

# 1. ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКА В БИОЛОГИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЯХ, ГАЗАХ И КОСТНЫХ ТКАНЯХ

Цель работы - изучение методов измерения скорости звука и внутреннего рассеяния механической энергии в конструкционных материалах и биотканях.

Незначительные изменения химического состава газа, жидкости или твердых тел часто бывает достаточно трудно оценить, используя прямые методы измерений. Однако существуют косвенные методы, чувствительность которых по отношению к изменению некоторых параметров среды оказывается высокой. Так, достаточно эффективным методом, позволяющим зарегистрировать незначительные изменения концентраций химического, газового состава исследуемой среды, является метод определения упругих постоянных по результатам экспериментального измерения скорости распространения звуковой волны в данной среде. Причем скорость звука  $c$  определяется из данных по спектру собственных частот объема газа (жидкости) или твердого тела заданных размеров. Точность измерения собственных частот может достигать 0,001%, благодаря чему можно примерно с такой же точностью находить и скорость звука, а также и упругие постоянные.

## *1.1. Рассеяние механической энергии при колебаниях деформируемых тел*

Методы определения характеристик рассеяния механической энергии в материале при циклическом деформировании основаны либо на непосредственном измерении величины энергии, рассеиваемой в исследуемом образце (прямые методы: энергетический, термический, гистерезисной петли), либо на получении относительных характеристик рассеяния энергии (косвенные методы: затухающих колебаний, метод «кривой резонанса», фазовый метод) [1].

Мерой рассеяния механической энергии в материале при циклическом деформировании (рис. 1) является площадь петли гистерезиса  $\Delta W$ , в координатах напряжения  $\sigma$  - деформации  $\varepsilon$  (где  $\Delta W$  – удельная, отнесенная к единице объема исследуемого материала, рассеянная за один цикл деформирования механическая энергия), которую принято относить к амплитудному значению потенциальной энергии

$W$  образца:  $\Psi = \Delta W / W$ ; здесь  $\Psi$  - коэффициент поглощения механической энергии.

Уменьшение энергии в системе за промежуток времени  $dt$  может быть представлено дифференциалом  $dW$ , а коэффициент поглощения энергии в материале упругого элемента за период колебания  $T$

$$\Psi = - \int_{W(t)}^{W(t+T)} W^{-1} dW$$

Считая, что  $W = ku^2/2$ , где  $k$ - жесткость системы,  $u(t)$  - амплитуда перемещений, можно получить следующее соотношение для коэффициента поглощения:

$$\Psi = \int_{u_i}^{u_{i+1}} 2u^{-1} du = 2 \ln(u_i/u_{i+1}), \quad (1)$$

где  $u_i$  и  $u_{i+1}$  - две последовательные амплитуды колебаний в начале  $i$ -го и  $i+1$ -го периодов колебаний. Так как логарифмический декремент затухания определяется как  $\delta = \ln(u_i/u_{i+1})$ , то с учетом соотношения (1) можно получить связь между логарифмическим декрементом затухания и коэффициентом поглощения энергии в материале:  $\Psi = 2 \delta$ .

На практике также используют выражение для  $\delta$ :

$$\delta = \frac{1}{n} \cdot \ln(u_i/u_{i+n}) = 1/(\tau f_0) \cdot \ln(u_{t_0}/u_{t_0+\tau}), \quad (2)$$

где  $n$ - число периодов колебаний между измерениями амплитуд  $u_i$  и  $u_{i+n}$ ;  $f_0$  - частота затухающих колебаний;  $\tau$  - время, за которое амплитуда затухающих колебаний уменьшится в  $u_{t_0}/u_{t_0+\tau}$  раз.

Наибольшее распространение в практике эксперимента получили методы затухающих колебаний, метод "кривой резонанса" и фазовый метод [1].

Метод "кривой резонанса" основан на зависимости ширины резонансного пика амплитудной кривой перемещения от диссипативных сил (рис. 2). Для систем, обладающих рассеянием энергии, пропорциональным первой степени скорости или квадрату амплитуды, установлены следующие соотношения:

$$\delta = \pi \Delta f_{0,7} / f_0 ; \quad \delta = \pi \Delta f_{0,5} / (\sqrt{3} f_0), \quad (3)$$

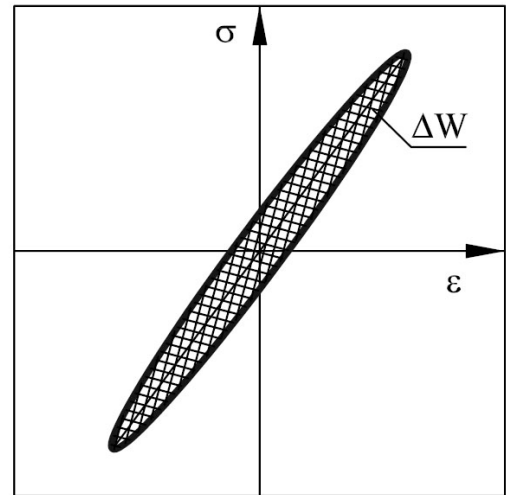
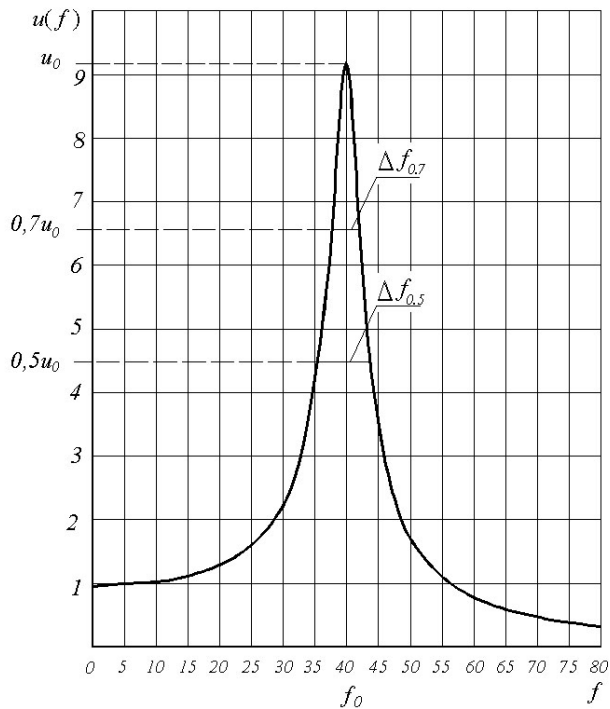


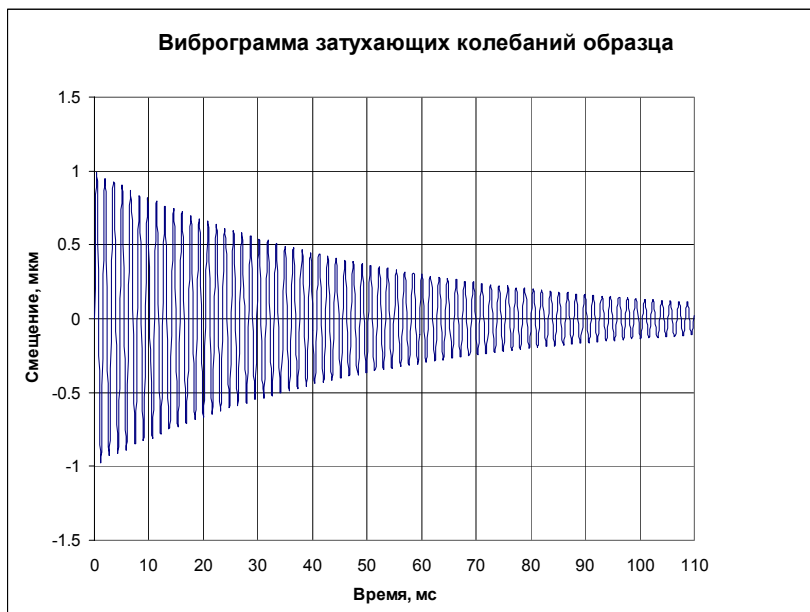
Рисунок 1. Петля в координатах  $\sigma$ - $\epsilon$ , иллюстрирующая механический гистерезис при циклическом деформировании



**Рисунок 2. Амплитудно-частотная характеристика в окрестностях резонанса на частоте  $f_0$**

резонансных частот образца, а затем осуществляется срыв вынужденных колебаний и запись виброграммы.

1. 2. *Определение модуля Юнга и скорости распространения продольной волны в*



**Рисунок 3. Виброграмма затухающих колебаний образца**

расположение которой для частоты основного резонанса совпадает с центром тяжести

где  $\Delta f_{0,7}$  и  $\Delta f_{0,5}$  соответственно ширина резонансного пика амплитудно-частотной характеристики на уровне 0,707 или 0,5;  $f_0$  - частота резонанса.

При использовании метода затухающих колебаний производится запись виброграммы (рис. 3) затухающих колебаний образца, по которым определяется логарифмический декремент затухания, например из соотношения (2). Обычно при применении метода затухающих колебаний в образце возбуждаются вынужденные колебания, совпадающие с одной из

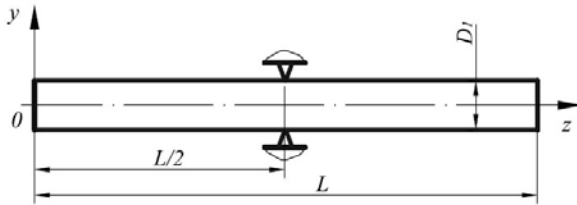
*стержнях резонансным методом*

При использовании резонансного метода определения скорости звука обычно в качестве образца используется стержень постоянного сечения, который закрепляется в специальном приспособлении в узловой точке, продольное

стержня. При этом края стержня остаются свободными (рис. 4). В стержне возбуждаются продольные колебания.

Рассмотрим свободные продольные колебания стержня постоянного сечения  $F$ . Волновое уравнение для стержня постоянного сечения имеет вид [2]

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0, \quad (4)$$



где  $c = \sqrt{E/\rho}$  - скорость распространения продольной волны в стержне,  $E$  - модуль упругости первого рода,  $\rho$  - плотность;  $t$  - время;  $z$  - продольная ордината,  $u(z,t)$  - продольное смещение  $z$ -го поперечного сечения в момент

**Рисунок 4. Схема закрепления цилиндрического образца для исследований скорости звука и затухания при продольных колебаниях на основной моде колебаний**

Пусть  $u(z,t) = u_i(z) \cos 2\pi f_i t$  (здесь  $f_i$  -  $i$ -собственная частота), тогда

$$u_i''(z) + \alpha_i^2 u_i(z) = 0, \quad (5)$$

где волновое число  $\alpha_i = 2\pi f_i / c$  и решение уравнения (5) будет следующим:

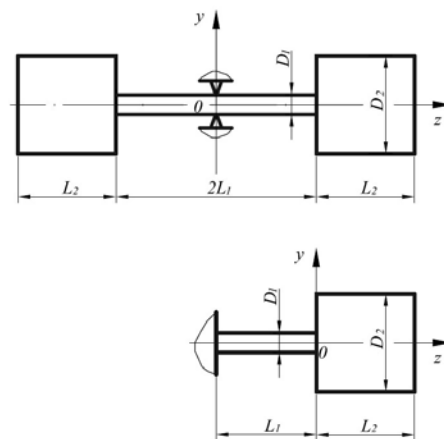
$$u_i(z) = C_1 \cos \alpha_i z + C_2 \sin \alpha_i z, \quad (6)$$

Поскольку торцы стержня свободны, то граничные условия имеют вид  $N(0)=0$ ,  $N(l)=0$ , где  $N = EFu'$  - внутреннее осевое усилие,  $l$  - длина стержня. Тогда произвольная постоянная  $C_2 = 0$ , а частотное уравнение будет выглядеть так:

$$\sin \alpha_i l = 0,$$

т.е.  $\lambda_i l = \pi, 2\pi, \dots, n\pi$ .

Подставляя выражение для  $\alpha_i$  в полученной соотношении, имеем  $c = 2f_n l / n$ , где  $n$  - номер собственного резонанса (как уже отмечалось, обычно испытания проводят на частоте основного резонанса, т.е. при  $n=1$ ).



**Рисунок 5. а) Схема закрепления гантельного образца для исследований скорости звука и затухания при продольных колебаниях на основной моде колебаний; б) расчетная схема.**

Одним из недостатков использования в качестве образцов стержней постоянного сечения является их достаточно большая длина. В случаях, когда не требуется получение большой точности (около 1% или хуже) определения скорости звука можно в качестве образцов использовать симметричные стержни переменного сечения, у которых площадь сечения увеличивается к краям, например, можно использовать гантельные цилиндрические образцы, изображенные на рис. 5.

Рассмотрим последовательность определения скорости звука в таких образцах.

Пусть образец закрепляется в центре тяжести, как изображено на рис. 5, а края его свободны. В случае колебаний образца на частоте основного резонанса, в виду его симметрии узел продольного смещения также будет находиться в центре образца и в его центре тяжести. Таким образом как и в предыдущем случае опора крепления образца не будет влиять на резонансный режим колебаний. Тогда для получения частотного уравнения достаточно рассмотреть лишь половину образца (например правую, рис. 5б), но при этом левое граничное условие будет иметь вид:  $u(-L_1)=0$ . Правое граничное условие попрежнему будет  $N(L_2)=0$ . Начало системы координат совмещено с точкой стыка первого и второго участков. Решения уравнения (5) для первого и второго участков:

$$u_1(z) = C_1 \cos \alpha z + C_2 \sin \alpha z \quad u_2(z) = G_1 \cos \alpha z + G_2 \sin \alpha z$$

где  $C_1, C_2$  – произвольные постоянные для первого участка образца,  $G_1, G_2$  – произвольные постоянные для второго участка образца. С учетом граничных условий и условий стыковки участков –  $u_1(0)=u_2(0)$ ,  $N_1(0)=N_2(0)$ , после преобразований получим следующее частотное уравнение:

$$\cos \alpha L_1 \cos \alpha L_2 - \left( \frac{D_1}{D_2} \right)^2 \sin \alpha L_1 \sin \alpha L_2 = 0 \quad (7)$$

где  $\alpha = \frac{2\pi f_0}{c}$ ,  $D_1, D_2$  – диаметры первого и второго участков образца.

Таким образом, экспериментально измерив основную резонансную частоту  $f_0$ , для заданных диаметров и длин участков из частотного уравнения (7) можно найти и скорость  $c$  распространения продольной волны в стержне. При этом точность определения  $c$ , в основном, обуславливается точностью экспериментального определения резонансной частоты и обычно составляет 0,1...0,5 % для образцов, выполненных в виде стержня постоянного сечения и около 1% - для гантельных образцов. Не надо путать стержневую скорость распространения продольной волны со

скоростью распространения продольной волны в неограниченном твердом теле  $c_\infty$  которая определяется через упругие постоянные среды как

$$c_\infty = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} \text{ или как } c_\infty = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}G}{\rho}} \quad (8)$$

где  $\mu$  - коэффициент Пуассона,  $K$  – объемный модуль упругости,  $G$  – модуль упругости второго рода (модуль сдвига).

При известной плотности исследуемого материала  $\rho$  после определения скорости звука можно также рассчитать и модуль упругости первого рода:

$$E = c^2 \rho. \quad (9)$$

### 1.3. Определение модуля сдвига и скорости сдвиговых волн в стержнях резонансным методом

При использовании резонансного метода определения скорости распространения сдвиговых волн в качестве образца можно использовать те же образцы что и в предыдущем случае. Однако, в данном случае, в образцах возбуждают крутильные колебания (также как и ранее - на частоте основного резонанса). Образцы также закрепляются в узловой точке, совпадающей с центром тяжести. Края образца - свободные.

Волновое уравнение крутильных колебаний для стержня постоянного сечения имеет вид [2]

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} - c_t^2 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0, \quad (10)$$

где  $c_t = \sqrt{G/\rho}$  - скорость распространения сдвиговой волны в стержне,  $\varphi(z,t)$  - угол поворота  $z$ -го поперечного сечения в момент времени  $t$ .

Пусть  $\varphi(z,t) = \varphi(z) \cos 2\pi f t$  (здесь  $f$  - собственная частота), тогда

$$\varphi''(z) + \alpha_t^2 \varphi(z) = 0, \quad (11)$$

где волновое число  $\alpha_t = 2\pi f / c_t$  и решение уравнения (11) будет следующим:

$$\varphi(z) = C_1 \cos \alpha_t z + C_2 \sin \alpha_t z,$$

Для образца в виде стержня длиной  $L$  постоянного сечения со свободными краями частотное уравнение будет  $\sin \alpha_t l = 0$ , т.е.  $c_t = 2fl$ .

Для гантельных цилиндрических образцов частотное уравнение крутильных колебаний будет

$$\cos \alpha_1 L_1 \cos \alpha_2 L_2 - \left( \frac{D_1}{D_2} \right)^4 \sin \alpha_1 L_1 \sin \alpha_2 L_2 = 0 \quad (12)$$

из которого определяется скорость распространения сдвиговой волны  $c_t$  при известных размерах и измеренной частоте основного резонанса крутильных колебаний. Модуль сдвига материала можно определить как  $G = c_t^2 \rho$ .

Известно, что модули упругости первого и второго рода (модуль Юнга и модуль сдвига) связаны между собой соотношением  $G = \frac{E}{2(1+\mu)}$ . Т.е. проведя на одном образце измерения основных резонансных частот продольных и крутильных колебаний можно определить два модуля упругости  $E$  и  $G$  и затем определить коэффициент Пуассона:  $\mu = \frac{E}{2G} - 1$ .

#### 1.4. Определение скорости звука в газах и жидкостях резонансным методом

Распространенным методом определения скорости распространения продольной звуковой волны в трубах является резонансный. Однако косые отражения от стенки трубы создают условия для возникновения в трубе радиальных колебаний среды. Для того, чтобы влияние радиальных колебаний было минимальным, обычно диаметр трубы  $D$  выбирают из соотношения  $D < 0,305 \lambda$  ( $\lambda$  - длина продольной волны). Кроме того, касательная составляющая колебательной скорости вблизи поверхности трубы должна быть равной нулю, а по мере удаления от стенки трубы к ее оси скорость будет возрастать. Наличие поперечного градиента скорости приводит к дополнительному поглощению энергии волны, вызывающего искажение фронта волны и появления радиальных колебаний. Поглощение энергии волны связано с вязкостью газа (жидкости), шероховатостью стенки трубы и ее теплопроводностью. Наилучшие результаты могут быть получены при проведении экспериментов в трубах с низкой шероховатостью поверхности, выполненных из жесткого материала с малым коэффициентом теплопроводности. Для исследований скорости звука в газовых средах хорошим вариантом является использование фторопласта (тефлона), для жидких водоподобных сред – можно использовать стекло.

Волновое уравнение для одномерного случая имеет вид

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0, \quad (13)$$

где  $\Phi$  – потенциал скорости,  $\tilde{n} = \sqrt{1/\rho_0 \tilde{N}_s}$  – скорость звука,  $\rho_0$  – плотность невозмущенной среды,  $C_s$  – объемная адиабатическая сжимаемость.

Этим уравнением с достаточной точностью описываются колебания частиц среды в трубе.

Колебательная скорость  $V$  и акустическое давление  $p$  связаны с потенциалом скорости следующими соотношениями:

$$V(z,t) = -\frac{\partial \Phi}{\partial z}, \quad p(z,t) = \rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (14)$$

При абсолютно жестких торцевых стенках трубы при  $z=0$  и  $z=l$  граничные условия имеют вид

$$u(0,t)=0; \quad u(l,t)=0.$$

С учетом соотношения (14) эти условия могут быть также записаны и так:

$$\left. \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right|_{z=0} = 0; \quad \left. \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right|_{z=L} = 0; \quad (15)$$

Решая волновое уравнение (13) совместно с граничными условиями (15), используя подстановку

$$\Phi(z,t) = \Phi_0(z) \cos \omega t,$$

получим следующее частотное уравнение:

$$\sin \alpha L = 0,$$

где  $\alpha = \omega/c$ ,

откуда

$$c = \omega_n l \cdot (n\pi)^{-1} = 2\pi f_n l (n\pi)^{-1} = 2f_n l / n, \quad (16)$$

где  $f_n$  - нормальная  $n$ -собственная частота столба жидкости или газа в трубе.

Для газов при условиях близких к нормальным соотношение для скорости звука

$\tilde{n} = \sqrt{1/\rho_0 \tilde{N}_s}$  можно с учетом формулы Клайперона и того что адиабатическая

сжимаемость  $C_s$  выражается через гидростатическое давление  $P_0$  как  $\tilde{N}_s = \frac{1}{\gamma P_0}$  (где  $\gamma$  -

показатель адиабаты) записать также в виде  $\tilde{n} = \sqrt{\frac{\gamma RT}{\mu}}$ , где  $R$  - универсальная газовая

постоянная,  $T$  - абсолютная температура газа,  $\mu$  - молекулярный вес газа. Так

расчитанная по этой формуле скорость звука для воздуха ( $\mu=0.029$  кг/моль,  $\gamma=1.4$ ) дает

расхождение с экспериментальными значениями [3] в диапазоне от  $0^0$  до  $30^0$  С не более

0,42% (таблица 1).

Температура	Температура	Скорость звука $c^1$ ,	Скорость звука $c^2$ ,
-------------	-------------	------------------------	------------------------



$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{K}$	м/с	м/с
0	273.15	331.69	331.45
4	277.15	334.11	
8	281.15	336.51	
10	283.15	337.71	338
14	287.15	340.08	
16	289.15	341.27	
18	291.15	342.45	
20	293.15	343.62	344
22	295.15	344.79	
24	297.15	345.96	
26	299.15	347.12	
28	301.15	348.28	
30	303.15	349.43	350.7
34	307.15	351.73	

Примечание. 1 – расчетное значение скорости звука, 2 – экспериментальное значение скорости звука.

#### 1.5. Определение скорости распространения изгибных волн в костной ткани

Проводя исследования на биологических тканях надо учитывать то, что обычно экспериментатор не располагает большим объемом исследуемого материала. Так для определения скорости звука на аппаратуре с верхним пределом по частоте в  $f_{\text{up}}$  при продольных колебаниях длина образца  $L$  составит  $\frac{\tilde{n}}{2f_{\text{up}}}$ . При  $f_{\text{up}}=10$  кГц длина образца из костной ткани ( $c=3300$  м/с) будет около 165 мм. Для такого же значения максимальной частоты  $f_{\text{up}}$  но при проведении исследований скорости звука на изгибных модах колебаний, длина образца  $L$  (при толщине  $h$  образца в 1 мм) составит всего 18 мм.

Пусть для исследований на костной ткани мы располагаем образцами прямоугольного поперечного сечения  $b \times h$ , и длиной  $l$ . Введем систему координат  $XOYZ$  (рис. ). Образец расположим на двух опорах  $A_1$  и  $A_2$ , расстояние до опор от начала координат соответственно  $l_1$  и  $l_2$ . Волновое уравнение для изгибно колеблющегося бруса постоянного сечения

$$\frac{\partial^4 \xi}{\partial z^4} + \rho F (EJ_x)^{-1} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = 0, \quad (13)$$

где  $\xi(z, t)$  - поперечное смещение;  $J_x$  - геометрический момент инерции поперечного сечения относительно главной центральной оси, параллельной оси  $OX$ .

Решая задачу на собственные значения, после преобразований для определения собственных частот колебаний образца можно получить следующую однородную систему:

$$\begin{aligned}
 C_1 K_1(\lambda l_1/l) + C_2 K_2(\lambda l_1/l) &= 0, \\
 C_1 K_1(\lambda l_2/l) + C_2 K_2(\lambda l_2/l) + C_3 K_4[\lambda(l_2 - l_1)/l] &= 0, \\
 C_1 K_3(\lambda) + C_2 K_4(\lambda) + C_3 K_2[\lambda(l - l_1)/l] + C_4 K_2[\lambda(l - l_2)/l] &= 0, \\
 C_1 K_2(\lambda) + C_2 K_3(\lambda) + C_3 K_1[\lambda(l - l_1)/l] + C_4 K_1[\lambda(l - l_2)/l] &= 0
 \end{aligned} \tag{14}$$

где  $C_1, \dots, C_4$  - произвольные постоянные;  $K_1, \dots, K_4$  - функции Крылова;

$$\lambda = \alpha_i l = l \sqrt{2\pi f} \sqrt[4]{\frac{1}{c^2} \frac{F}{J_x}}, \quad c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad \alpha^4 = \frac{\rho F (2\pi f_i)^2}{E J_x}$$

В нижеследующей таблице 2 представлены результаты численного решения системы (14) для основного резонанса и симметричных вариантов расположения опор, когда  $l_2 = l - l_1$ , и различных расстояний до опор  $l_1$  и  $l_2$  от начала отсчета.

Таблица 2

$l_1/l_2$	0,05	0,01	0,15	0,2	0,25	0,35	0,4	0,5
$\lambda$	3,489	3,902	4,348	4,683	4,682	4,148	3,933	3,750

Скорость распространения продольной волны подсчитывается по формуле [2]

$$c_{\text{ЕЦА}} = \sqrt{2\pi f_1} \sqrt{r_x c}, \tag{15}$$

где  $r_x = \sqrt{\frac{J_x}{F}}$  - радиус инерции поперечного сечения. Для прямоугольного сечения  $r_x = h/\sqrt{12}$ . Модуль упругости первого рода находится из соотношения

$$E = l^4 (2\pi f_1)^2 \frac{\rho}{\lambda^4 r_x^2}$$

Погрешность определения указанных величин с помощью данного метода не превышает 0,2...0,7%.

Практическая часть

В рамках лабораторной работы требуется экспериментально определить: скорость распространения продольной волны в цилиндрических волноводах (образцах) из титановых сплавов ВТ5, дюралюминия Д16Т, латуни Л59 и фторопласта, применяя резонансный метод;

- скорость распространения изгибных волн и модуль упругости первого рода для компактной костной ткани;
- коэффициент поглощения механической энергии в компактной костной ткани методами затухающих колебаний и "кривой резонанса";
- скорость распространения продольных волн в жидкостях и газах.

Оборудование. Работа по экспериментальному определению скорости звука и затухания в твердых телах проводится на специализированном стенде, созданном с использованием блоков аппарата ИЧЗ-9А, предназначенного для определения декремента затухания в полимерных материалах.

Измерительная установка ИЧЗ-9А состоит из функционально законченных блоков, на базе которых можно реализовывать различные схемы испытаний. В состав установки входят (подробное описание приведено в приложении 2):

- станина для закрепления образца и индуктивных преобразователей;
- приемный блок, состоящий из электронно-лучевого осциллографа и вольтметра;
- блок генерирования синусоидальных колебаний, состоящий из задающего генератора и усилителя.

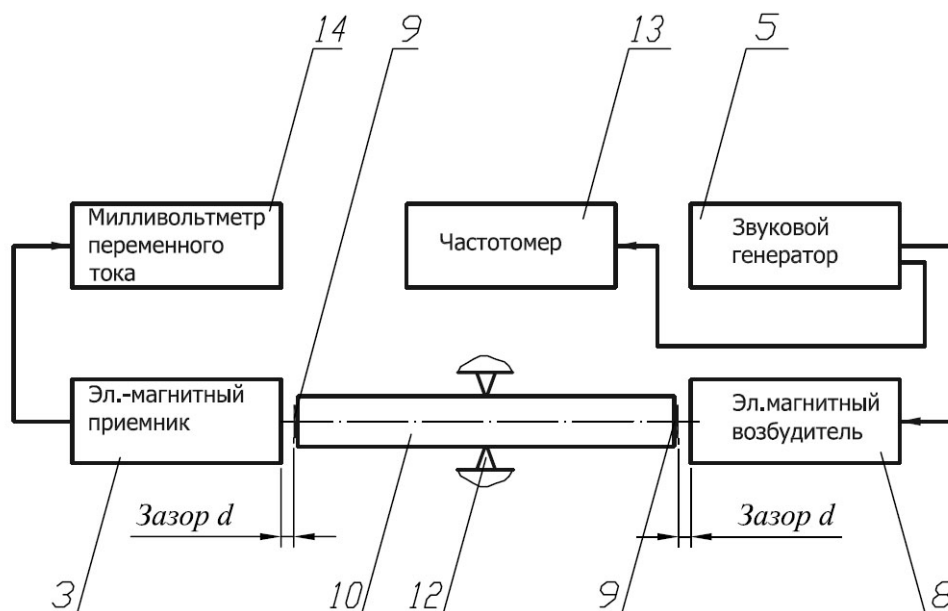
Дополнительно используется частотомер, подключаемый к линейному выходу усилителя аппарата ИЧЗ-9А.

Для определения скорости звука в газообразных и жидких средах используется электронно-измерительная аппаратура общего назначения (милливольтметры переменного тока, двухлучевой осциллограф, фазометр, частотомер, звуковой генератор) и специализированные стенды с излучателями и приемниками ультразвука. Для исследования затухания и фиксации виброграмм затухающих колебаний используется запоминающий осциллограф или персональный компьютер с платой АЦП (10 разрядов, 10 МГц, 2 канала).

Для записи виброграмм затухающих колебаний в состав стенда введен также блок синхронизации запуска 7 и прерыватель 4.

Ферромагнитные пластины 9 наклеиваются на образец 10 для передачи и регистрации колебаний образца. Также используется ультразвуковые генераторы УРСК-7Н-18 на 25 кГц и УЗТ-101 на 880 кГц.

Скорость распространения продольной волны в твердых телах измеряется резонансным методом (см. рис. 6). На станину 14 устанавливается образец 6 таким образом, чтобы его центр тяжести находился под опорой. Затем справа и слева к образцу подводятся индуктивные преобразователи так, чтобы зазоры между образцом и



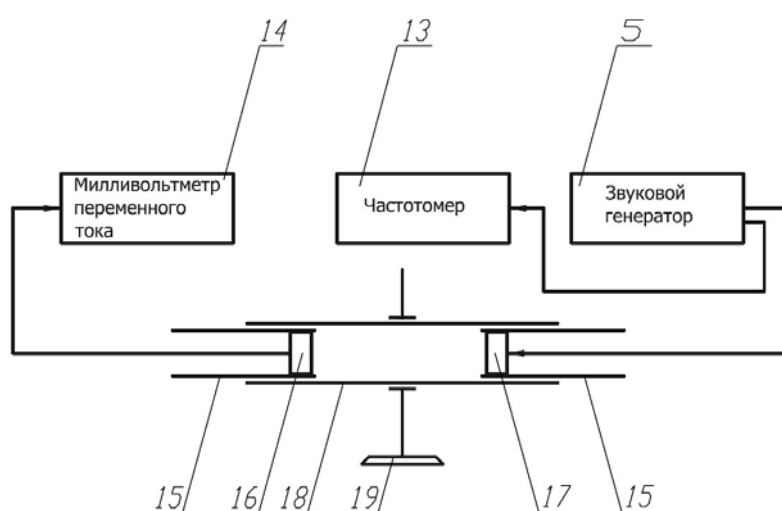
**Рисунок 6.** Блок-схема проведения эксперимента по определению скорости звука при продольных колебаниях. Пунктиром обведены блоки установки ИЧЗ-9А.

преобразователями  $\delta_1$  и  $\delta_2$  не превышали 0,1 мм. В то же время необходимо следить за тем, чтобы преобразователи не входили в непосредственный контакт с образцом 10. На образцы, выполненные из неферромагнитных материалов, предварительно наклеиваются тонкие ферромагнитные пластинки размером примерно  $10 \times 10 \times 0,1$  мм, например из никелевой фольги.

Включив установку и частотомер, осуществляют поиск основного резонанса образца, для чего частоту задающего звукового генератора 5 плавно меняют в пределах выбранного диапазона и наблюдают за показаниями вольтметра 14. При совпадении частоты возбуждения  $f$  с одной из собственных частот образца  $f_i$  наступает механический резонанс, т.е. резкое увеличение амплитуды механических колебаний образца, которое и регистрируется с помощью индуктивного приемника по показаниям вольтметра, пропорциональным амплитуде механических колебаний. Осуществив таким образом точную настройку на частоту резонанса, определяют частоту возбуждения  $f$  по показаниям частотомера 13, после чего по формуле (8) находят значение скорости звука.

Скорость распространения продольной волны в жидкостях и газах. Типовая схема измерения скорости звука резонансным методом представлена на рис. 7. Установка состоит из звукового генератора 5, милливольтметра 14, частотомера 13, акустического излучателя 17, микрофона 16, трубы 18 с выдвигающимися телескопическими вставками 15, посредством которых можно изменить расстояние между излучателем и микрофоном.

Скорость распространения изгибной волны в образце из компактной костяной ткани резонансным методом (см. рис. 8) измеряется аналогично измерению скорости распространения продольной волны, только в этом случае оси индуктивных преобразователей 3 и 8 устанавливаются перпендикулярно оси образца 10 (схема



**Рисунок 7. Блок-схема стенда для исследования скорости звука в газовой среде.**

поперечных колебаний образца), а при определении скорости из соотношения (15) необходимо учитывать форму поперечного сечения и расстояние до опор  $l_1$  и  $l_2$ .

Экспериментально коэффициент поглощения в компактной костяной ткани при изгибных колебаниях определяется двумя методами: методом "кривой резонанса" и методом затухающих колебаний.

В обоих случаях система предварительно настраивается на основной резонанс механических колебаний образца (см. скорость распространения продольных волн в твердых телах). После чего, при использовании метода "кривой резонанса", осуществляется перестройка задающего генератора вниз от частоты резонанса до тех пор, пока амплитуда электрических колебаний, прямо пропорциональных амплитуде механических смещений, не уменьшится до  $0,707A_m$  (где  $A_m$  - амплитуда электрического сигнала на резонансе). Измеряют частоту  $f_H$ , соответствующую этой

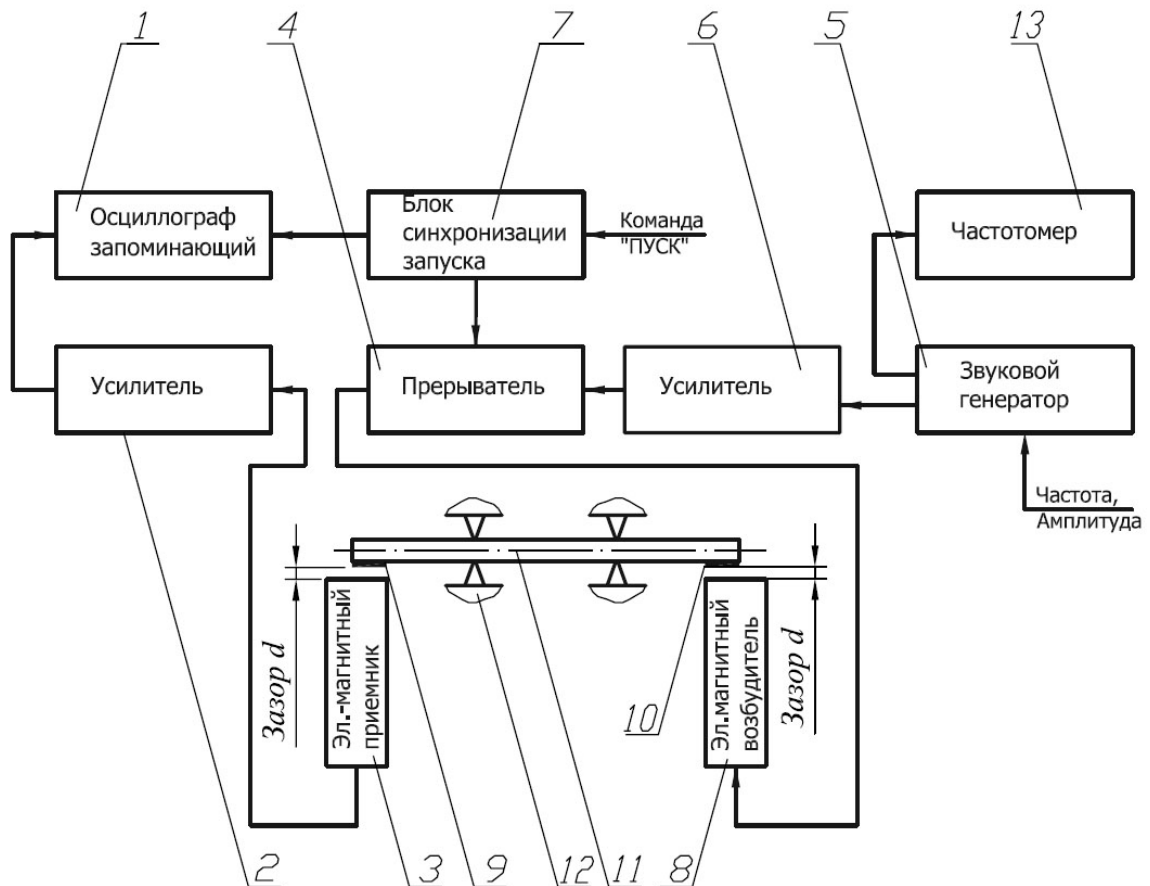


Рисунок 8. Блок-схема измерения скорости распространения изгибной волны и затухания в костной ткани. Пунктиром обведены блоки установки ИЧЗ-9А.

амплитуде. Затем выполняют аналогичную операцию, но перестраивая задающий генератор вверх от частоты резонанса и измеряя частоту  $f_B$ . Вычисляют  $\Delta f_{0,7} = f_B - f_H$ , после чего по первому соотношению из (3) определяют декремент затухания, а затем из (1) и коэффициент поглощения  $\Psi$ . Указанные операции повторяют от трех до пяти раз. Результаты усредняют.

При использовании метода затухающих колебаний, после настройки системы на резонанс, настраивают запоминающий осциллограф в непрерывном режиме (фокусировка, яркость, желаемая амплитуда сигнала, время развертки). Затем

переводят осциллограф в режим готовности к запуску от внешнего синхронизирующего источника. Затем нажатием кнопки "Запуск" на блоке синхронизации осуществляют срыв вынужденных колебаний и запись виброграммы на экран осциллографа, которая сохраняется там 60...80 с.

Значения  $A_{t_0}$  и  $A_{t_0+\tau}$  определяются по вертикальной сетке на экране осциллографа, а значение  $\tau$  - по горизонтальной. Учитывая масштаб горизонтальной развертки, находят  $\tau$  в секундах. По формулам (1) и (2) определяют коэффициент поглощения.

Для каждого из образцов указанную операцию повторяют от трех до пяти раз. Результат сводят в таблицу и статистически обрабатывают.

На основании полученных данных составляют заключение о разбросе измеренных данных, а также сравнивают исследованные материалы между собой по измеренным скоростям звука и коэффициентам поглощения.

#### Литература

1. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Вибропоглощающие свойства конструкционных материалов: Справочник.-Киев: Наукова Думка, 1971.-375 с.
2. Скучик Е. Простые и сложные колебательные системы /Пер. с англ.-М.: Мир, 1971.-557 с.

#### Приложение 1.

**Таблица значений скоростей звука в некоторых материалах**

Материал	Скорость звука, м/с	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Модуль Юнга, ГПа	Модуль сдвига, ГПа
ВТ-5	4885	4400		42.5
ВТ-5-1	5055	4460		
ВТ-3-1	5055	4500		43
ВТ-6	4950	4430		-
ВТ-20	4972	4450		-
ВТ-22	5000	4600	115	-
ВТ-14	5044	4520	115	-
ВТ-8	4955	4480	110	42.5
Д16Г	5004	2780	70-75	
40Х	5110	7810	204	

30ХГСА	5090	7850	204	
Вода дистиллированная, 20°С	1490	1000		
Вода соленая, 0,9%, 20°С	1560			
Кровь	1590	1050		

## **Приложение 2. Описание аппарата для измерения скорости звука и затухания (ИЧЗ-9А)**

Внешний вид электронной части аппарата для измерения скорости звука и затухания (ИЧЗ-9А) представлен на рис. П2.1 .

Аппарат состоит из трех функциональных блоков:

- блока питания и контроля функционирования (левый отсек на рис. П2.1),
- блока усиления и визуализации принимаемого сигнала (центральный отсек на рис. П2.1);
- блока генерации сигнала возбуждения (правый отсек на рис. П2.1)

Блок питания и контроля функционирования позволяет с помощью стрелочного индикатора проверить анодные и накальные напряжения на лампах аппарата, в норме стрелка индикатора должна находиться между зеленой и красной рисок на индикаторе. Также можно контролировать выходное напряжение звукового генератора и напряжение на усилителе приемного блока. Переключение режимов проверки осуществляется переключателем «КОНТРОЛЬ». В нижней левой части отсека находится сетевой выключатель всего аппарата. При включенном аппарате должна светиться зеленая лампочка справа от выключателя.

Блока усиления и визуализации принимаемого сигнала. В верхней части блока расположена осциллографическая трубка, вертикальное отклонение луча трубки пропорционально амплитуде колебаний поверхности образца рядом с приемным индуктивным датчиком (рис. П2.2, расположен слева). Под трубкой в ряд расположены четыре ручки плавной регулировки луча (слева направо: «Яркость», «Вертикальное перемещение луча», «Горизонтальное перемещение луча», «Фокусировка»). Ниже расположен сменный модуль «УСИЛИТЕЛЬ». Ручка «УСИЛЕНИЕ «У»» позволяет плавно регулировать усиление приемного усилителя, при этом происходит и синхронное изменение вертикального отклонения принимаемого сигнала, ручка «ИНДИКАТОР» позволяет плавно регулировать чувствительность индикатора в блоке

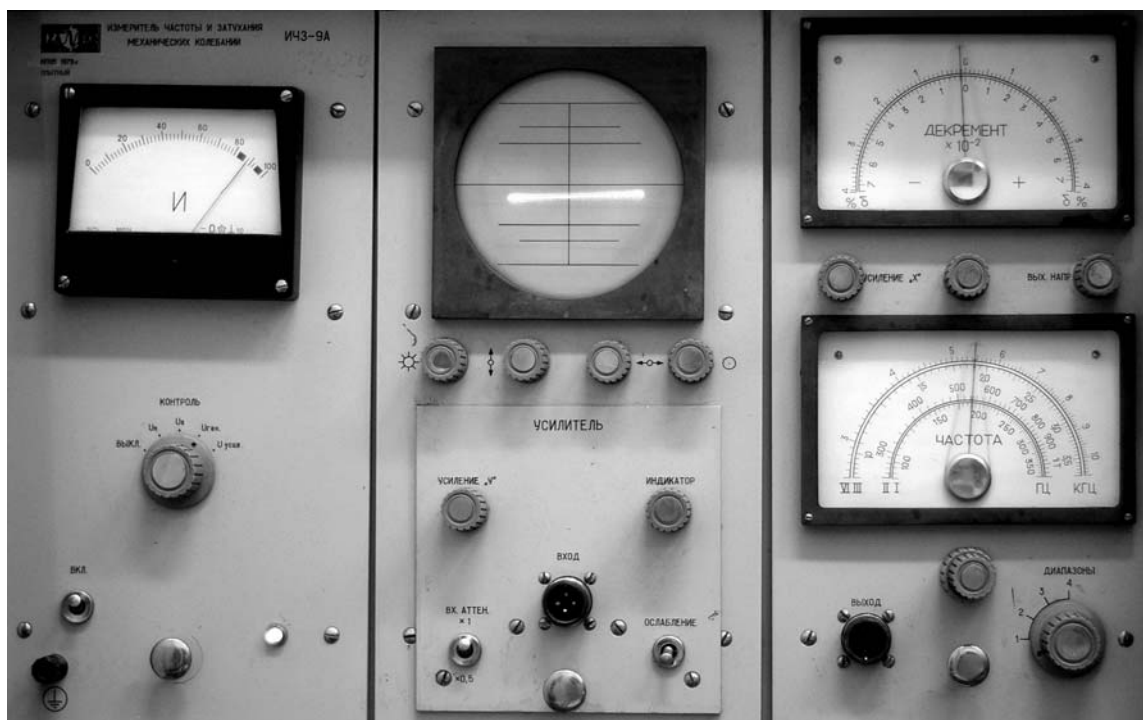


питания и контроля функционирования, при этом происходит и синхронное изменение отклонение стрелки индикатора (при положении ручки «КОНТРОЛЬ» в положении «U усил.»). Тумблером «Ослабление» можно уменьшить амплитуду принимаемого сигнала в 10 раз. Тумблер «ВХ. Аттен.» позволяет ослабить сигнал в 2 раза. В нижней части блока расположен разъем «ВХОД» для подключения кабеля, идущего от приемного индуктивного датчика.

Блока генерации сигнала возбуждения. Блок состоит из звукового генератора, амплитуда и частота которого могут задаваться пользователем. Ручкой «Диапазоны» можно дискретно переключать частотные поддиапазоны выходного сигнала: поддиапазон I – от 8 до 370 Гц, поддиапазон II – от 280 до 1400 Гц, поддиапазон III – от 800 до 3700 Гц, поддиапазон VI – от 2700 до 11000 Гц. Слева от ручки «Диапазоны» находится ручка-верньер плавной перестройки частоты, вращение которой синхронизировано с вращением стрелки на шкале частот (шкала «ЧАСТОТА»). В верхней части блока находится шкала «ДЕКРЕМЕНТ», а ниже ручка перестройки декремента<sup>1</sup>. Слева от нее находится ручка плавного изменения амплитуды выходного напряжения генератора – «ВЫХ.НАПР.», а справа – ручка изменения размера горизонтальной развертки «УСИЛЕНИЕ «X»». В нижней части блока расположен разъем «ВЫХОД» для подключения кабеля излучателя.

---

<sup>1</sup> Стрелка на шкале «ЧАСТОТА» указывает значение частоты выходного сигнала лишь в нулевом положении стрелки на шкале «ДЕКРЕМЕНТ»

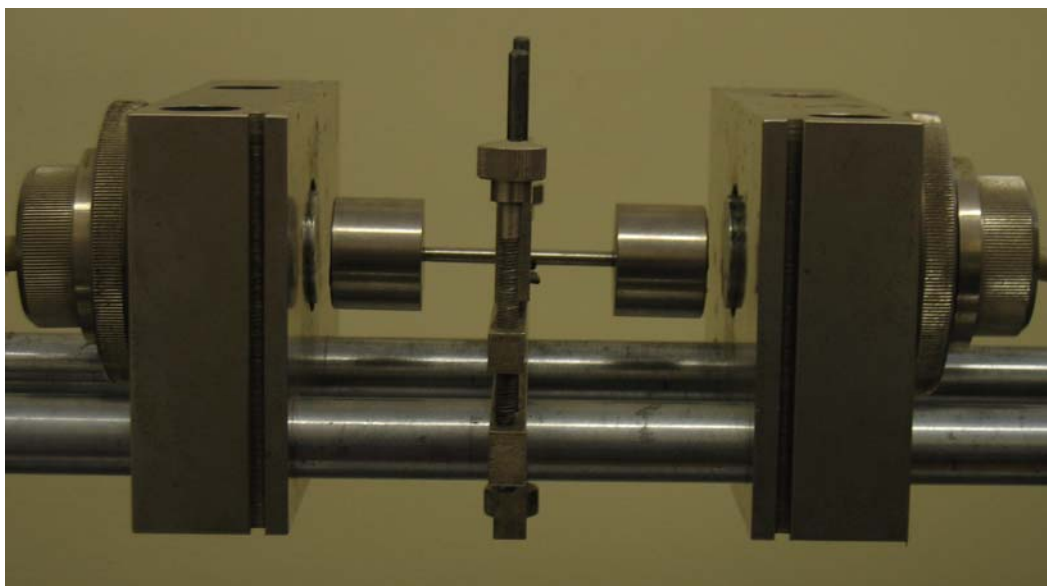


**Рисунок П2.1. Внешний вид электронной части аппарата для измерения скорости звука и затухания ИЧЗ-9А.**

Внешний вид механической части аппарата для измерения скорости звука и затухания (ИЧЗ-9А) представлен на рис. П2.2.

Слева в станине закреплен приемный индуктивный датчик, справа – излучатель, в центре на опоре расположен камертонный образец.

Ввиду того что для раскачки образцов и регистрации амплитуды колебаний используются индуктивные датчики, для корректной работы аппарата необходимо, чтобы на неферромагнитные материалы были приклеены тонкие (около 100 мкм) размером не менее 10x10 мм пластинки из ферромагнитного материала. Пластинки наклеиваются на образец так, чтобы при установке образца в станине они находились напротив датчиков. Также необходимо, чтобы зазор между пластинами и датчиками не превышал 0,1 мм, причем непосредственный контакт между датчиками и пластинами (или поверхностью образца) должен быть исключен.



**Рисунок П.2.2.** Внешний вид механической части аппарата для измерения скорости звука и затухания (ИЧЗ-9А) с установленным на опору гантельным образцом.



Фото камертонных образцов продольных колебаний – на рис. П.2.3.

**Рисунок П.2.3.** Гантельные образцы.