

К ВОПРОСУ О ЗВУКОЗАГЛУШЕНИИ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО БАССЕЙНА

А.Е. Исаев, А.Н. Матвеев, А.М. Поликарпов, И.В. Черников

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

Статья посвящена звукозаглушению метрологического бассейна. Обсуждаются меры акустической защиты для снижения в бассейне шумов. Уделяется внимание конструкции звукопоглощающего покрытия. Приводится первичная измерительная информация. Отдельно ставится вопрос о создании многофункционального метрологического бассейна.

Ключевые слова: метрологические бассейны, звукопоглощающие свойства покрытия, водные поверхности, отражение звука, аспекты эксплуатации.

TO THE ISSUE OF SOUND ABSORPTION OF METROLOGICAL WATER TANK

A.E. Isaev, A.N. Matveev, A.M. Polikarpov, I.V. Chernikov

*FSUE "VNIIFTRI", Mendeleevo, Moscow region
isaev@vniiftri.ru*

The article is devoted to sound absorption of the metrological water tank. Acoustic protection measures for reducing the water tank noise are discussed. Attention is paid to the design of the sound-absorbing covering. Primary measurement information is provided. The question of building a multifunctional metrological water tank is separately raised.

Key words: metrological water tanks, sound-absorbing properties of the covering, water surfaces, sound reflection, operation aspects.

Введение

В связи с трудностями измерений в натуральных (морских) условиях основные научные исследования выполняют в заглушённых измерительных бассейнах, которые во многом аналогичны безэховым камерам с поправкой на разницу в характеристиках среды. В бассейнах выполняют исследования (измерение звукоизоляции, звукозаглушения, калибровку и т.д.) различных видов крупногабаритных макетов и изделий.

Ввиду малых расстояний, проходимых в бассейне звуковой волной даже при её многократных отражениях от поверхностей бассейна, затуханием звука в воде пренебрегают. Водную среду рассматривают как однородную среду с постоянной скоростью звука, пренебрегая незначительным влиянием градиента гидростатического давления по глубине и градиента температуры у границ бассейна, а также возможными течениями конвекционного типа.

При постройке гидроакустических бассейнов (ГАБ) принимаются меры акустической защиты для снижения в бассейне шумов, вызываемых работой промышленных предприятий и транспорта.

Для звукозаглушения внутренних поверхностей бассейна используют звукопоглощающие покрытия из резины с воздушными полостями, смеси бетона и опилок и чисто деревянные (например, из осины и сосны) с целью обеспечить удовлетворительное поглощение звука в требуемых диапазонах частот, температур и гидростатических давлений. При необходимости эти факторы оценивают экспериментами или расчётами.

Такие эксперименты были проведены в измерительном ГАБ размерами 4×4×4 м. Целями эксперимента были оценка звукопоглощающих свойств покрытия стенки бассейна, особенностей измерений звукопоглощения, проблемных аспектов эксплуатации рельефного звукопоглощающего покрытия, сравнение традиционных и вновь разработанных методов измерений звукопоглощения в условиях эксплуатации ГАБ.

Звукопоглощающие свойства покрытия стальной стенки ГАБ оценивали по результатам измерений частотной зависимости коэффициента отражения звука по амплитуде звукового давления. В качестве излучателя использовали источник сферической волны. Поэтому под коэффициентом отражения на частоте гармонического сигнала f понимали отношение амплитуды давления $P_{\text{отр}}(f)$ в звуковой волне, отражённой стенкой бассейна, к амплитуде давления в прямой звуковой волне $P_{\text{пр}}(f)$ при заданном расположении излучателя и гидрофона в бассейне, умноженное на отношение длины пути пробега $r_{\text{отр}}$ отражённой волны к расстоянию $r_{\text{пр}}$ между излучателем и гидрофоном:

$$K(f) = \frac{P_{\text{отр}}(f)}{P_{\text{пр}}(f)} \cdot \frac{r_{\text{отр}}}{r_{\text{пр}}}.$$

Измерения выполняли в диапазоне частот от 1 до 30 кГц при расположении излучателя и гидрофона, показанном на рис. 1.

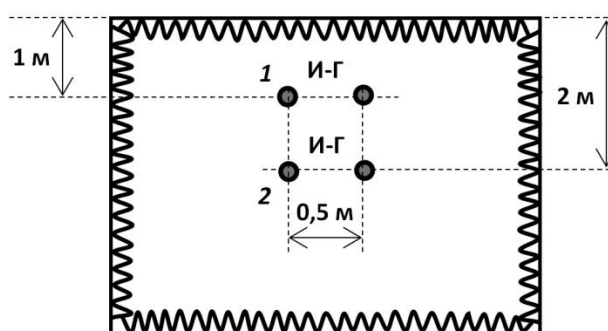


Рис. 1. Расположение пары излучатель — гидрофон (И-Г) в ГАБ (вид сверху):
1 — на расстоянии 1 м от стенки; 2 — в центре бассейна

Конструкция звукопоглощающего покрытия

Звукопоглощающее покрытие стенок в испытуемом ГАБ — резиновые лепестки (разного размера и конфигурации), размещённые на стальных стенках и дне внутри бассейна и на стальных листах элементов заглушения поверхности бассейна.

Особенность установки элементов заглушения поверхности ГАБ — воздушный зазор (показан на рис. 2), образующийся в результате неполного погружения покрытия в воду. Применённый приём имеет целью сбор воздушных пузырьков, увлекаемых под воду при установке покрытия и всплывающих к поверхности в процессе эксплуатации ГАБ. Отметим, что эта цель не будет достигнута, если покрытие укреплено на понтоне. Пузырьки будут скапливаться под понтоном.

В незаглушённом ГАБ ГЭТ 55-2017 (ВНИИФТРИ) начало и окончание отопительного сезона сопровождаются обильным газовыделением до восстановления равновесного состояния растворённого в воде воздуха. Открытая поверхность воды ГАБ ВНИИФТРИ обеспечивает быстрый выход образовавшихся пузырьков в атмосферу.



Рис. 2. Установка элементов заглушения с воздушным зазором на поверхности ГАБ

При постановке преобразователей в испытуемом ГАБ убирают (сдвигают по направляющим) элементы заглушения поверхности бассейна, и во время измерений всегда остаётся открытым участок воды (незаглушённое окно), как это показано на рис. 3.

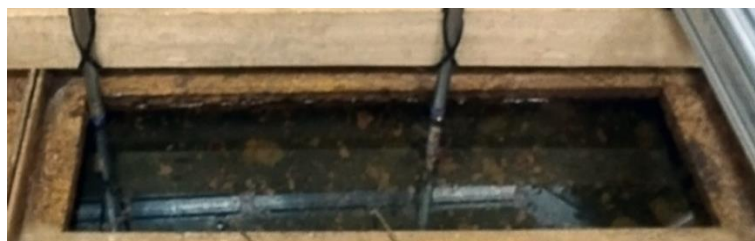


Рис. 3. Незаглушённое окно для постановки штанг с преобразователями в ГАБ

Экспериментами в испытуемом заглушённом ГАБ было показано, что отражения звука от водной поверхности дают основной вклад в искажения принимаемого сигнала. Причиной этого может быть, в том числе, наличие незаглушённых окон и краевые эффекты от покрытия по их периметру. Отметим, что при использовании понтонов со звукопоглощающим покрытием размеры незаглушённых окон и, соответственно, эффект от их влияния многократно увеличиваются.

Результаты измерений

Пару излучатель — гидрофон устанавливали на глубине 2 м на расстоянии 1 м от стальной стенки бассейна параллельно стенке. Расстояние между излучателем и гидрофоном составляло 0,5 м. Измерения выполняли с использованием ЛЧМ [1] и тонально-импульсных сигналов.

Результаты измерения коэффициента отражения от стенки бассейна приведены в таблице 1.

Таблица 1
Результаты измерения коэффициента отражения от стенки бассейна

Частота, кГц	$K(f)$, %	Частота, кГц	$K(f)$, %	Частота, кГц	$K(f)$, %
1	15	5	25	25	75
1,25	20	6,3	15	26,5	100
1,6	30	8	55	26,8	140
2	60	10	17	27,5	110
2,5	50	12,5	62	27,8	170
3,15	30	16	45		
4	70	20	35		

Первичная измерительная информация

На рисунке 4 представлены частотные зависимости, характеризующие искажения прямого сигнала излучателя сигналами, отражёнными всеми поверхностями бассейна. Зависимости представлены для двух расположений пары излучатель — гидрофон в ГАБ, показанных на рис. 1.

Кривой 1 представлена зависимость, полученная при расположении пары преобразователей равноудалённо от стенок, дна и поверхности ГАБ, кривой 2 — пара излучатель — гидрофон, расположенная на расстоянии 1 м от боковой стальной стенки ГАБ (глубина погружения пары не изменялась).

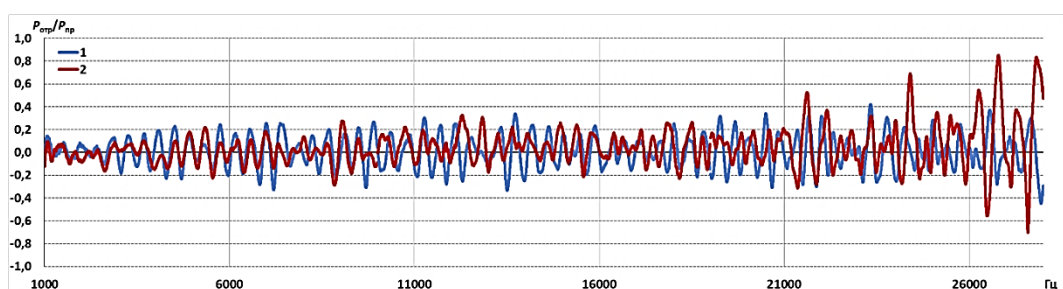


Рис. 4. Частотные зависимости искажений прямого сигнала излучателя отражёнными сигналами при расположении гидрофонов:
1 — в центре бассейна; 2 — на расстоянии 1 м от одной из стенок

При расположении пары вблизи стенки искажения прямого сигнала излучателя сигналами, отражёнными поверхностями бассейна, изменились. При этом зависимость размаха осцилляций от частоты изменилась, а период осцилляционных искажений сохранился и соответствует расстоянию до источника отражений, равному 2 м. Это показывает, что основной вклад в искажения дают не боковые стенки, а дно (грязевые отложения) либо поверхность воды (воздушные пузыри, окна в покрытии для постановки преобразователей) бассейна, расстояния до которых при перемещении пары остались неизменными.

На рисунке 5 кривой 2 приведена зависимость, характеризующая искажения прямой волны излучателя отражениями от ближней стенки ГАБ (влияние отражений от других стенок, дна и поверхности ГАБ подавлены применением техники СКВУ) в диапазоне от 1 до 10 кГц, с учётом отношения $r_{отр} / r_{пр}$.

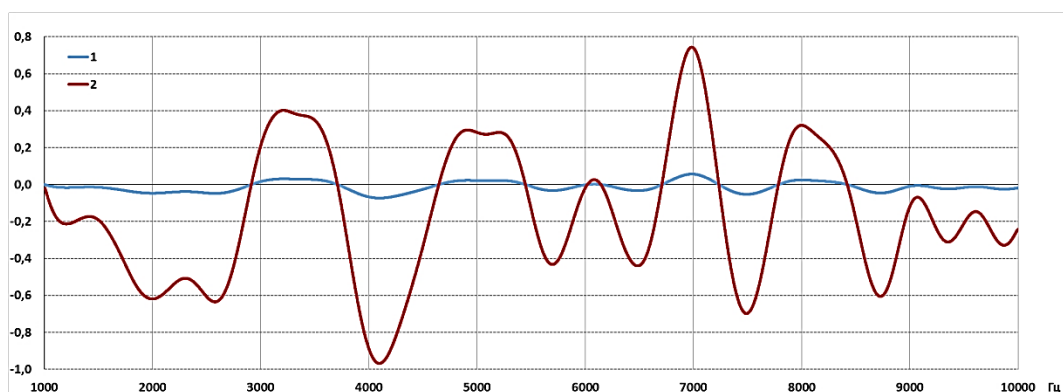


Рис. 5. Частотная зависимость искажений прямого сигнала излучателя:
1 — отражениями от стенки; 2 — умноженная на $r_{отр} / r_{пр}$

Огибающая зависимости, показанной кривой 2, представляет собой частотную зависимость коэффициента отражения $K(f)$. При вычислении параметра $r_{\text{отр}} / r_{\text{пр}}$ использовали расстояние до стальной стенки, поскольку она является источником наиболее значительных отражений (период осцилляционных искажений на рис. 5 соответствует этому расстоянию).

На рисунке 6 зависимостью 1 показана кривая 2 на рис. 5, продолженная по результатам измерений во всём диапазоне частот эксперимента — до 30 кГц. Оценку частотной зависимости коэффициента отражения $K(f)$ (кривая 2 на рис. 6) получили как огибающую зависимости 1, используя преобразование Гильберта. Значения коэффициента отражения на фиксированных частотах приведены в таблице 1.

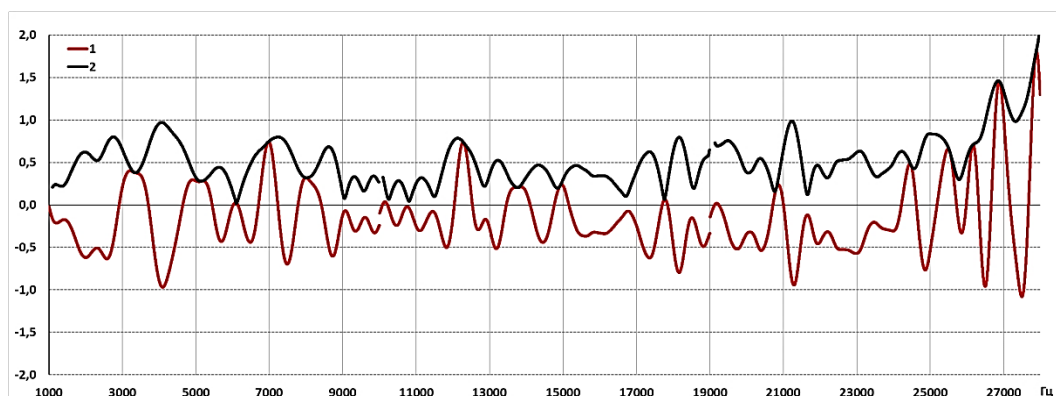


Рис. 6. Частотная зависимость искажений прямого сигнала излучателя:
1 — отражениями от стенки; 2 — её огибающая

Результаты измерений с использованием ЛЧМ-сигналов сопоставили с результатами, полученными тонально-импульсным методом. Длительность импульса l выбирали такой, чтобы разделить во времени прямой и отражённый сигналы. На рис. 7, 9, 10 приведены примеры осциллограмм тональных импульсов. Вертикальными прямыми обозначены: начало приёма (прямой импульс) r_0 , момент прихода отражения от стальной стенки r_1 , момент прихода отражений от других поверхностей бассейна r_2 .

Осциллограмма на рис. 7 типична для частот 26–29 кГц. Начало отражений от звукопоглощающего покрытия опережает отражения от стальной стенки бассейна. Вследствие этого эффективный размер бассейна для измерений по полю уменьшается на удвоенную толщину покрытия (70 см). Это приводит к значительному уменьшению длительности тонального импульса, свободного от отражений, соответственно ограничиваются возможности низкочастотной калибровки. При использовании клиновидного покрытия высотой 1 м уменьшение эффективного размера бассейна составит 2 м.

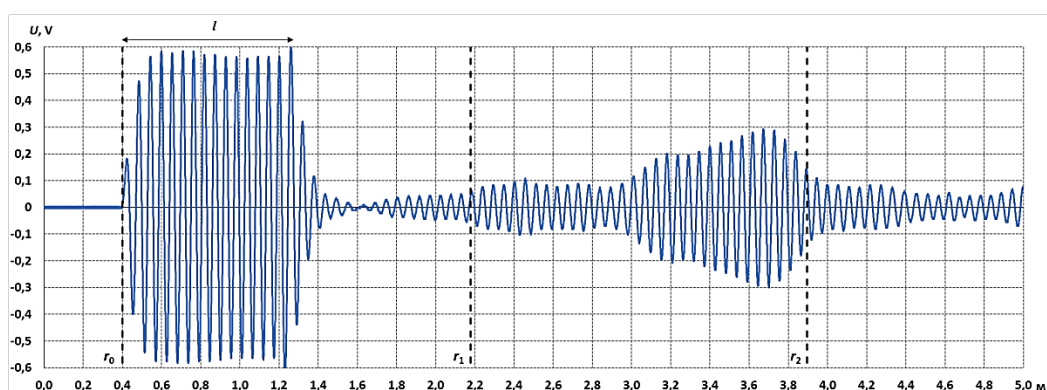


Рис. 7. Осциллограмма прямого тонального импульса и отражённого сигнала

На осциллограмме рис. 7 можно видеть, что отражённый сигнал представляет собой не импульс или последовательность отдельных импульсов, а непрерывный сигнал, причём амплитуда сигнала существенно изменяется во времени. Изменения амплитуды обусловлены влиянием звуковых волн, приходящих в точку приёма от большого числа различных по удалённости от гидрофона участков покрытия стенки. При этом расстояния между соседними отражающими звук участками меньше длины импульса. Длина пробега отражённых покрытием стенки волн составляет от 1,6 м (минимальное расстояние, проходимое отражённой от торцов листов покрытия волной) до 3,6 м (первое отражение от других поверхностей бассейна). В соответствии с использованным определением в формулу вычисления коэффициента отражения следует подставить произведение амплитуды отражённого сигнала на длину пути пробега отражённой волны, которые в условиях эксперимента, как следует из осциллограммы, являются функциями времени. После выполнения этих вычислений с использованием осциллограммы на рис. 7 будет получена зависимость на рис. 8, но не число — искомый коэффициент отражения на частоте. Если коэффициент отражения вычислить по максимуму этой зависимости (участок, завершающий осциллограмму), получим значение близкое к 200%.

Тонально-импульсный метод плохо применим для измерения коэффициента отражений от конструкций, подобных испытуемой, и даёт ошибочную оценку, поскольку на завершающем осциллограмму участке отсутствует вклад первых по времени прихода отражённых импульсов, так же как на начальном участке отражённого сигнала отсутствует вклад поздних по времени прихода отражений. Однако наглядность результатов, получаемых тонально-импульсным методом, — неоспоримое преимущество метода для качественной оценки свойств покрытия. Большие амплитуды отражённого сигнала на рис. 7 и 8 могут служить подтверждением результатов в таблице 1 на частотах 26–29 кГц.

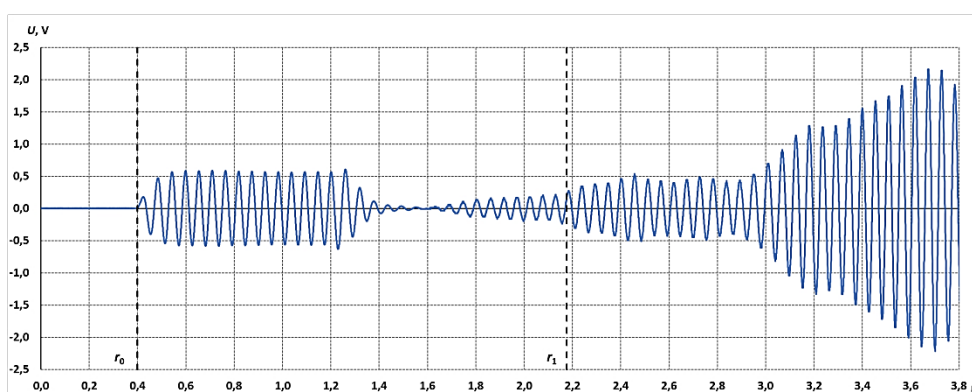


Рис. 8. Выходной сигнал с гидрофона, скорректированный на длину пути пробега отражённой волны

На частоте 12 кГц отражения значительно меньше, чем на частотах 26–29 кГц, и мало изменяются во времени по амплитуде (см. рис. 9). Однако при внимательном рассмотрении на осциллограмме можно обнаружить изломы сигнала, характерные для сложения тональных импульсов с разной фазой.

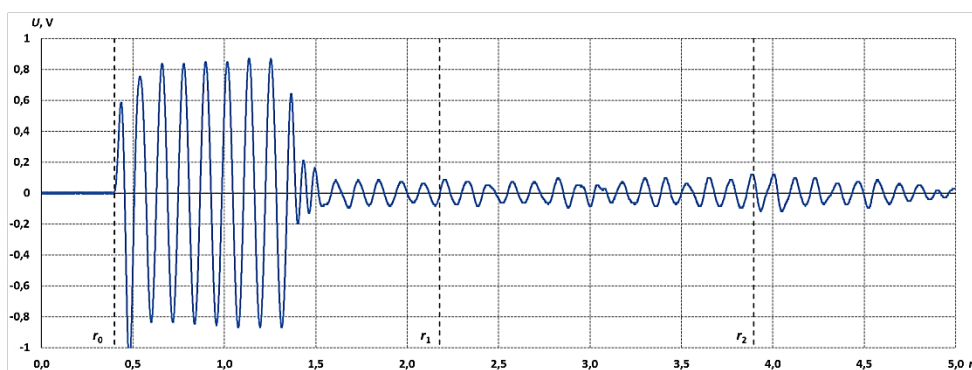


Рис. 9. Осциллограмма принятого сигнала на частоте 12 кГц

Этот эффект ещё более заметен на осциллограмме, представленной на рис. 10, где отражения от различных элементов звукопоглощающего покрытия ещё «удачнее» подавили друг друга.

С увеличением длины волны эффективность звукопоглощения должна ухудшаться. Таким образом, наблюдаемое уменьшение отражённого сигнала с уменьшением частоты (что не согласуется с общепринятыми законами акустики) не результат хорошего поглощения звука, а следствие удачных фазовых соотношений отражённых волн при данном расположении излучателя и приёмника в ГАБ, которые изменятся при другом расположении пары излучатель — приёмник.

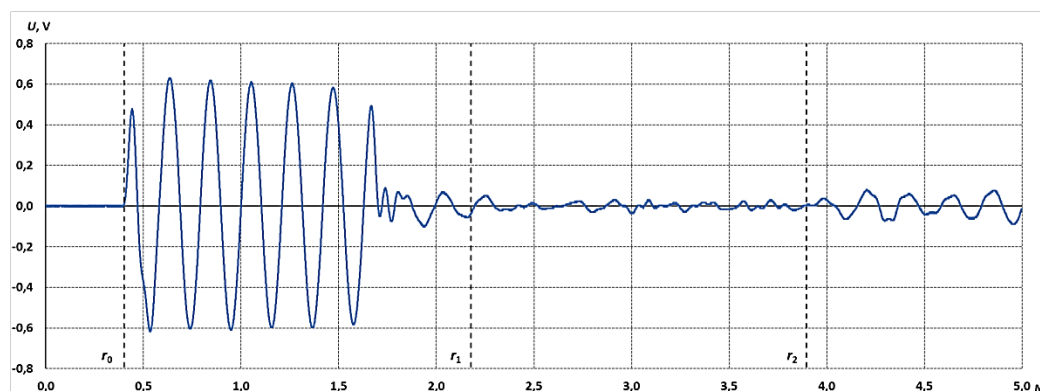


Рис. 10. Осциллограмма принятого сигнала на частоте 7 кГц

Негативные аспекты эксплуатации заглушенного бассейна

Качество водной среды — одна из важнейших характеристик метрологического бассейна. Скрытые под звукопоглощающим покрытием металлические поверхности ГАБ недоступны для периодической антикоррозийной обработки, резина покрытия выделяет сернистые соединения, из-за чего вода быстро загрязняется.

Для очистки поверхности воды от ржавчины в исследуемом ГАБ периодически применяют специальные преобразователи ржавчины на основе кислотных соединений, само покрытие подвержено биообрастанию, вследствие чего приповерхностный слой воды представляет собой маслянистый «бульон» из сернистых соединений, пузырьков воздуха и прилипших к ним частиц грязи, биоорганизмов и ржавчины. Результатами воздействия этой агрессивной смеси стали локальное нарушение герметичности на глубине приповерхностного слоя и вздутие внешней оболочки кабелей, размещённых в ГАБ гидрофонов. Более того, наличие этого «бульона» резко снижает эффективность звукопоглощающего покрытия на поверхности ГАБ.

Чтобы установить источник доминирующих отражений звука в испытуемом ГАБ, расположенную вблизи стенки бассейна пару излучатель — приёмник приподняли по глубине на 40 см. На рисунке 11 представлены зависимости искажений прямого сигнала излучателя отражениями на частотах от 1 до 10 кГц при расположении пары на середине по глубине (кривая 1) и после перемещения пары к поверхности бассейна (кривая 2).

Результатом перемещения стало увеличение периода осцилляций соответственно уменьшению глубины погружения пары. Следовательно, несмотря на принятые меры (неполное погружение элементов заглушения поверхности в воду), основной вклад в искажения даёт источник, который не является стенкой, — поверхность воды ГАБ.

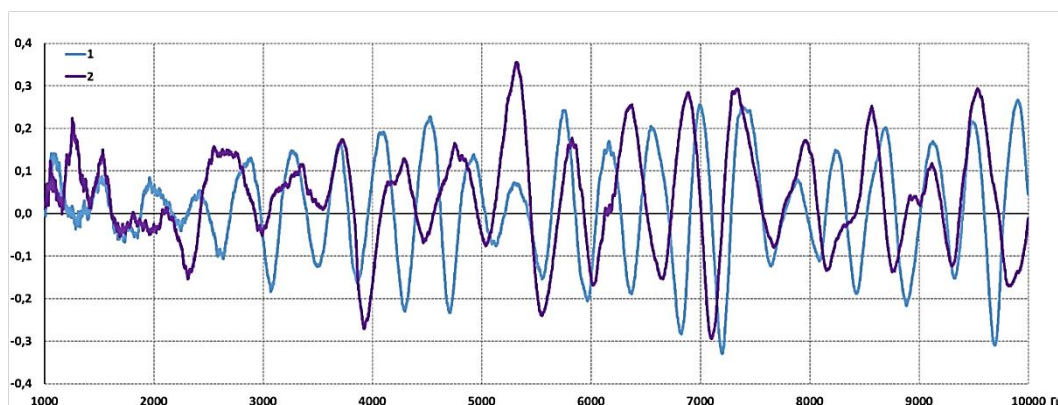


Рис. 11. Частотные зависимости искажений прямого сигнала излучателя отражениями при расположении преобразователей в бассейне:
1 — на середине по глубине; 2 — у поверхности воды

Процессы, аналогичные протекающим в приповерхностном слое воды, происходят по всему объёму бассейна. Загрязнённая таким образом водная среда существенно нестабильна, а её параметры отличаются от параметров чистой воды, используемых в расчётных формулах эталонов. Неоднородность покрытия затягивает процесс удаления пузырьков, образующихся при восстановлении равновесного состояния растворённого в воде воздуха. Присутствие пузырьков, перемещающихся в толще воды, приводит к их осаждению на поверхностях гидроакустических преобразователей и подводных элементах координатных устройств эталона, что приводит к искажению метрологических характеристик как преобразователей, так и эталона. Особую опасность представляет собой возможность скапливания пузырьков на вогнутых поверхностях калибруемых приёмников. Покрытие, укреплённое на понтонах, также становится препятствием выходу пузырьков и скапливает их в приповерхностном слое воды.

Проблемы создания многофункционального метрологического бассейна

Бассейн ВНИИФТРИ создавался, в первую очередь, как эталонный в то время, когда в стране уже существовало большое число опытовых бассейнов различного назначения. Как правило, в опытовых бассейнах применяют звукопоглощающие покрытия. Поскольку никакие покрытия не обеспечивают звукопоглощения, требуемого для точных эталонных измерений, в бассейне ВНИИФТРИ выбор сделан в пользу качества воды. С влиянием звука, отражённого незаглушёнными стенками бассейна, боролись, используя специальные методы измерений.

На протяжении многих лет предметом эталонных измерений в гидроакустике была калибровка гидрофона, который затем устанавливали в габаритную конструкцию морского приёмника звука, буксируемого либо стационарного. Сегодня при калибровке в бассейн необходимо помещать всю конструкцию гидроакустического приёмника в том виде, как она применяется в море. Также возникла необходимость решать в бассейне ряд других метрологических задач, например связанных с моделированием проходной.

С расширением круга решаемых метрологических задач расширяются функции эталонного бассейна, который превращается в многофункциональный метрологический бассейн. При создании такого бассейна возникает проблема выбора компромиссного решения между эталонными и другими измерениями.

Например, моделирование в ГАБ проходной предполагает измерения в условиях преобладания прямой волны движущегося источника, при этом подавить влияния отражённых волн существующими эталонными методами крайне затруднительно. Очевидно, что для таких задач необходимо ослабить отражения звука в ГАБ покрытием.

Рассчитывать на пригодное для эталонных измерений звукопоглощение в бассейне, как и в воздушной безэховой камере, не приходится. С другой стороны, отражение звука не является доминирующей составляющей бюджетов неопределённостей отечественного ГПЭ ГЭТ 55-2017. То же относится и к национальным эталонам других стран. Метрологические бассейны Национальной физической лаборатории Великобритании и Национального института океанских технологий Индии незаглушённые. В Ханчжоусском исследовательском институте прикладной акустики (Китай) бассейн заглушённый — аналог опытового ГАБ. При эталонных измерениях влияние «остаточной» реверберации звука исключают, применяя тонально-импульсный метод либо технику СКВУ. Бассейн Национального метрологического института Турции незаглушённый. Боковые стены бассейна имеют окна, что позволяет использовать луч лазера для прецизионного позиционирования тестируемого объекта в подводном положении. Качество, прозрачность и стабильность водной среды в бассейне обеспечивают, применяя современные системы подготовки воды, которые в непрерывном режиме осуществляют её очистку от механических примесей, деаэрацию, биологическую очистку, стабилизацию температуры; грязь со дна и стенок убирают подводным пылесосом.

В отечественных измерительных бассейнах применяют покрытия в виде приклеенных к стенкам ГАБ плоских листов резины, что допускает возможность их механической очистки. Например, производят раз в два–три года регламентную очистку ГАБ с полной заменой воды и отмыванием поверхностей покрытия стенок и дна. Недостаток очистки воды путём полной её смены — длительная (до 2-х месяцев) неработоспособность ГАБ из-за ожи-

дания отстоя воды для достижения равновесного состояния растворенного воздуха. Более сложная (существенно рельефная) конструкция покрытия измерительного ГАБ делает невозможным его периодическую очистку. В незаглушённом ГАБ ВНИИФТРИ с момента его ввода в эксплуатацию полная смена воды не проводилась — объём чистой и отстоявшейся воды бассейна ежегодно пополняется доливом по мере испарения.

Как было упомянуто выше, функциональность метрологического бассейна расширяется при наличии звукопоглощающего покрытия. При конструировании безэховых камер в воздушной акустике используют открытые данные по различным видам звукопоглощающих материалов и конструкций. При выборе покрытия для ГАБ такая информация недоступна. Очевидно, что чем меньше коэффициент отражения от покрытия, тем меньше акустическая помеха в ГАБ. Но какие-либо точные количественные оценки об искажении звукового поля на основе коэффициента отражения сделать затруднительно, поскольку в ГАБ звуковое поле формируется как отражениями, так и многократными переотражениями звука от всех стенок, включая поверхность воды. Поэтому до постройки бассейна об искажениях звукового поля можно судить только качественно.

Эффект от применения звукозаглушающего покрытия может оказаться хуже прогнозируемого. Методы обработки, основанные на подавлении влияния отражений (например, техника СКВУ), работают хуже при наличии рельефного покрытия ГАБ, когда отражения «размазаны» по пространству. Однако это ухудшение работы методов в определённой степени будет компенсировано ослаблением волн, отражённых покрытием.

Более важно, чтобы расширение метрологических возможностей за счёт звукопоглощающего покрытия не привело к фатальному ухудшению качества водной среды в ГАБ. Представленные в статье результаты исследований — наглядный пример этой проблемы.

Для оценки качества опытового бассейна (не путать с метрологическим ГАБ) применяют не коэффициенты отражения на частоте, а интегральные характеристики — звукопоглощение ГАБ. Для этого используют подходы, аналогичные принятым в воздушной акустике, например основанные на времени реверберации (формулы Эйринга и Сэбина). Однако эти формулы дают приемлемую точность, если все отражающие поверхности помещения близки по своим акустическим свойствам. С бассейном часто дело обстоит не так. Если в ГАБ дно и стенки не отражают, а поверхность воды отражает 100%, то подходы на основе реверберации не дадут хорошего результата.

Для оценки покрытия опытовых ГАБ применяют специальные методики [2, 3], которые дают оценку качества звукопоглощения в бассейне в целом. Однако для бюджета составляющих неопределённости эталонных измерений такие оценки информации не дают.

Литература

1. Исаев А.Е., Николаенко А.С., Поликарпов А.М. Измерение частотной зависимости коэффициента отражения звука в условиях незаглушённого бассейна // Измерительная техника. 2018. № 4. С. 53–56.
2. МИ 1939-88. Бассейны гидроакустические для измерения электроакустических параметров преобразователей и антенн / Методика аттестации. НПО ВНИИФТРИ, 1988.
3. Методика периодической аттестации опытовых бассейнов № 1, 2. Концерн «Океанприбор», 2014.