z}_\Sigma(f)$  и  $\dot{Z}_{f-f}(f)$  — частотные зависимости ПИ пары излучатель—ВП в присутствии отражённой волны и в свободном звуковом поле соответственно.

Интерференционную осцилляцию описывает гармоническая функция  $\dot{\Omega}_v(f)$  с амплитудой  $\frac{r_{dir}^2 \sqrt{k^2 r_{ref}^2 + 1}}{r_{ref}^2 \sqrt{k^2 r_{dir}^2 + 1}}$ , фазой  $\arctg\left(\frac{1}{kr_{ref}}\right) - \arctg\left(\frac{1}{kr_{dir}}\right) + \pi$  и периодом  $\Delta f = \frac{c}{\Delta r}$ .

При отражении сферической звуковой волны на границе вода—воздух звуковое давление равно нулю, а колебательная скорость частиц среды максимальна. Отсюда следует, что на границе раздела сред фазы звукового давления в прямой и отражённой волнах противоположны, а фазы колебательных скоростей частиц среды для обеих волн совпадают. Однако в силу того, что направление вектора распространения звуковой волны изменяется на противоположное, в отражённой волне фазы колебательной скорости и звукового давления совпадают с точностью до фазового сдвига, обусловленного сферичностью волны. Фазовая компонента  $\pi$  входит как в функцию осцилляции  $\dot{\Omega}_p(f)$ , так и в функцию  $\dot{\Omega}_v(f)$ .

Рассмотренная ситуация возникает, если излучатель расположен между ВП и границей раздела сред. Если излучатель и ВП поменять местами, то прямая и отражённая волны, падающие на ВП, будут распространяться в противоположных направлениях, фазовая компонента  $\pi$  исчезнет, и фаза осцилляции изменится на противоположную. Эти расположения излучателя, ВП и границы раздела сред показаны на рис. 3 схемами Б и А соответственно.

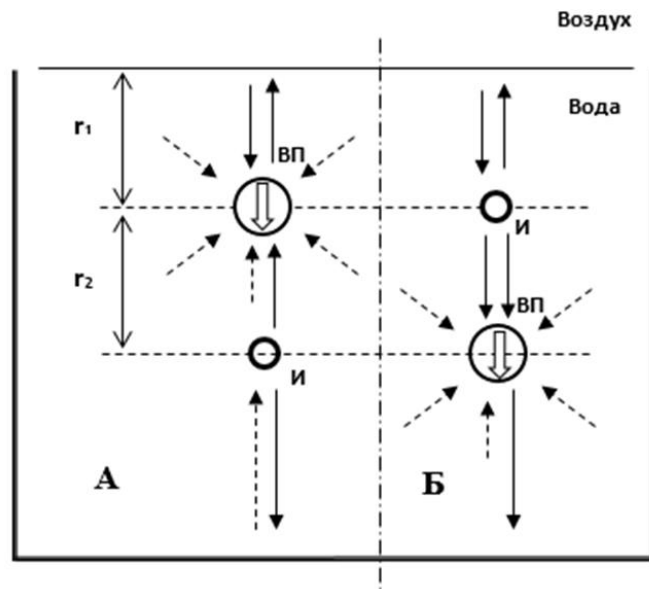


Рис. 3. Расположение излучателя, ВП и границы раздела сред. Прямая и отражённая волны падают на ВП в противоположных направлениях — А, в опорном направлении — Б

Отметим, что если вместо ВП использовать гидрофон — приёмник звукового давления, то интерференционные осцилляции будут идентичными для обоих расположений, тем самым иллюстрируя различия сложения скалярных и векторных величин звуковой волны.

На рис. 4а и б приведены результаты экспериментов для пары излучатель—гидрофон. Излучатель со сферическим активным элементом диаметром 40 мм и гидрофон со сферическим активным элементом диаметром 20 мм были закреплены на Г-образных тонких штангах, на расстоянии 0,5 м. Штанги размещали в центральной части бассейна глубиной и шириной 6 м, длиной 10 м так, чтобы геометрические центры преобразователей находились на вертикальной оси. Расстояние от верхнего преобразователя до поверхности воды составляло  $\approx 1$  м, с тем, чтобы первым по времени прихода на гидрофон отражением было отражение от поверхности воды. Излучали ЛЧМ сигнал, регистрировали частотную зависимость ПИ пары излучатель—гидрофон в реверберационном звуковом поле бассейна. Методом СКВУ определяли частотную зависимость ПИ пары в свободном поле и  $\dot{Z}_{f-f}(f)$  и частотную зависимость ПИ пары, искажённую отражением от поверхности воды  $\dot{Z}_{\Sigma}(f)$ .

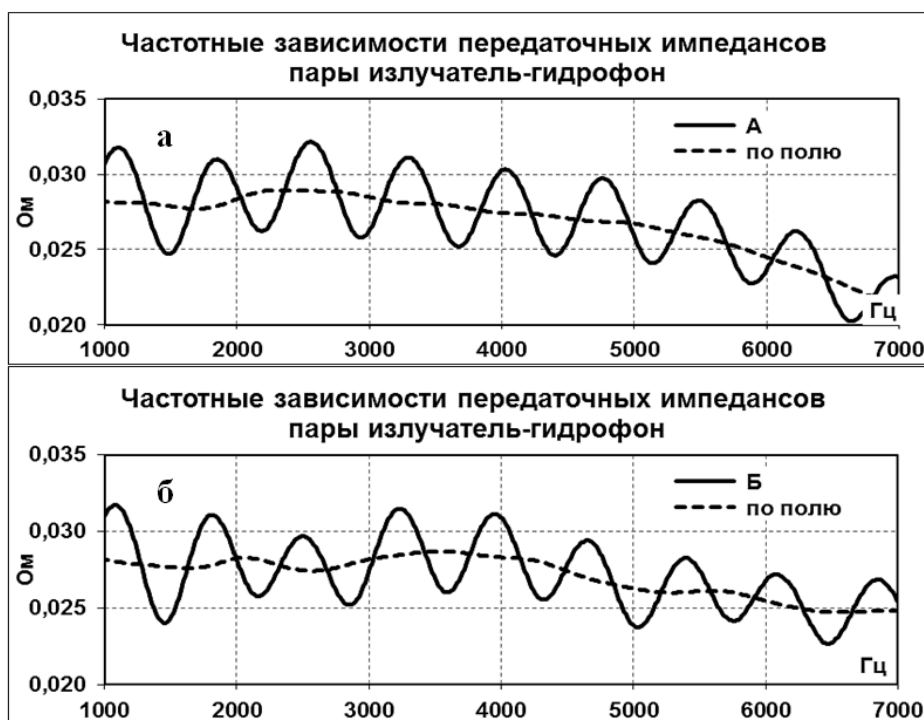


Рис. 4. Частотные зависимости ПИ пары излучатель—гидрофон по полю и искажённые отражением от водной поверхности, полученные при размещении пары по схемам А и Б

Некоторые различия частотных зависимостей ПИ пары по полю на рис. 4а и б объясняются отличием схем расположения преобразователей относительно падающих и отражённых звуковых волн. При размещении по схеме А на результаты эксперимента оказывали влияние направленность гидрофона и затенение прямой волны гидрофоном. При размещении по схеме Б влияние оказывали направленность излучателя и затенение отражённой волны излучателем. Подтверждением этому является уменьшение различий частотных зависимостей по полю с уменьшением частоты. Для использованных в экспериментах преобразователей влияние направленности и эффектов затенения с уменьшением частоты уменьшается.

Поскольку при любой из схем расположения излучателя и приёмника избежать влияния затенения и направленности преобразователя невозможно, схемы размещения были выбраны из тех соображений, чтобы наглядно показать идентичность фаз интерференционных осцилляций для приёмника скалярной величины (гидрофона) и изменение фаз на  $\pi$  для приёмника векторной величины (колебательной скорости).

Интерференционные осцилляции вычисляли по формуле:

$$\dot{\Omega}_v(f) = \frac{\dot{Z}_\Sigma(f)}{\dot{Z}_{f-f}(f)} - 1.$$

На рис. 5 представлены модули интерференционных осцилляций, полученные при размещении по схемам А и Б. Несмотря на указанные различия частотных зависимостей ПИ пары излучатель—гидрофон по полю, интерференционные осцилляции практически идентичны.



Рис. 5. Интерференционные осцилляции ПИ пары излучатель—гидрофон при размещении пары по схеме А и Б

Полученные результаты в очередной раз подтвердили корректность использования метода СКВУ в экспериментах с приёмником скалярной вели-

чины звукового поля [25]. Однако для целей настоящего исследования большее значение имеет подтверждение того, что параметры осцилляции, искажающей частотную зависимость вследствие интерференции прямой и отражённой водной поверхностью бассейна звуковых волн, однозначно определяются геометрическими параметрами эксперимента и практически не зависят от частотных свойств излучателя и приёмника. Период осцилляций  $\Delta f = \frac{c}{\Delta r} \approx \frac{1485}{2,05} = 724$  Гц. Частота 5068 Гц соответствует минимуму

функции осцилляции. Поскольку на интервале от нуля до 5068 Гц укладывается целое число осцилляционных колебаний, нулю на оси частот также соответствует минимум осцилляции — фаза функции осцилляции равна  $\pi$ .

В описываемом эксперименте  $\frac{r_{dir}}{r_{ref}} \approx 0,2$ , а коэффициент передачи пространственного фильтра  $K(\Delta\tau)$ , реализованного обработкой по методу СКВУ [24, 25] для отражения с разностью хода  $\Delta r = 2,05$  м, составляет 0,48. При единичном коэффициенте отражения звуковой волны значение амплитуды интерференционной осцилляции определим из соотношения  $\frac{r_{dir}}{r_{ref}} K(\Delta\tau) \approx 0,096$ , что очень близко к наблюдаемым на рис. 5 значениям.

На рис. 6 изображены частотные зависимости ПИ пары излучатель—ВП, полученные при расположении пары по схемам А и Б на рис. 3. При тех же геометрических параметрах эксперимента в качестве ВП использовали приёмник колебательной скорости типа КГП-10. В отличие от зависимостей, изображённых на рис. 4, осцилляции меняют фазу на  $\pi$  при изменении схемы расположения А на Б.

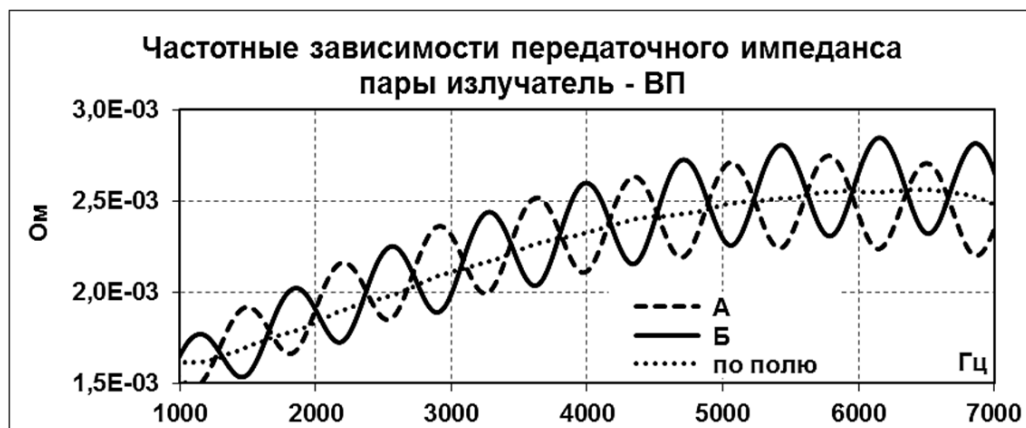


Рис. 6. Полученные в экспериментах А и Б частотные зависимости ПИ пары излучатель—ВП по полю и искажённые отражением от водной поверхности

Известно, что в поле плоской гармонической звуковой волны фазы звукового давления и колебательной скорости совпадают. В поле бегущей сферической волны между звуковым давлением и колебательной скоростью возникает фазовый сдвиг  $\arctg\left(\frac{1}{kr}\right)$ , который уменьшается с увеличением ра-

диуса волны и частоты. При тех же значениях звукового давления амплитуда колебательной скорости с частотой увеличивается. Однако выражения для параметров интерференционной осцилляции представляют собой отношение амплитуд и разность фазовых сдвигов колебательных скоростей прямой и отражённой волн. При фиксированных геометрических параметрах эксперимента с увеличением частоты отношение амплитуд колебательных

скоростей  $\frac{r_{dir}^2 \sqrt{k^2 r_{ref}^2 + 1}}{r_{ref}^2 \sqrt{k^2 r_{dir}^2 + 1}}$  стремится к  $\frac{r_{dir}}{r_{ref}}$ , а разность фазовых сдвигов

$\arctg\left(\frac{1}{kr_{ref}}\right) - \arctg\left(\frac{1}{kr_{dir}}\right)$  — к нулю.

Выполненные расчёты показали, что в описываемых экспериментах заметные изменения этих величин происходят на частотах менее 3 кГц. Интерференционные осцилляции ПИ пар излучатель—гидрофон и излучатель—ВП также соответствуют расчётным значениям. Это подтверждают зависимости на рис. 7, полученные для звукового давления в эксперименте с гидрофоном и для колебательной скорости в эксперименте с ВП: интерференционные осцилляции ПИ размещённых по схеме Б пар излучатель—гидрофон и излучатель—ВП совпадают.

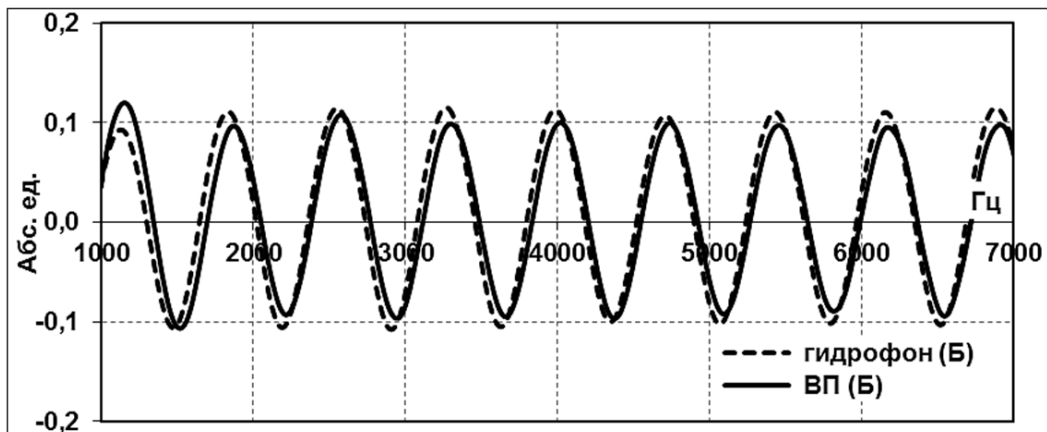


Рис. 7. Интерференционные осцилляции модуля ПИ пары излучатель—гидрофон и пары излучатель—ВП, размещённых по схеме Б

Ещё одним подтверждением корректности применения метода СКВУ для калибровки ВП являются фазочастотные зависимости на рис. 8, полученные при расположении ВП опорным направлением вниз (как это изображено на рис. 3) — кривые А и Б, и вверх — кривые А\* и Б\*. Параметры эксперимента (геометрические и параметры обработки по методу СКВУ) оставались неизменными.

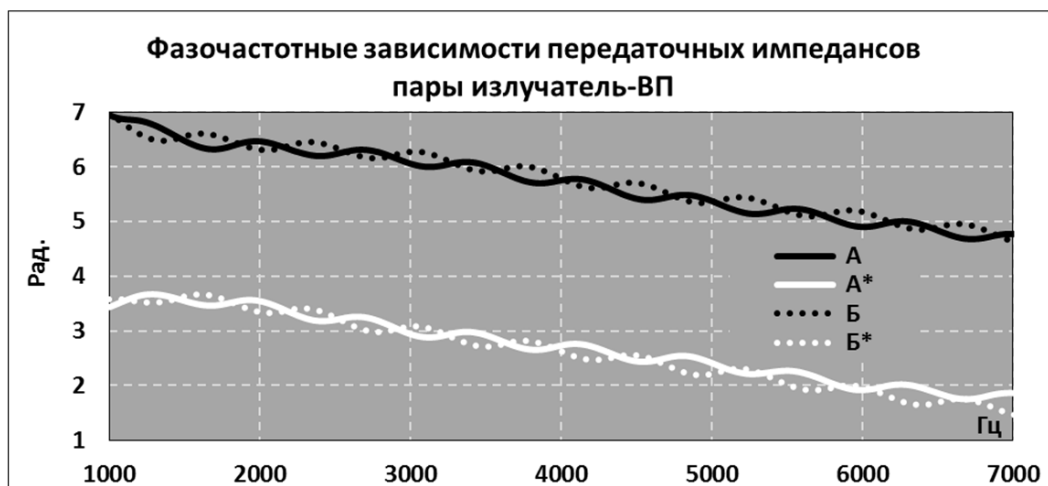


Рис. 8. Фазочастотные зависимости ПИ пары излучатель—ВП при размещении по схемам А и Б и изменении опорного направления ВП

При изменении опорного направления ВП фазочастотные зависимости ПИ сохраняют своё поведение, включая поведение интерференционных осцилляций, но смещаются на  $\pi$  радиан. Точки перегибов искажений фазочастотных зависимостей А и Б (А\* и Б\*) соответствуют экстремумам интерференционной осцилляции модуля ПИ. Представленные закономерности соответствуют правилам сложения векторов колебательных скоростей прямой и отражённой от поверхности воды звуковых волн. Для приёмника скалярной величины — гидрофона фазочастотные зависимости накладываются одна на другую с точностью, определяемой направленными свойствами приёмника.

Целью описанных выше экспериментов было подтверждение корректности применения метода СКВУ, но не получение оценок точности измерения чувствительности ВП. Независимым способом косвенного подтверждения точности результатов калибровки ВП с использованием метода СКВУ является измерение с помощью ВП звукового давления, созданного образцовым излучателем. Результаты эксперимента представлены на рис. 9.



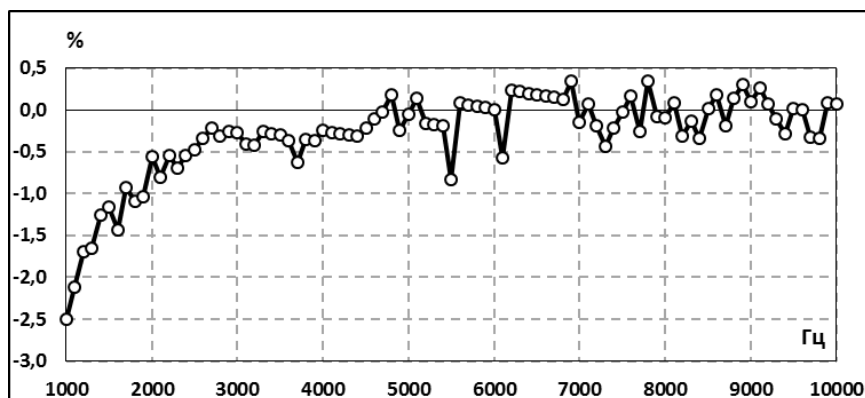


Рис. 9. Отклонения звукового давления, измеренного ВП от звукового давления, созданного в точке расположения ВП образцовым излучателем

В качестве ВП использовали приёмник КГП10, чувствительность к колебательной скорости которого определили с использованием метода СКВУ. В качестве образцового излучателя использовали гидрофон ГИ80, откалиброванный методом взаимности на ГПЭ ГЭТ 55-2017.

Измеренное с помощью КГП10 значение колебательной скорости пересчитывали в звуковое давление и сравнивали полученное значение со значением звукового давления, созданного в точке расположения КГП10 образцовым излучателем. В частотном диапазоне от 1000 до 10000 Гц отклонение звукового давления, измеренного КГП10 от созданного ГИ80, не превысило 2,5 %, что можно считать хорошим совпадением при выполнении калибровок на первичном эталоне.

### Заключение

В воздушной акустике при передаче единицы создают специальные звуковые поля в зависимости от назначения измерительного микрофона. В звуковом поле камеры малого объёма выполняют калибровку по давлению. Калибровку по полю выполняют в свободном звуковом поле безэховой камеры. Звуковое поле реверберационной камеры используют для калибровки по диффузному полю.

При передаче единицы гидроакустическому приёмнику определяют чувствительность по полю, поскольку принято считать, что при измерениях в море приёмник находится в условиях свободного звукового поля. Так как звукопоглощающие покрытия не позволяют подавить реверберацию звука в бассейне в требуемой степени, калибровать по полю гидрофон приходится в реверберационном звуковом поле бассейна. Для подавления влияния отражённых сигналов применяют различные методы.

Наиболее распространён в метрологической практике тонально-импульсный метод, который позволяет регистрировать на коротком интервале времени реакцию приёмника на воздействие свободной бегущей сферической звуковой волны.

Метод спектрометрии временных задержек позволяет разделить в реальном времени прямой и отражённый ЛЧМ-сигналы, основываясь на разнице их мгновенных частот [26]. Однако этот метод значительно уступает тонально-импульсному методу в точности и не получил распространения в метрологической практике.

Реализация условий свободного поля методом время-селективной гомоморфной постобработки [27] основана на выделении частотной зависимости по полю усечением кепстра частотной зависимости, измеренной в реверберационном звуковом поле бассейна, по квефренции первого отражения. Метод не используется в подводной акустике, поскольку требует звукоизолированного бассейна.

Применимость этих методов на практике в значительной степени определяется свойствами калибруемого приёмника, самым существенным из которых является время установления выходного сигнала. С наибольшей очевидностью об этом можно судить по осциллограмме выходного сигнала приёмника при использовании тонально-импульсного метода, когда переходной процесс не успевает установиться за время импульса.

В условиях свободного поля таких ограничений не существует по определению — это звуковое поле в однородной изотропной среде, границы которой оказывают пренебрежимо малое действие на звуковые волны [28]. В определении явно присутствует только пространство. То, что воздействие границ должно быть пренебрежимо малым бесконечно долго, присутствует в определении неявно, но именно в силу последнего продолжительность измерений в свободном поле всегда можно выбрать большим времени установления сигнала приёмника.

Время измерений по полю в гидроакустическом бассейне не превышает временной задержки отражённой волны. При этом конечное время измерений приобретает смысл конечного времени существования свободного поля в точке приёма. В силу неразрывной связи пространства и времени конечное время измерений  $\Delta t$  означает конечное разрешение по частоте  $\Delta f \geq 1/\Delta t$ . Конечное время существования свободного поля проявляется во всех упомянутых методах, ограничивая их частотное разрешение. Вследствие этого ограничения тонально импульсный метод удаётся использовать для калибровки гидрофона по полю в бассейне на частотах выше 1 кГц.

Вследствие большой инерционности ВП возможности прецизионной передачи единицы ВП тонально импульсным методом ограничены частотой 6 кГц, в то время как калибровка в поле стоячей звуковой волны может быть выполнена на частотах не выше 500 Гц.

Предложенный приём, основанный на внесении известного искажения в прямую волну излучателя волной, отражённой от границы раздела вода—воздух, в сочетании с обработкой по методу СКВУ позволил экспериментально установить возможность выделять векторную величину прямой волны в реверберационном звуковом поле бассейна и применить непрерывный полосовой сигнал для передачи единицы ВП на частотах от 500 Гц до 10 кГц.

Использование метода СКВУ позволяет полностью перекрыть частотный диапазон тонально-импульсного метода и расширить возможности калибровки по полю до частот камеры стоячей звуковой волны. Результаты выполненных экспериментов позволили обосновать создание на основе метода СКВУ эталонной установки Государственного первичного эталона ГЭТ 55-2017 для воспроизведения и передачи единицы колебательной скорости по полю в частотном диапазоне от 1 до 10 кГц.

Отметим, что результаты выполненного эксперимента дают также основания использовать ВП для измерений по полю акустического импеданса образца материала, что позволит за счёт направленных свойств ВП уменьшить влияние эффектов, обусловленных дифракцией звуковой волны на краях образца.

### Литература

1. ГОСТ 12090-80. Частоты для акустических измерений. Предпочтительные ряды.
2. Гордиенко В.А. Векторно-фазовые методы в акустике. М.: Физматлит, 2007. 480 с.
3. Исаев А.Е. Патент № 2563603. Способ определения чувствительности по полю гидроакустического приёмника. Опубликовано: 20.09.2015, БИ № 26.
4. Исаев А.Е. Уменьшение влияния переходного процесса при градуировке гидрофонов «по полю» на низких частотах с использованием квадратурно-дополненных гармонических сигналов // Измерительная техника. 2010. № 4. С. 20–24.
5. Исаев А.Е., Матвеев А.Н. Повышение частотного разрешения при обработке акустических сигналов методом скользящего комплексного взвешенного усреднения // Акустический журнал. 2010. Т. 56. № 2. С. 277–283.
6. Исаев А.Е., Черников И.В. Использование реверберационных звуковых полей для метрологических работ в лабораторном гидроакустическом бассейне // Измерительная техника. 2015. № 12. С. 50–54.
7. Исаев А.Е., Черников И.В. Лабораторная градуировка гидроакустического приёмника в реверберационном поле шумового сигнала // Акустический журнал. 2015. Т. 61. № 5. С. 1–9.

8. Yi Chen, Isaev A.E., Yuebing Wang, Enyakov A.M., Teng Fei, Matveev A.N. The COOMET Pilot Comparison 473/RU-a/09: Comparison of hydrophone calibrations in the frequency range 250 Hz to 200 kHz // *Metrologia Tech. Suppl.* 2011. V. 48 - 09004.
9. Yi Chen, Isaev A.E., Matveev A.N., Zihong Ping. COOMET.AUV.W-S1 supplementary comparison of free-field hydrophone calibrations in the frequency range 250 Hz to 8 kHz // *Metrologia Tech. Suppl.* 2015. V. 52 - 09001.
10. 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.
11. Исаев А.Е., Матвеев А.Н., Некрич Г.С., Поликарпов А.М. Комплексная градуировка приёмника градиента давления с использованием процедуры метода взаимности // *Акустический журнал.* 2014. Т. 60. № 1. С. 48–55.
12. Isaev A., Nikolaenko A. Calibration of the receiver for the measurement of ambient underwater noise / *Proceedings of the 45th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering INTER-NOISE 2016.* Germany, Hamburg, 2016, august 21–24. P. 7050–7057.
13. Исаев А.Е., Николаенко А.С., Поликарпов А.М. Чувствительность приёмника при измерениях подводного шума // *Измерительная техника.* 2018. № 09. С. 61–65.
14. Исаев А.Е., Николаенко А.С., Поликарпов А.М. Измерение частотной зависимости коэффициента отражения звука в условиях незаглушённого бассейна // *Измерительная техника.* 2018. № 04. С. 53–56.
15. Исаев А.Е., Цыганков С.Г., Кистович А.В., Николаенко А.С., Черников И.В. Повышение достоверности экспертной оценки инструментальной погрешности измерения УПШ // *Сб. тр. науч.-практ. конф. «Гидроакустика».* Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2015. С. 122–132.
16. Исаев А.Е., Николаенко А.С. Лабораторная калибровка гидроакустического приёмника по полю на низких частотах // *Измерительная техника.* 2018. № 01. С. 54–59.
17. Исаев А.Е., Матвеев А.Н., Некрич Г.С., Поликарпов А.М. Градуировка приёмника градиента давления по полю в отражающем бассейне с применением ЛЧМ сигнала // *Акустический журнал.* 2013. Т. 59. № 6. С. 773–781.
18. Исаев А.Е., Матвеев А.Н. Применение метода скользящего комплексного взвешенного усреднения для восстановления неравномерной частотной характеристики приёмника // *Акустический журнал.* 2010. Т. 56. № 5. С. 651–654.
19. Hayman 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.

20. Исаев А.Е. Точная градуировка приёмников звукового давления в водной среде в условиях свободного поля. Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2008. 369 с.
21. Исаев А.Е. Патент № 2513446. Способ определения амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик чувствительности по полю гидроакустического приёмника. Опубликовано: 20.01.2016, БИ № 2.
22. Исаев А.Е. Патент № 2516607. Способ определения пространственного смещения акустического центра гидрофона относительно его геометрического центра. Опубликовано: 20.05.2014, БИ № 14.
23. Исаев А.Е. Патент № 2509441. Способ определения фазового угла комплексной чувствительности гидрофона методом взаимности. Опубликовано: 10.03.2014, БИ № 7.
24. Исаев А.Е., Николаенко А.С. Калибровка в лабораторном бассейне рекордера с вынесенным гидрофоном // Измерительная техника. 2018. № 07. С. 62–65.
25. Исаев А.Е., Николаенко А.С., Поликарпов А.М. Измерение частотной зависимости коэффициента отражения звука в условиях незаглушённого бассейна // Измерительная техника. 2018. № 04. С. 53–56.
26. Pedersen P.C., Lewin P.A., Vjorno L. Application of time delay spectrometry for calibration of ultrasonic transducers // IEEE Trans. Ultrasonics, ferroelectric and frequency control. 1988. V. 35. N. 2. P. 185–205.
27. Barrera-Figueroa S., Rasmussen K., Jacobsen F. A time-selective technique for free-field reciprocity calibration of condenser microphones // J. Acoust. Soc. Am. 2003. Sept. V. 114 (3). P. 1467–1476.
28. МЭК 50 (801). Международный электротехнический словарь. Гл. 801: Акустика и электроакустика. 1994.