## УДК 534.6.08 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НЕБОЛЬШИХ ОБРАЗЦОВ МАТЕРИАЛОВ В ДИАПАЗОНЕ НИЗКИХ ЧАСТОТ Г.С. Некрич, А.И. Щелкунов

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл. glebns@mail.ru vniiftri@list.ru

Рассмотрена проблема определения гидроакустических свойств небольших образцов материалов в малых измерительных камерах в диапазоне низких частот. Приведены результаты определения коэффициентов отражения с применением математического моделирования. Предложена схема установки для измерения гидроакустических параметров материалов.

Ключевые слова: гидроакустические свойства, низкие частоты, коэффициенты отражения, параметры материалов, математическое моделирование.

## USE OF MATHEMATICAL MODELING IN DETERMINING HYDROACOUSTIC PROPERTIES OF SMALL SAMPLES OF MATERIALS IN THE RANGE OF LOW FREQUENCIES G.S. Nekrich, A.I. Shchelkunov

FSUE "VNIIFTRI", Mendeleevo, Moscow region glebns@mail.ru vniiftri@list.ru

The problem of determining the hydroacoustic properties of small material samples in small measuring chambers in the low frequency range is considered. The results of determining reflection coefficients using mathematical modeling are presented. The diagram of facility for measuring the hydroacoustic parameters of materials is proposed.

Key words: hydroacoustic properties, low frequencies, reflection coefficients, material parameters, mathematical modeling.

Измерение акустических параметров материалов и конструкций на их основе является важной задачей в гидроакустике. Эти параметры используются в гидролокации, картографии, профилировании дна, разведке и добыче полезных ископаемых, береговом и шельфовом строительстве, поиске затонувших объектов, а также при обнаружении надводных и подводных объектов и судов.

В общем случае акустические свойства материала характеризуются способностью отражать (коэффициент отражения), поглощать (коэффициент

поглощения) и пропускать (коэффициент пропускания) падающие на него акустические волны. В воздушной акустике исследуемый объект помещают в звукозаглушенную либо в реверберационную камеру, но гидроакустический лабораторный бассейн даже с применением дорогостоящих заглушающих покрытий не удаётся превратить в безэховую камеру, сопоставимую по качеству с акустической заглушенной камерой, равно как и создаваемое реверберационное поле отражающего бассейна является слабым приближением акустического поля реверберационной воздушной камеры. В результате использовать напрямую определения и термины ультразвуковой и воздушной акустики, характеризующие акустические параметры материалов, равно как и применять методы измерений этих параметров в гидроакустических измерениях, невозможно. Необходима их адаптация к измерениям в водной среде в поле сферической звуковой волны.

Большинство широко распространённых методов определения акустических свойств материалов в гидроакустическом бассейне ограничены размерами бассейна и образца исследуемого материала и не позволяют спуститься ниже 500–1000 Гц. Зачастую заказчик не может предоставить на исследования образец материала необходимого размера. Также часто требуется определить акустические параметры в диапазоне частот ниже 1000 Гц.

Таким образом, использование гидроакустического бассейна для исследований акустических параметров материалов в диапазоне частот ниже 1000 Гц затруднено, но в то же время в нашем распоряжении имеется обширный парк гидроакустической аппаратуры, имеющей в своём составе измерительные камеры, конструктивно схожие с трубой Кундта [1, 2]. Практически без изменения конструкции этих камер, используя несложную дополнительную оснастку, они позволяют проводить исследования акустических свойств образцов материалов в них.

Для исследований была выбрана камера КИДНЧ из состава рабочего эталона единицы звукового давления в водной среде в диапазоне частот 1–2000 Гц (РЭДНЧ). Диапазон рабочих частот акустического интерферометра определяется размерами акустической трубы — измерительной камеры. Его граничные частоты:

$$f_{\text{мин}} = v / 4L$$
 и  $f_{\text{макс}} = v / 2D$ ,

где v — фазовая скорость звука в среде, заполняющей камеру; D — диаметр измерительной камеры; L — её длина [3]. Расчётные граничные частоты для камеры КИДНЧ составили:  $f_{\text{мин}} = 535 \, \Gamma$ ц и  $f_{\text{макс}} = 5 \, \kappa \Gamma$ ц.

Если обозначить отношение максимального и минимального значений звукового давления в стоячей волне внутри акустической трубы для каждой данной частоты через  $n = P_{\text{max}} / P_{\text{min}}$ , то коэффициент звукопроникновения образца материала при нормальном падении звуковой волны будет равен [4]:

$$K_{\text{прн}} = 4 / (2 + n + 1 / n).$$

Альманах современной метрологии, 2019, № 4 (20)

Ниже в таблице 1 приведены результаты измерения коэффициентов проникновения для различных материалов на частоте 3 кГц, полученные при использовании измерительной камеры КИДНЧ в качестве акустического интерферометра [5]. Учитывая, что  $K_{\text{отр}} + K_{\text{прн}} = 1$ , легко определить значение коэффициентов отражения для данных материалов. Видно, что полученные результаты неплохо согласуются с теорией.

Таблица 1

## Результаты измерения коэффициентов проникновения различных материалов

	Отражающий материал						
Показатель	Вспененный полиэтилен толщиной 2 см	Пенопласт толщиной 1,5 см	Поролон толщиной 1,5 см				
Коэффициент звуко- проникновения, <i>К</i> <sub>прн</sub>	0,06	0,08	0,24				
Коэффициент отражения, К <sub>отр</sub>	0,94	0,92	0,76				

Основной трудностью рассмотренного выше способа является экспериментальное определение точек пространства внутри измерительной камеры, в которых необходимо произвести измерение  $P_{\text{max}}$  и  $P_{\text{min}}$ . С другой стороны, известно, что распределение звукового давления в цилиндрической камере с заглушенным отражающим торцом имеет вид [6]:

$$P(x) = P_1 e^{ikx} + P_2 e^{-i(kx + \varphi)},$$
(1)

где  $P_1$  — давление в прямой волне;  $P_2$  — давление в отражённой волне;  $k = 2\pi f / c$  — волновое число;  $\varphi$  — разность фаз между прямой и отражённой волнами. Таким образом, зная форму распределения давления, частоту, расстояние от отражателя, скорость звука, а также значения давлений в нескольких известных точках пространства, используя математическое моделирование, можно достаточно точно восстановить форму пространственного распределения звукового давления и определить значение коэффициента отражения.

Для реализации эксперимента по восстановлению формы пространственного распределения звукового давления в измерительной камере был собран макет установки, структурная схема которого представлена на рис. 1.

Анализатор спектра позволяет генерировать синусоидальные сигналы с задаваемыми амплитудой и частотой, а также принимать и обрабатывать их.

Входное устройство предназначено для согласования и передачи сигнала с выхода гидрофона на вход АЦП анализатора.



Рис. 1. Структурная схема установки

Усилитель мощности предназначен для передачи и усиления сигнала с ЦАП анализатора на излучатель измерительной камеры.

Устройство перемещения гидрофона служит для позиционирования измерительного гидрофона внутри измерительной камеры на определённой глубине.

Управляющая система представляла собой персональный компьютер с установленным программным обеспечением, позволяющим управлять анализатором спектра и обрабатывать полученные результаты.

Измерительная камера представляет собой полый, заглушенный снизу металлический цилиндр с толщиной стенок 0,05 м, высотой 0,7 м и внутренним диаметром 0,15 м, изготовленный из алюминиевого сплава. В верхней части камеры установлен электродинамический излучатель, исследуемый образец материала устанавливается на дно камеры. Схематично камера представлена на рис. 2.



Рис. 2. Измерительная камера

Альманах современной метрологии, 2019, № 4 (20)

В процессе измерений гидрофон устанавливался на расстоянии 0,05 м от исследуемого образца, и на излучатель подавался сигнал с определённой частотой 1/3-октавного ряда (от 500 до 4000 Гц). Измерялось давление в точке, а затем гидрофон перемещался вверх вдоль оси камеры на 0,05 м. Таким образом получали распределение величины звукового давления по глубине и его зависимость от частоты.

Для проверки корректности применяемой процедуры восстановления функции распределения давления и расчёта коэффициента отражения в качестве тестируемого материала использовалось дно измерительной камеры, коэффициент отражения которого близок к 0,9. Модуль коэффициента отражения рассчитывали по формуле [6]:

$$K_{\text{orp}} = (n-1) / (n+1),$$
 (2)

где  $n = P_{\text{max}} / P_{\text{min}}$  — коэффициент стоячей волны. Результаты измерений и восстановления представлены на рис. 3.



Альманах современной метрологии, 2019, № 4 (20)

Результат расчёта коэффициента отражения представлен в таблице 2 и на рис. 4.

	•				-					
Частота, Гц	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000
Коэффициент	0,91	0,88	0,83	0,88	0,91	0,87	1,00	0,9	0,91	0,81
отражения										





Рис. 4. Зависимость коэффициента отражения от частоты

Отклонение от известного значения (0,9) не превысило 10%. Таким образом, подтверждается корректность процедуры восстановления распределения давления и определения коэффициента отражения.

На следующем этапе был проведён эксперимент по определению коэффициента отражения исследуемого образца резины. На дно камеры поместили образец резины диаметром, равным диаметру измерительной камеры, и толщиной 0,08 м. Затем провели измерения звукового давления в десяти точках на различной глубине с шагом 0,05 м на частотах третьоктавного ряда в диапазоне от 0,5 до 4,0 кГц. Результаты измерений представлены в таблице 3.

Таблица 3

Таблица 2

Частота,	, Расстояние от тестируемого образца до гидрофона, м									
Гц	0,04	0,09	0,14	0,19	0,24	0,29	0,34	0,39	0,44	0,49
500	1,03	1,31	1,63	1,89	2,14	2,33	2,52	2,72	2,86	2,89
630	1,05	1,42	1,95	2,29	2,73	3,01	3,30	3,52	3,65	3,69
800	8,08	10,27	13,16	14,98	16,77	17,48	18,48	18,20	17,97	16,39
1000	1,44	2,03	2,69	3,05	3,42	3,46	3,55	3,22	2,92	2,33
1250	1,32	1,87	2,59	2,87	3,08	2,94	2,67	2,10	1,48	0,88
1600	1,45	1,97	2,45	2,43	2,29	1,71	0,99	0,43	1,19	1,89
2000	3,91	4,90	5,08	4,21	2,68	1,51	2,53	4,02	5,09	4,85
2500	5,77	6,38	6,01	4,41	3,71	4,79	6,29	6,44	5,55	3,99
3150	3,61	4,76	4,64	3,26	2,86	4,40	4,91	3,59	2,50	4,37
4000	2,24	2,81	1,69	1,11	2,32	1,91	1,11	2,42	2,51	1,02

Результаты измерений давления в камере, Па

Полученные значения давления обрабатывались в среде MathCad, где при помощи его встроенных функций восстанавливались функции распределения давления в камере по глубине вида (1), затем определялись минимальные и максимальные значения этих функций и по формуле (2) высчитывались коэффициенты отражения для каждой частоты. На рисунках 5а и 5б показаны результаты измерений и восстановленные функции распределения давления по глубине камеры.



распределения давления по глубине камеры

Альманах современной метрологии, 2019, № 4 (20)

130 Јидроакустические приборы и системы



Рис. 56. Результаты измерений и восстановленные функции распределения давления по глубине камеры

В таблице 4 и на рис. 6 представлена полученная в ходе измерений зависимость коэффициента отражения исследуемого образца резины от частоты.

Таблица 4

Зависимость коэффициента отражения от частоты

Частота, Гц	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000
Коэффициент отражения	0,64	0,65	0,5	0,52	0,54	0,68	0,55	0,25	0,29	0,45



Рис. 6. Зависимость коэффициента отражения от частоты

Также была проведена оценка минимально необходимого количества точек для корректного восстановления функции распределения давления по глубине камеры. Для этого при восстановлении функции распределения давления в измерительной камере по глубине последовательно исключалась часть результатов измерений, и полученный результат восстановления сравнивался с исходным. Выяснилось, что для уверенного восстановления (максимальная ошибка менее 5%) достаточно 4 измерений, но необходимо получить значения на как можно более протяжённом отрезке (приближенном к расстоянию, равному четверти длины волны излучаемого звукового сигнала). Результаты восстановления функции распределения давления по глубине на частоте 1000 Гц по разным наборам точек представлены на рис. 7–10.





Альманах современной метрологии, 2019, № 4 (20)







Рис. 10. Восстановление по четырём средним точкам

Исходя из полученных результатов, были сделаны следующие выводы:

- для уверенного восстановления функции распределения давления по глубине камеры достаточно произвести измерение давления в пяти точках;
- значения давления должны быть измерены на отрезке длиной близкой к четверти длины волны излучаемого сигнала, и по крайней мере одно измерение должно быть как можно ближе к месту минимума;
- для уменьшения влияния нестабильности излучателя и акустического поля в камере необходимы единовременные измерения давления в пяти точках.

С учётом вышеизложенных замечаний модифицированная структурная схема установки для определения акустических свойств материалов приобретает вид, представленный на рис. 11.

Альманах современной метрологии, 2019, № 4 (20)



Г1, Г2, Г3, Г4, Г5 – измерительные гидрофоны

Рис. 11. Модифицированная структурная схема установки для определения акустических свойств материалов

## Литература

- Щелкунов А.И. Установки ФГУП «ВНИИФТРИ» для низкочастотной градуировки гидрофонов // VI Международная научно-техническая конференция «Судометрика 2016». СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2016. С. 162– 164.
- 2. Исаев А.Е., Матвеев А.Н, Некрич Г.С., Сильвестров С.В. Эталонные установки для воспроизведения и передачи единицы колебательной скорости водной среды в диапазоне частот от 5 до 10000 Гц // Вестник метролога. 2017. № 1. С. 14–20.
- Химунин А.С. Интерферометр акустический // Большая российская энциклопедия. Т. 11. Москва, 2008. С. 466.
- 4. Клюкин И.И. Акустические измерения в судостроении. 3-е изд. Л.: Судостроение, 1982. С. 134–135.
- Некрич Г.С., Щелкунов А.И. Измерение коэффициентов отражения материалов в камерах малого объёма установок для градуировки гидроакустических преобразователей // VII Международная научно-техническая конференция «Судометрика 2018». СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2018. С. 101–103.
- 6. Тюлин В.Н. Введение в теорию излучения и рассеяния звука. М.: Наука, 1976. С. 51–61.
- 7. Лепендин Л.Ф. Акустика. М.: Высшая школа, 1978. С. 124–133.