

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

УТВЕРЖДАЮ  
Руководитель ОКД  
\_\_\_\_\_ Суржиков А.П.  
«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г.

## **ИЗУЧЕНИЕ ПОГЛОЩЕНИЯ ЗВУКА В МАТЕРИАЛАХ**

**Методические указания**  
к проведению лабораторной работы по курсу:  
«Акустический контроль и диагностика»  
для студентов, обучающихся по направлению:  
12.04.01 – «Приборостроение»

Томск 2018

УДК 620.179.14

Изучение поглощения звука в материалах. Методические указания к проведению лабораторной работы по курсу: «Акустический контроль и диагностика» для студентов, обучающихся по направлению: 12.04.01 – «Приборостроение».

Составители:           ведущий эксперт ОКД ИШНКБ ТПУ Капранов Б.И.  
                                  доцент ОКД ИШНКБ ТПУ Калиниченко А.Н.

Методические указания рассмотрены и одобрены на заседании  
ОКД ИШНКБ « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 201\_\_ г. протокол № \_\_.

Руководитель ОКД

д.ф.-м.н. \_\_\_\_\_ А.П.Суржиков

## 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Определить коэффициент поглощения звука для материалов: сталь, дюралюминий и оргстекло.
2. Вычислить рабочий декремент затухания для тех же материалов и частот.
3. Вычислить добротность для тех же материалов и частот.

## 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

### 2.1 Поглощение звука

Поглощение звука – это явление необратимого перехода энергии звуковой волны в другие виды энергии, в частности в тепло. Поглощение звука характеризуется коэффициентом поглощения  $\alpha$ , определяемым как обратная величина расстояния, на котором амплитуда звуковой волны уменьшается в  $e$  раз.

Значение коэффициента  $\alpha$  определяет ослабление амплитуды звуковой волны при прохождении участка среды толщиной  $dx$ :

$$d\sigma(x) = -\alpha dx \quad (1)$$

В предположении постоянства  $\alpha$  при всех  $x$ , численное значение  $\alpha$  определяет экспоненциальное ослабление амплитуды звуковой волны  $\sigma$  по мере ее перемещения в среде:

$$\sigma(x) = \sigma_0 e^{-\alpha x}, \quad (2)$$

где  $\sigma_0$  – амплитуда звуковой волны на входе в материал. Или экспоненциальное ослабление интенсивности звуковой волны  $I$ :

$$I(x) = I_0 e^{-\alpha x}, \quad (3)$$

где  $I_0$  – интенсивность звуковой волны на входе в материал.

Коэффициент поглощения  $\alpha$  выражается в  $\text{см}^{-1}$ , т.е. в неперах на сантиметр, или в децибелах на сантиметр:

$$1 \text{дб} / \text{см} = 0,115 \text{неп} / \text{см}.$$

Поглощение звука характеризуется также коэффициентом потерь  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = \frac{\alpha \cdot \lambda}{\pi}, \quad (\text{безразмерное}), \quad (4)$$

где  $\lambda$  – длина звуковой волны, [см];  
добротностью  $Q$ :

$$Q = \frac{1}{\varepsilon} = \frac{\pi}{\alpha \cdot \lambda}, \quad (\text{безразмерное}). \quad (5)$$

## 2.2 Газы

Поглощение звука в газе зависит, при постоянной температуре, от частоты  $f$  и от давления  $P$ . Даже небольшие примеси посторонних газов так же существенно изменяют  $\alpha$ . Например,  $\alpha$  воздуха изменяется при изменении его влажности почти на порядок. В таблице 4 приведены значения  $\alpha/f^2$  для некоторых газов и паров.

Таблица 4 – Коэффициент поглощения звука  $\alpha$  в газах и парах

Вещество	$t, ^\circ\text{C}$	$f, \text{кГц}$	$P, \text{атм.}$	$\alpha, \text{неп}$	$\frac{\alpha}{f^2 \cdot 10^3}, \text{сек}^2/\text{см}$
Аргон	19,9	598,9	0,97		1,35
Азот	20,2	4250	1		1,9
	-	500	0,574	0,0834	
	-	-	0,477	0,0930	
		-	0,329	0,138	
		-	0,224	0,212	
		-	0,182	0,255	
Ацетон	-	97,8	-	0,5	
Бензол	-	97,8	-	1,0	
Водород	19,9	598,9	1		3,58
Влздух	-	-	-	0,697	1,85
Гелий	17,5	598,9	0,99		2,96
Кислород	19,6	598,9	0,99		1,68
Ксенон		500	0,544		0,15
		-	0,243		0,345
		-	0,090		0,930
Метиловый спирт		97,8		0,05	
Неон	19	304,4	0,65		5,82
Окись азота	16,3	598,9	0,95		1,83
Окись углерода	18,7	304,4	0,85		5,78
Сероуглерод		97,8		1,2	
Углекислый газ	16,6	304,4	0,98		27,1
Хлористый метилен		97,8		0,7	
Хлороформ		97,8		0,7	
4-х хлористый углерод		97,8		0,35	
Этиловый спирт		97,8		0,7	
Этиловый эфир		97,8		0,2	

### **2.3 Жидкости**

Поглощения звука в жидкостях в основном определяется вязкостью (как сдвиговой, так и объемной). В большинстве жидкостей экспериментальные значения коэффициента поглощения существенно превышают значения, даваемые классической теорией из-за большого вклада релаксационных процессов, приводящих к дополнительному затуханию звука.

Качественный характер частотной зависимости  $\alpha \sim f^2$ , сохраняется до высоких ультразвуковых частот. Коэффициент поглощения в жидкостях обычно сильно зависит от температуры. Температурные кривые имеют максимум, величина и положение которого зависят от частоты: с увеличением частоты максимум сдвигается в сторону больших температур и  $\alpha$  растет. Это связано с уменьшением времени релаксации. Поглощение звука в морской волне велико и так же зависит от температуры и солености. В жидких металлах большой вклад в поглощение звука дает теплопроводность.

Значение коэффициентов поглощения для некоторых жидкостей приведены в таблице 5.

### **2.4 Высокополимеры, резины и пластмассы**

Поглощение звука в таких материалах сильно зависит от состава и структуры материала. В этих веществах определяющий вклад в  $\alpha$  вносят релаксационные процессы, причем с широким спектром времен релаксации. Под действием ультразвуковых волн происходит сворачивание и разворачивание клубков молекул полимеров. Зависимость  $\alpha$  от температуры имеет один или несколько максимумов, положение которых зависит как от материалов, так и от частоты звука. С ростом частоты положение максимумов смещается в сторону больших температур. Значение  $\alpha$  для некоторых полимерных материалов даны в таблице 6.

Таблица 5 – Коэффициенты поглощения звука в жидкостях

Вещество	t, °С	f, кГц	$\frac{\alpha}{f^2 \cdot 10^3}$ , сек <sup>2</sup> /см	
Ацетон	20	307	27,2	
		5-70	30	
Бензол	20	307	755	
Вода	20	7-250	25	2,5
Метилловый спирт	24,1	104,1	30,1	
Вода	20	307	24,7	
	20	482	23,8	
Толуол	20	307	77,8,	
	20	482	78,5	
	20	643	81,0	
	20-25	1-75	80,0	
Этиловый спирт	20-25	1-220	54,0	5,4
Бензин		0,15-1,0	958	
Глицерин	-18,8	30	12700	
	20-27	0,15-4	2500	250
	32,8	30	1410	
Касторовое масло	18,6	3,16	10900	
	21,4	15,7	2100	
	21,5	4,3	4500	
	21,6	3,95	8400	
Уксусная кислота	18	0,5	90000	9000
	18	67,5	158	
	24,7	104,0	153,0	
Керосиновое масло		6-21		170
Трансформ. Ртуть		1/-5		130
		20-50		1,2-1,3

Таблица 6 – Коэффициент поглощения звука  $\alpha$  в полимерных материалах для продольной волны, [см<sup>-1</sup>]

Вещество		Р, г/см <sup>3</sup>	1,2 МГц	1,75 МГц	2,5 МГц	4,0 МГц	10,0 МГц
Эпоксидная смола с наполнением <i>PbO</i> Содержание <i>PbO</i> весовых %	0	1,16	0,47	7,2	8,9	16,5	
	30	1,37	4,8	7,6	10,6	18,0	
	50	1,98	4,3	13,0	17,0	22,0	
	70	2,58		34,0	43,5		
Эпоксидная смола с наполнителем <i>W</i> Содержание <i>W</i> весовых %	20	1,38	6,2	8,5			
	50	2,19	11,5	19,0			
	80	3,82	18,0	47,0			
Эпоксидная смола с наполнителем <i>Pb<sub>3</sub>O<sub>4</sub></i> Содержание <i>Pb<sub>3</sub>O<sub>4</sub></i> весовых %	30	1,49	2,3	3,9			
	50	1,95	5,3	8,0	1,25		
Резина							100-500
Фторопласт			6,0	11,5	167,0	27,0	65,0
Стекловолокно		6,0(4,0)	6,0(4,0)*		11,0(7,5)*		
Эбонит				5,0	8,0	17,0	36,0
Оргстекло			4,0		50,	6,0	12,0
Полистирол				0,8	1,0	1,5	3,5

\* – поперек волокон (вдоль волокон)

## 2.5 Твердые тела

В твердых телах поглощение звука различно для продольных и поперечных волн. Это связано как с различием скорости звука для этих волн, так и с тем, что поглощение звука для продольных и поперечных волн могут давать вклад различные механизмы.

Поглощение звука в твердых телах определяется в основном внутренними трением и теплопроводностью среды, а на высоких частотах и при низких температурах – различными процессами взаимодействия ультразвуковых и

гиперзвуковых волн с внутренними возбуждениями в твердом теле, такими, как тепловые колебания решетки, электроны, спиновые волны и пр.

Во многих твердых телах при не очень высоких частотах  $\alpha$  изменяется пропорционально первой степени частоты, и поэтому величина добротности  $Q$  не зависит от частоты.

В таблице 7 приведены значения  $\alpha$  некоторых твердых веществ.

Таблица 7 – Коэффициенты затухания для твердых веществ

Вещество	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Продольные волны f=2÷100 кГц		Коэффициент потерь, $\delta \cdot 10^4$	Поперечные волны	
		$\alpha$ (неп)	$\alpha/f \cdot 10^9$ , сек/см		$\alpha$ (неп)	Коэффициент потерь, $\delta \cdot 10^4$
Алюминий	2,68		0,61			
Магний	1,705		1,08			
Сталь:						
вольфрамуглерод	8,52		0,38			
молибденовая	8,39		1,42			
нержавеющая				4,4		
Кварц плавлен.	2,2		1,23			
Стекло:						
пирекс	2,32		4,89			
оконное	2,42		6,35			
свинцовое	2,48		3,21			
зеркальное		3,8				
крон						2,38
Микалекс	3,34		2,03			
Дерево (дуб)		2,8				
Гипс		2,7				
Глина		1,4				
Свинец (1,16:15 кГц)				280		290
Медь				5,2		
Латунь Л59				2,4		
АМГ-6				3,0		

## 2.6 Импульсный метод измерения поглощения звука

Методы измерения поглощения УЗ разнообразны и зависят от вещества, диапазона частот, величин  $\alpha$ . Во всех методах измерения важно выделить истинное поглощение и отделить его от других явлений, приводящих к уменьшению амплитуды звука (сферическое расхождение, дифракционные эффекты, рассеяние и пр.). Известны следующие основные методы поглощения звука: методы, основанные на измерении радиационного давления звука или непосредственном измерении амплитуды звуковой волны в зависимости от расстояния; метод УЗ интерферометра; метод реверберации; метод оптический; калориметрический метод; импульсный метод. Из всех перечисленных методов импульсный является наиболее точным и универсальным. Он позволяет измерять поглощение с точностью до нескольких процентов.

Суть метода состоит в том, что в образце перпендикулярно его плоскопараллельным граням вводится УЗ импульс. Наблюдая многократные отражения этого импульса от параллельных торцов образца, можно судить, как быстро в зависимости от времени и пройденного расстояния последовательно отражающиеся импульсы затухают по амплитуде.

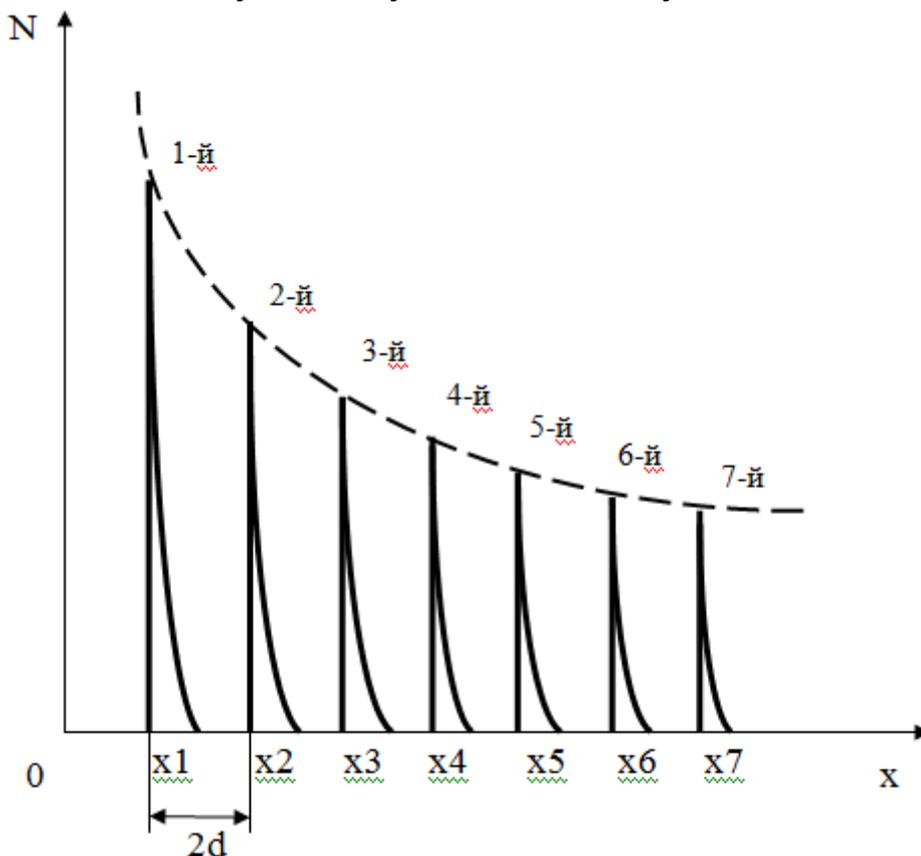


Рис.1. Затухание описывается экспонентой.

$$\sigma(x) = \sigma_0 e^{-\alpha d}, \quad d - \text{толщина образца.}$$

Длина пройденного пути между соседними эхо-импульсами равна удвоенной толщине изделия. Следовательно, для такой серии импульсов можно записать систему уравнений.

$$\sigma_1 = \sigma_0 - \text{амплитуда нормировки}$$

$$\sigma_2 = \sigma_1 \cdot e^{-2\alpha d} = \sigma_0 \cdot e^{-2\alpha d},$$

$$\sigma_3 = \sigma_2 \cdot e^{-2\alpha d} = \sigma_0 \cdot e^{-4\alpha d},$$

$$\sigma_4 = \sigma_3 \cdot e^{-2\alpha d} = \sigma_0 \cdot e^{-6\alpha d},$$

...

Измерив амплитуды двух импульсов и зная расстояние  $X$  между ними можно вычислить  $\alpha$ . Для повышения точности измерения следует брать импульсы, амплитуды которых отличаются не менее чем на 50%.

$$\alpha = \frac{1}{\Delta x} \ln \frac{\sigma(x_1)}{\sigma(x_2)}, \text{ (неп/см)}$$

или

$$\alpha = \frac{1}{\Delta x} 20 \lg \frac{\sigma(x_1)}{\sigma(x_2)}, \text{ (дБ/см)}.$$

Для пересчета  $\alpha$  из неп/см в дБ/см используется связь

$$\alpha(\text{дБ/см}) = 8,686 \alpha(\text{неп/см}),$$

$$\alpha(\text{неп/см}) = 0,115 \alpha(\text{дБ/см}).$$

По полученным значениям  $\alpha$  определяют логарифмический декремент затухания  $\delta = \alpha \lambda$ , где  $\lambda = c/f$  – длина волны (см), и добротность  $Q = \frac{\pi}{\alpha \cdot \lambda} = \frac{\pi}{\delta}$ .

Значение скорости берут из справочника.

### 3 Проведение работы

1. Включить прибор и провести настройку для получения отраженных импульсов.
2. Измерить  $\alpha$  для двух образцов (сталь и оргстекло). Для вычисления  $\alpha$  построить таблицы значений амплитуд для последовательности эхо-импульсов.
3. Провести для каждого материала по 10 измерений  $\alpha$  и определить среднее значение  $\alpha$  и среднеквадратическое отклонение  $\Delta\alpha$ .
4. Вычислить  $\delta$  и  $Q$ .

Отчет

1. Таблица 3. Амплитуда первых двух донных импульсов.  
 Материал \_\_\_\_\_ Частота \_\_\_\_\_ МГц.

№ п.п	$\sigma(x_1)$	$\sigma(x_2)$	$\frac{\sigma(x_1)}{\sigma(x_2)}$	$\ln \frac{\sigma(x_1)}{\sigma(x_2)}$	$\alpha$ (неп/см)	$\alpha$ (дБ/см)
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
Ср.знач						

1.  $\alpha = \frac{1}{\Delta x} \ln \frac{\sigma(x_1)}{\sigma(x_2)}$ , (неп/см)=

2.  $\alpha$  (дБ/см)=8,686  $\alpha$  (неп/см) =

3. Длина волны  $\lambda=c/f=$

4. Логарифмический декремент затухания  $\delta=\alpha\lambda=$

5. Добротность  $Q = \frac{\pi}{\alpha \cdot \lambda} = \frac{\pi}{\delta} =$

Отчет

2. Таблица 4. Амплитуда первых двух донных импульсов.  
 Материал \_\_\_\_\_ Частота \_\_\_\_\_ МГц.

№ п.п	$\sigma(x_1)$	$\sigma(x_2)$	$\frac{\sigma(x_1)}{\sigma(x_2)}$	$\ln \frac{\sigma(x_1)}{\sigma(x_2)}$	$\alpha(\text{неп/см})$	$\alpha(\text{дБ/см})$
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
Ср.знач						

1.  $\alpha = \frac{1}{\Delta x} \ln \frac{\sigma(x_1)}{\sigma(x_2)}$ , (неп/см)=

2.  $\alpha(\text{дБ/см}) = 8,686 \alpha(\text{неп/см}) =$

3. Длина волны  $\lambda = c/f =$

4. Логарифмический декремент затухания  $\delta = \alpha \lambda =$

5. Добротность  $Q = \frac{\pi}{\alpha \cdot \lambda} = \frac{\pi}{\delta} =$

Отчет

6. Таблица 4. Амплитуда первых двух донных импульсов.  
 Материал \_\_\_\_\_ Частота \_\_\_\_\_ МГц.

№ п.п	$\bar{\sigma}(x_1)$	$\bar{\sigma}(x_2)$	$\frac{\sigma(x_1)}{\sigma(x_2)}$	$\ln \frac{\sigma(x_1)}{\sigma(x_2)}$	$\alpha(\text{неп/см})$	$\alpha(\text{дБ/см})$
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
Ср.знач						

1.  $\alpha = \frac{1}{\Delta x} \ln \frac{\sigma(x_1)}{\sigma(x_2)}$ , (неп/см)=

2.  $\alpha(\text{дБ/см}) = 8,686 \alpha(\text{неп/см}) =$

7. Длина волны  $\lambda = c/f =$

8. Логарифмический декремент затухания  $\delta = \alpha \lambda =$

9. Добротность  $Q = \frac{\pi}{\alpha \cdot \lambda} = \frac{\pi}{\delta} =$