

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. М.В. ЛОМОНОСОВА**

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

А.И. Коробов, А.А. Карабутов, О.А. Сапожников

**УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ ВОЛНЫ В ТВЁРДЫХ
ТЕЛАХ**

**Методическая разработка
специального физического практикума
кафедры акустики**



**Физический факультет МГУ
2011**

537.

:

, .- . . . ;
, .- . . .

А.И. Коробов, А.А. Карабутов, О.А. Сапожников.
Ультразвуковые волны в твёрдых телах.

, 2011, 32 .

.— .:

© . . . , . . . , 2011 .
© . . . , 2011 .

(, , .).

, ,

,

.

. ,

,

.

P- (*prima*),

S-

(*seconda*).

P- S-

,

,

.

.

.

—

,

.

1.2. Объёмные волны

,

(2-) [1]:

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \frac{\partial T_{ij}}{\partial x_j} \quad (1)$$

$i, j = 1, 2, 3$ $x, y, z,$

$$\rho - \mathbf{u} = (u_x, u_y, u_z) - \quad (1)$$

T_{ij} .

(T_{xx}),

(T_{xy}).

$\partial u_i / \partial x_j$, $\partial u_x / \partial x$
 $\partial u_y / \partial z$ -

$$S_{ij} = (\partial u_i / \partial x_j + \partial u_j / \partial x_i) / 2.$$

()
 $T_{ij} = S_{ij}$, ...
 [2]:

$$T_{ij} = \lambda S_{kk} \delta_{ij} + 2\mu S_{ij}, \quad (2)$$

δ_{ij} - , λ μ - , λ

μ

$$(2) \quad (1),$$

[1]:

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = (\lambda + 2\mu) \text{grad div } \mathbf{u} + \mu \Delta \mathbf{u} \quad (3)$$

x .

$$\mathbf{u} = (u_x, u_y, u_z)$$

$$x \quad t, \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} = \frac{\lambda + 2\mu}{\rho} \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2}, \quad \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} = \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2}, \quad \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} = \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2}. \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}.$$

— *продольные,*
 u_x , *поперечные,*

$$u_y \quad u_z. \quad (4),$$

$$c_l = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}, \quad (5)$$

$$c_t = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (6)$$

(longitudinal transversal,) .
 , (5) (6)

, . . .

λ μ

$$E = \mu(3\lambda + 2\mu)/(\lambda + \mu)$$

$$\sigma = \lambda/[2(\lambda + \mu)].$$

:

$$c_l = \sqrt{\frac{E(1-\sigma)}{\rho(1+\sigma)(1-2\sigma)}}, \quad c_t = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\sigma)}} \quad (7)$$

$$c_t/c_l = \sqrt{(1-2\sigma)/[2(1-\sigma)]} .$$

$$0.25 \leq \sigma \leq 0.35 \text{ [3]},$$

$$c_t \approx (0.5 - 0.6)c_l.$$

. 1.

()

, . . .

:

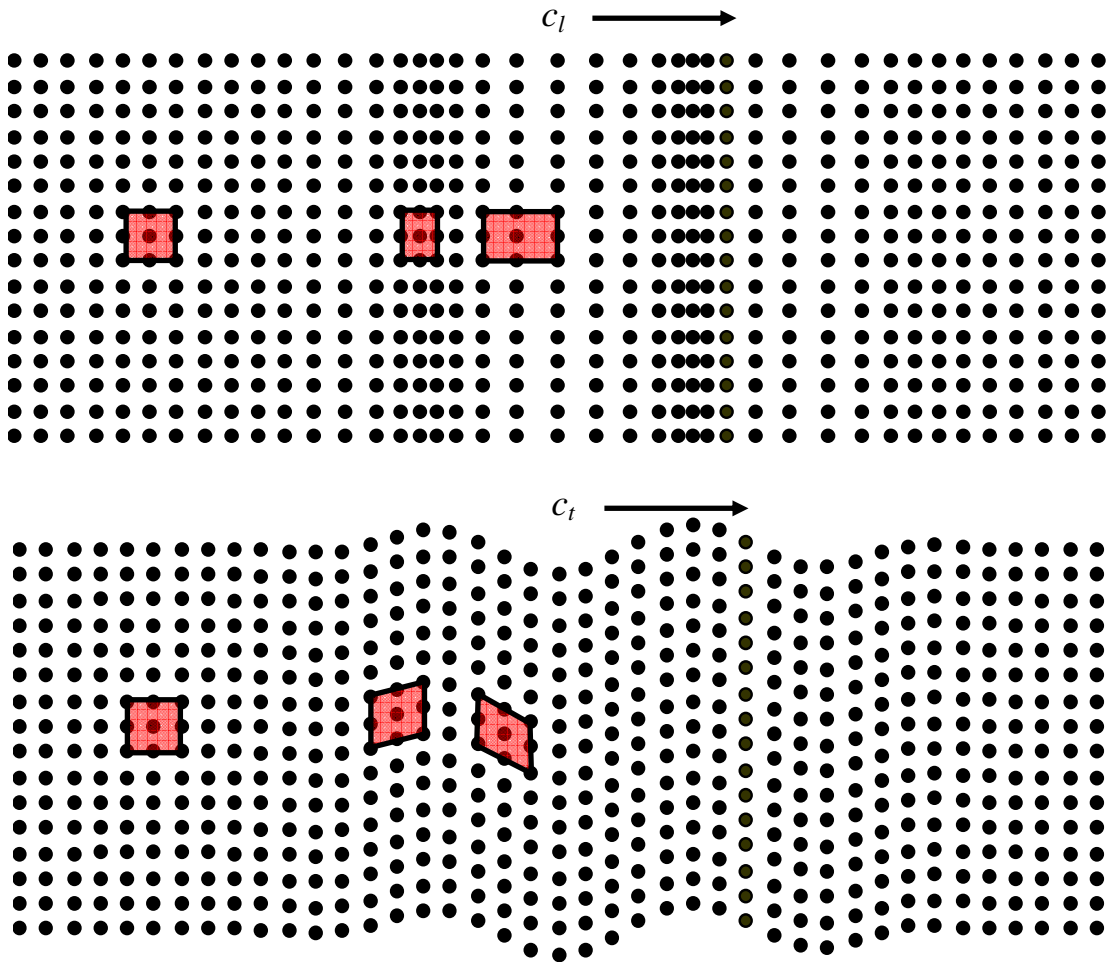


Рис.1

()

()

,

:

— .1

,

(

), . .

,

1.3. Поверхностные волны

,
 ,
 .
 - . ,
 ,
 - ; .

(3)

. x
 , z
 .
 $z = 0$: $T_{xz} = T_{yz} = T_{zz} = 0$.

. c_R
 ,
 y .

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_0(z) \exp[-i\omega(t - x/c_R)] .$$

(3)

, c_R
 $\mathbf{u}_0(z)$.
 c_R c_l c_t

[1 - 5]:

$$\eta^3 - 8\eta^2 + 8(3 - 2\xi)\eta - 16(1 - \xi) = 0 , \quad (8)$$

$$\eta = (c_R/c_t)^2 \quad , \quad \xi = (c_t/c_l)^2 = (1-2\sigma)/[2(1-\sigma)] \quad (8)$$

(8) [3, 7]:

$$c_R \approx c_t \frac{0.875 + 1.125\sigma}{1 + \sigma} \quad (9)$$

$$(9), \quad 0.25 \leq \sigma \leq 0.35$$

$$c_R \approx (0.92 - 0.94)c_t.$$

$\mathbf{u}_0(z)$.

, $y -$,
 z [7]:

$$u_{0x} = A \left[1 - \frac{c_R^2}{2c_t^2} e^{-qz} - \sqrt{1 - \frac{c_R^2}{c_l^2}} \sqrt{1 - \frac{c_R^2}{c_t^2}} e^{-sz} \right], \quad (10)$$

$$u_{0z} = -iA \sqrt{1 - \frac{c_R^2}{c_l^2}} \left[1 - \frac{c_R^2}{2c_t^2} e^{-qz} - e^{-sz} \right], \quad (11)$$

$A -$,
 $q \quad s$:

$$q = \frac{\omega}{c_R} \sqrt{1 - \frac{c_R^2}{c_l^2}}, \quad s = \frac{\omega}{c_R} \sqrt{1 - \frac{c_R^2}{c_t^2}} \quad (12)$$

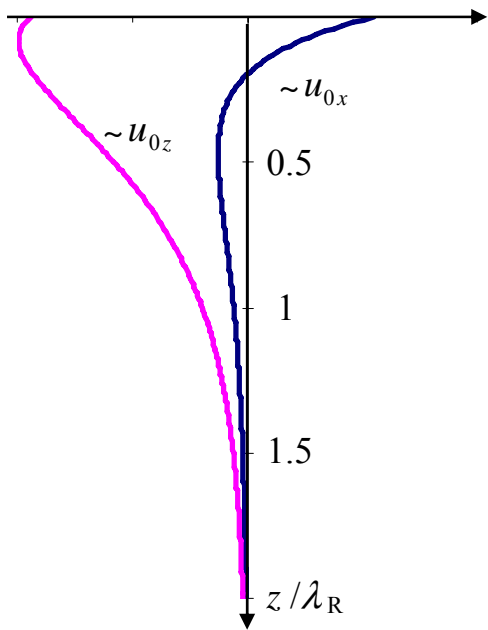


Рис. 2.

$$\sigma = 0.25.$$

$$q^{-1}, s^{-1},$$

« ».

$$u_{0x} \quad i u_{0z} \quad .2 \quad (10) \quad (11),$$

$$\lambda_R \sim c_R / \omega.$$

(11),

$$\pm \pi/2 ($$

$$u_{0z} \quad u_{0x}$$

i

$$(10)-(11)$$

$$\sim (0.15 - 0.3) \lambda_R$$

(

).

c_R

$$c_l \quad c_t, \quad (8) - (9).$$

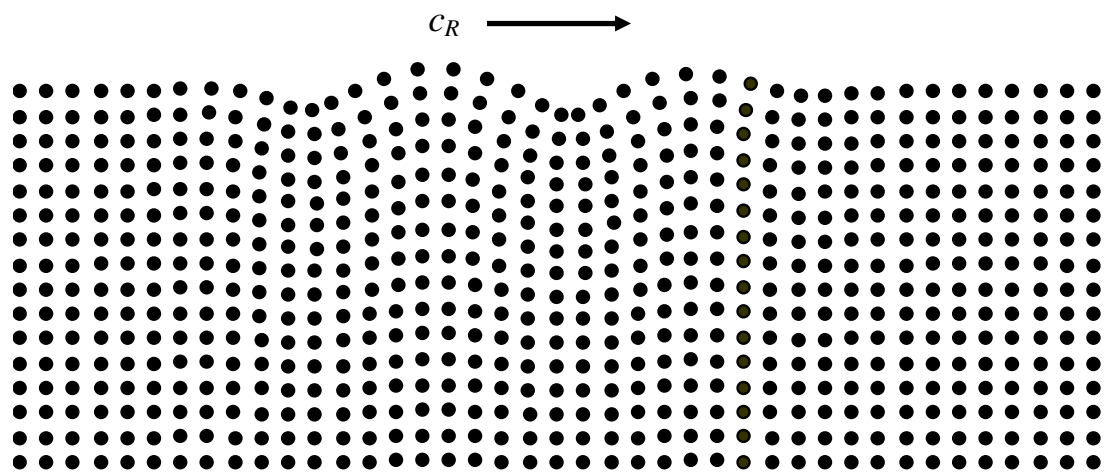


Рис.3

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

2.1. Некоторые принципы ультразвуковых измерений

2 - 45.

[8, 9].

[8].

).

(

(,

)

[9].

(,

«

»).

2.2. Особенности работы с ультразвуковым дефектоскопом УД2В-П45

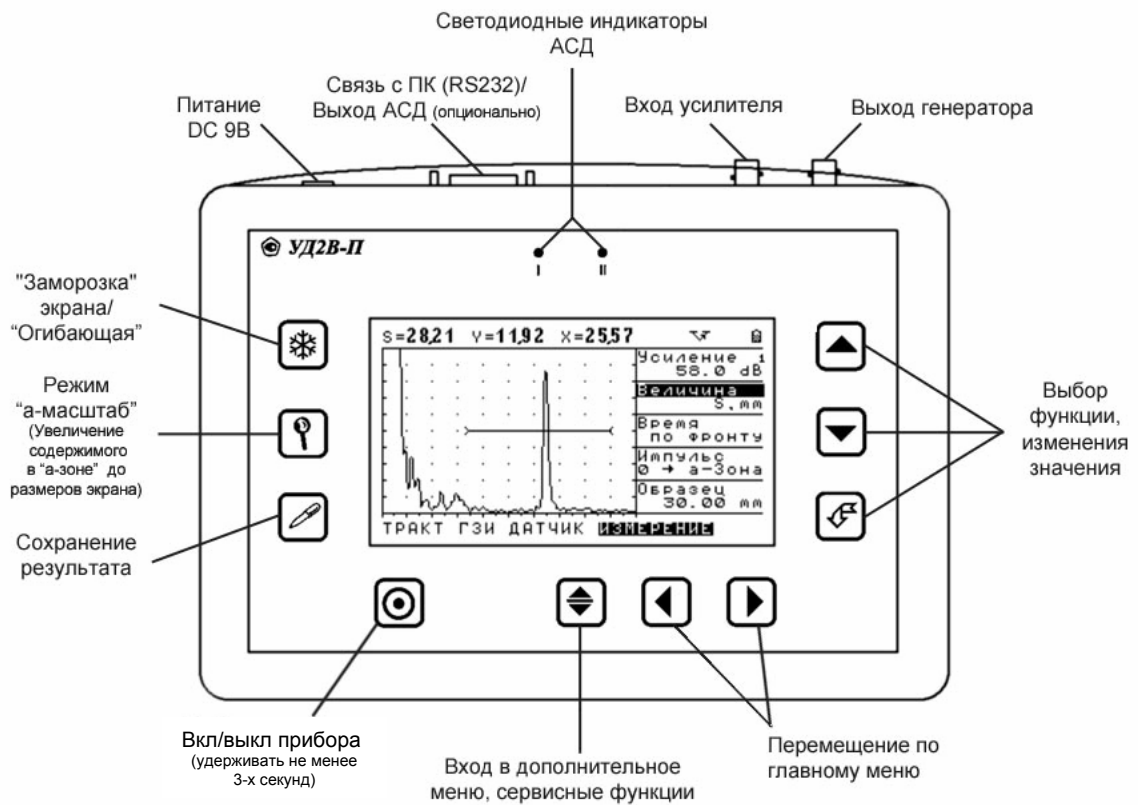


Рис. 4.

2 - 45

2 - 45,

.4.

« / »

3 (

).

« »,

, « »,



,

,



«

»

,

«

»

«

»

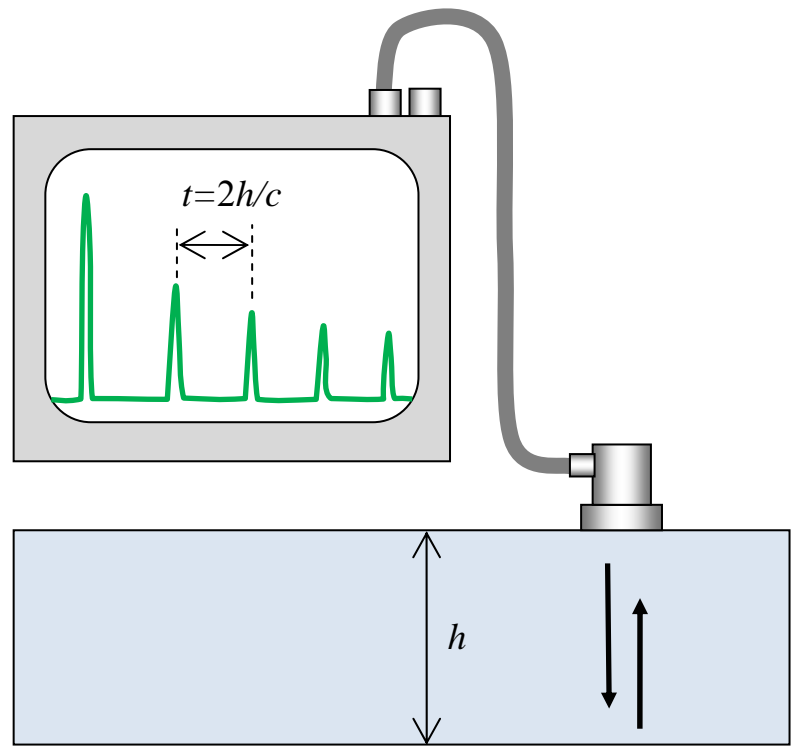
2.3. Методика измерения скорости продольных волн

-

.5.

Рис. 5.

$t=2h/c$, h –
 c –



()

()

5

0.6

(. . 5).

« » « ».

2 -

h,

$$\Delta t = t_2 - t_1 = 2h/c .$$

:

$$c = \frac{2h}{t_2 - t_1} \quad (13)$$

2.4. Способ возбуждения и приёма поверхностных волн

.6.

φ .

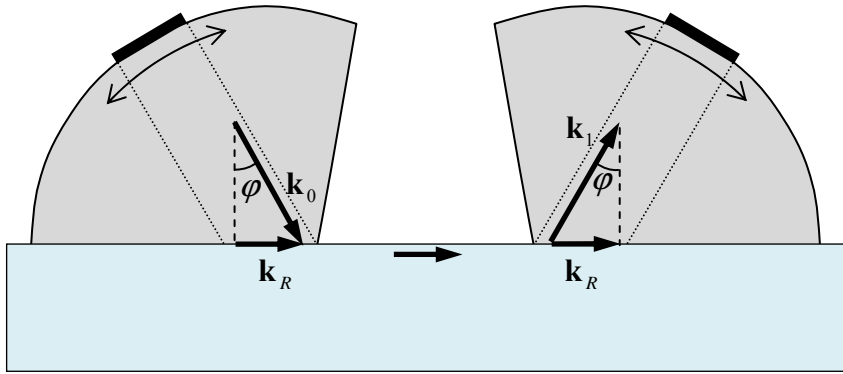


Рис. 6.

$$V = c_l^{()} - \quad , \quad c_R^{()} .$$

$$V = c_l^{()} / \sin \varphi .$$

$$V = c_R^{()} ,$$

$$\sin \varphi = \frac{c_l^{()}}{c_R^{()}} . \quad (14)$$

$$: c_l^{()} - \quad , \quad c_R^{()} -$$

$$\varphi \quad (14)$$

$$(14). \quad (\text{ . 6}): (\omega / c_l^{()}) \sin \varphi = \omega / c_R^{()} ,$$

$$c_l^{(\cdot)} / \sin \varphi = c_l^{(\cdot)} / \sin \psi_l = c_t^{(\cdot)} / \sin \psi_t . \quad \varphi$$

(14),

$$\sin \psi_l = c_l^{(\cdot)} / c_R^{(\cdot)} \quad \sin \psi_t = c_t^{(\cdot)} / c_R^{(\cdot)} , \dots$$

(14)

(14)

$$c_R^{(\cdot)} > c_l^{(\cdot)} .$$

$$(c_l^{(\cdot)} \approx 2700 \text{ / })$$

φ ,

(14).

3. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ











3.1. Измерение скорости продольных волн эхо-импульсным методом (к упражнению 1)

































(рис. 7),
(рис. 5).









Рис. 7.

3
(рис. 4).

- 1) Войти в дополнительное сервисное меню, нажав кнопку .
- 2) В появившемся меню переместить курсор (чёрная полоса) кнопками  и  выделить пункт «Режим контроля».
- 3) Перейти в режим редактирования кнопкой .
- 4) Переключить режим работы в режим «эхо» кнопками  и  (альтернативным является режим «теневой» - он в данных измерениях не нужен).
- 5) Выйти из режима редактирования кнопкой  (фон слова «эхо» при этом станет светлым) и из дополнительного меню кнопкой .
- 6) Перейти в меню к разделу «ДАТЧИК», используя кнопки  и  (добиться того, чтобы в нижней части экрана появилось слово «ДАТЧИК» на тёмном фоне)

- 7) Кнопками  и  выбрать раздел подменю «Совм. режим» (добиться того, чтобы в правой части экрана появилось слово «Совм. режим» на тёмном фоне).
- 8) Войти в режим редактирования () и перевести его статус кнопками  и  в состояние «Да».
- 9) Выйти из режима редактирования (
 - 1) Выбрать меню раздел «ОСНОВНЫЕ» (слово в нижней части экрана), используя кнопки  и .
 - 2) Выделить в подменю раздел «Усиление» (слово в правой части экрана) кнопками  и  и войти в режим редактирования кнопкой . Установить значение 50 дБ, пользуясь кнопками  и . Выйти из режима редактирования кнопкой .
 - 3) Выделить в подменю раздел «Скорость» кнопками  и  и войти в режим редактирования кнопкой . Установить значение 1000 м/с, пользуясь кнопками  и . (Конкретное значение скорости в данных измерениях не принципиально и выбрано здесь лишь для удобства). Выйти из режима редактирования кнопкой .
 - 4) Выделить в подменю раздел «Задержка» кнопками  и , войти в режим редактирования кнопкой . С помощью кнопок  и  установить значение задержки 1 мкс. Выйти из режима редактирования кнопкой .
 - 5) Выделить в подменю раздел «Развертка» кнопками  и  и войти в режим редактирования кнопкой . Прижать датчик к поверхности образца и, начиная от значения 10.00 мм, увеличивать значение развертки с помощью кнопок  и  до тех пор, пока на экране не будет видна серия затухающих импульсов. Установить такое значение развертки, чтобы на экране поместилось два или более отражённых импульсов. Выйти из режима редактирования кнопкой .

б) Если амплитуды импульсов слишком велики или слишком малы, вновь выделить в подменю раздел «Усиление» кнопками  и  и войти в режим редактирования кнопкой . Пользуясь кнопками  и , установить значение усиления таким образом, чтобы первый отражённый импульс занимал по высоте весь экран. Выйти из режима редактирования кнопкой .


á

Δt

« - » « - ».



« - » , « - » - . 8.




- - , (. 8)

« » ,  « »

1-

2-

1) Выделить в меню раздел «а-ЗОНА», используя кнопки  и .

2) Выделить в подменю раздел «а-Начало» кнопками  и  и войти в режим редактирования кнопкой .

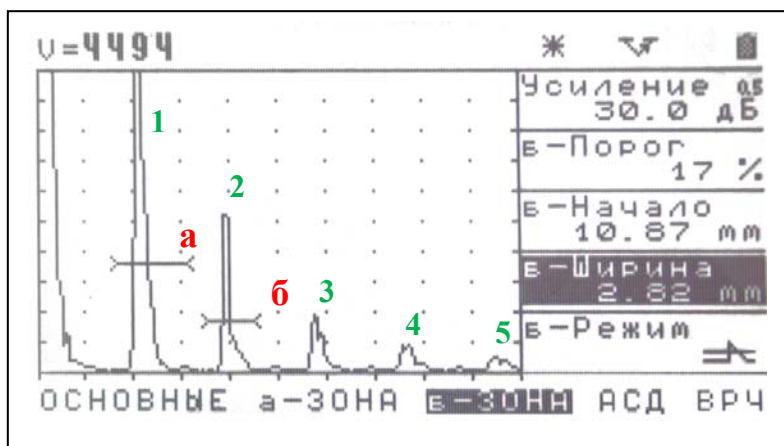



































Рис. 8

а б,

- 3) Изменить начало зоны кнопками  и  таким образом, чтобы начало значка зоны >---< находилось на расстоянии порядка нескольких длительностей импульса слева от первого отражённого импульса. Режим регулировки (плавный или грубый) может быть установлен кнопкой . При плавной регулировке подменю будут отображать текст строчными буквами («а-Начало»), при грубой – заглавными («а-НАЧАЛО»). Выйти из режима редактирования нажать кнопку .
- 4) Аналогичным образом задать ширину интервала измерения (пункт подменю «а-Ширина») кнопками  и  таким образом, чтобы конец значка зоны >---< находился на расстоянии в несколько длительностей импульса справа от первого отражённого импульса. Выйти из режима редактирования, нажав кнопку .
- 5) Чтобы малоамплитудные шумы не влияли на измерения, необходимо выставить уровень отсечки – пункт подменю «а-Порог». Действуя аналогично предыдущим настройкам, установить высоту положения отрезка значка зоны >---< на уровне, превышающем шумы, но лежащем ниже пика импульса.
- 6) Если необходимо, отрегулировать усиление сигнала в пункте подменю «
». Добиться того, чтобы вершина первого импульса находилась в верхней половине экрана.
- 7) Выделить в меню раздел «б-ЗОНА», используя кнопки  и , а затем, выбрав в качестве импульса 2-й отражённый сигнал, выставить параметры в той же последовательности, как описано выше для 1-го импульса.

- 1) Выбрать меню «ИЗМЕРЕНИЕ» (слово в нижней части экрана), используя кнопки  и .
- 2) Выделить подменю «Усиление» (слово в правой части экрана) кнопками  и , войти в режим редактирования кнопкой , и установить усиление таким, чтобы оба используемых импульса были выше уровня, на котором находятся маркеры зон >---<. При этом должны загореться оба красных индикатора над экраном. Выйти из режима редактирования, нажав кнопку .

- 3) Выделить раздел подменю «Величина» кнопками  и , войти в режим редактирования кнопкой , и выбрать в качестве измеряемой величины скорость «V, м/с». Выйти из режима редактирования, нажав кнопку .
- 4) Выделить раздел подменю «Время» кнопками  и , войти в режим редактирования кнопкой , и выбрать в качестве метода регистрации времени прихода импульса «по пику». Выйти из режима редактирования, нажав кнопку .
- 5) Выделить раздел подменю «Импульс» кнопками  и , войти в режим редактирования кнопкой , и выбрать в качестве режима измерения «а → б-Зона». Выйти из режима редактирования, нажав кнопку .
- 6) Выделить раздел подменю «Образец» кнопками  и , войти в режим редактирования кнопкой , ввести численное значение толщины исследуемого образца, изменяя число на экране кнопками  и . Выйти из режима редактирования кнопкой .

,

>---<

,

« » ,

>---< - «а-ЗОНА» «б-ЗОНА», .

,

/ ,

.

10-

,

1 ,

.

3.2. Измерение скорости поверхностных волн (к упражнению 2)

.6.
.9.

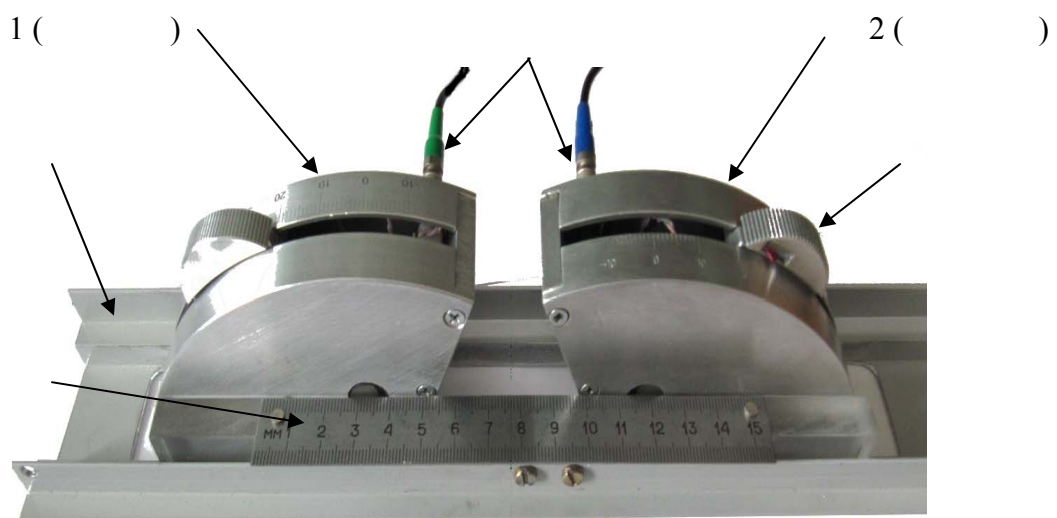


















Рис. 9.



























14-127) (14-014) (4).


















1 2






« ».

- 1) Войти в дополнительное сервисное меню, нажав кнопку .
- 2) В появившемся меню переместить курсор (чёрная полоса) кнопками  и  выделить пункт «Режим контроля», перейти в режим редактирования кнопкой  и переключить кнопками  или  режим работы в режим «теневой» (т.е. альтернативный к ранее использованному режиму «эхо»). Выйти из режима редактирования кнопкой  и из дополнительного меню кнопкой .
- 3) Перейти в меню к разделу «ДАТЧИК», используя кнопки  и .
- 4) Кнопками  и  выбрать пункт подменю «Совм. режим», войти в режим редактирования () и перевести его статус кнопками  и  в состояние «Нет» (вместо ранее использованному состоянию «Да»). Выйти из режима редактирования (

60°.

- 1) Выбрать меню раздел «ОСНОВНЫЕ», используя кнопки  и .
- 2) Выделить в подменю раздел «Усиление» кнопками  и  и войти в режим редактирования кнопкой . Установить значение 100 дБ, пользуясь кнопками  и . Выйти из режима редактирования кнопкой .
- 3) Убедиться, что в разделе подменю «Скорость» стоит значение 1000 м/с. Если это не так, то перейти к этому разделу кнопками  и , войти в режим редактирования кнопкой  и установить значение 1000 м/с, пользуясь кнопками  и , а затем выйти из режима редактирования кнопкой .
- 4) Выделить в подменю раздел «Развертка» кнопками  и  и войти в режим редактирования кнопкой . Прижать датчик к поверхности образца и с помощью кнопок  и  установить значение 50.00 мм. Выйти из режима редактирования кнопкой .
- 5) Выделить в подменю раздел «Задержка» кнопками  и , войти в режим редактирования кнопкой . С помощью кнопок  и  установить значение задержки 30.00 мкс. Выйти из режима редактирования кнопкой .
- 6) На этом этапе примерно в центре экрана должен быть виден импульс, соответствующий поверхностной волне. Если он не виден или слишком велик, то вернуться к разделу подменю «Усиление» и отрегулировать усиление так, чтобы импульс имел пиковое значение в верхней части экрана.
- 7) Меняя ползками на клиновых преобразователях величины углов падения и приёма (соблюдая их примерное равенство), добиться максимума сигнала. Записать полученные углы излучения φ и приёма φ для данного материала (они потребуются для отчёта).

- 1) Находясь в разделе меню «ОСНОВНЫЕ», перейти кнопками  и  в раздел подменю «Задержка» и войти в режим редактирования кнопкой . С помощью кнопки  увеличить задержку до тех пор, пока начало импульса не установится между 0-м и 1-м делениями у левой границы области изображения. Выйти из режима редактирования кнопкой .
- 2) Перейти кнопками  и  в раздел подменю «Развертка» и войти в режим редактирования кнопкой . С помощью кнопки  уменьшить развёртку до тех пор, пока не проявится тонкая структура импульса (она представляет собой модуль от величины истинного сигнала). Сигнал на экране дефектоскопа будет иметь вид, показанный на рис. 10 а. Кнопками  и  выбрать развёртку такой, чтобы расстояние между нулями наблюдаемого сигнала составляло примерно одно деление временной шкалы. Выйти из режима редактирования кнопкой .
- 3) Вновь перейти кнопками  и  в раздел подменю «Задержка» и войти в режим редактирования кнопкой . С помощью кнопки  увеличить задержку до тех пор, пока первый ноль слева от самого высокого пика импульса не окажется максимально близко к левой границе области изображения. При этом сигнал должен выглядеть примерно так, как показано на рис. 10 б.
- 4) Записать получившееся значение задержки t_1 . Выйти из режима редактирования кнопкой .

- 5) Записать координаты x_1 и y_1 (в миллиметрах) точек пересечения края измерительной линейки и наклонных граней клиновых преобразователей. Рассчитать начальное расстояние $L_1 = y_1 - x_1$.
- 6) Перейти кнопками  и  в раздел подменю «Развертка», войти в режим редактирования кнопкой . С помощью  вновь установить развёртку равной 50.00 мм. Выйти из режима редактирования кнопкой . На экране вблизи левой границы должен быть виден тот же короткий импульс, что и в начале измерений.
- 7) Аккуратно придерживая клиновые преобразователи, развести их так, чтобы расстояние между ними увеличилось примерно на 50 мм. Убедиться, что сигнал поверхностной волны присутствует на экране (при увеличении расстояния между клиновыми преобразователями сигнал сместится вправо). В противном случае проверить надёжность прижима клиновых преобразователей к поверхности образца и, если нужно, смазать поверхность маслом.
- 8) Записать координаты x_2 и y_2 (в миллиметрах) точек пересечения края измерительной линейки и наклонных граней клиновых преобразователей. Рассчитать новое расстояние $L_2 = y_2 - x_2$.
- 9) Повторить шаги 1 - 4 и записать получившееся значение задержки t_2
- 10) Рассчитать скорость поверхностной волны по формуле
$$c_R = (L_2 - L_1) / (t_2 - t_1).$$

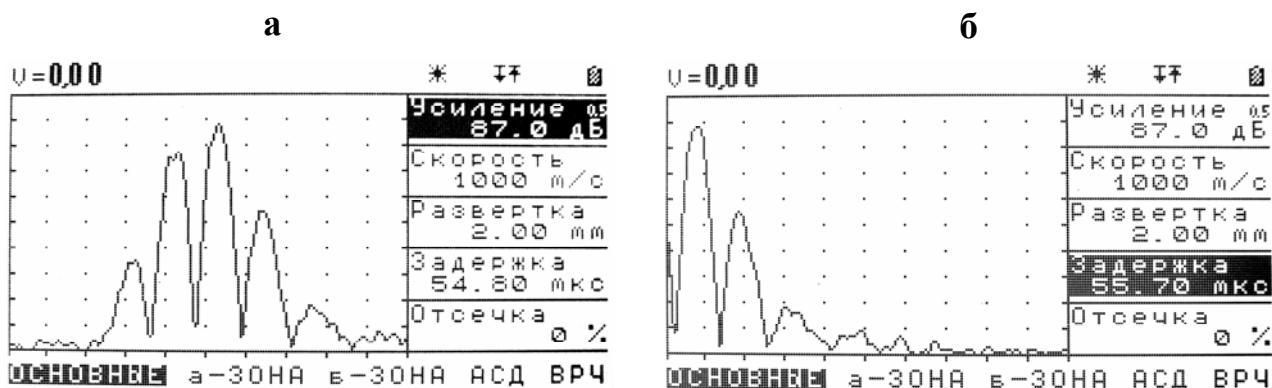


Рис. 10.

3.3. Описание заданий

Упражнение 1. Определение скорости продольных волн эхо-импульсным методом

- 7- -
(. 1).
1. ,
. 4.
2. , (. 7,)
:
!
3. . 3.1.
4. 10- , 10-
1 .
5. (. . 1) , (7)

Упражнение 2. Определение скорости поверхностных волн

- 4- :
1. ,

. 3.2.

2.

. 3.2.

$L_1, L_2, t_1, t_2,$

$$c_R = (L_2 - L_1) / (t_2 - t_1)$$

φ

φ

3.

(. . . 1 . . .),
(9)

(14) -

$$c_l^{()} = 2700 \text{ /c.}$$

($\bar{c} \pm \Delta c$):

	$c_l (/)$		$c_t (/)$	$c_R (/)$		$\varphi ()$		
	φ	φ

ЛИТЕРАТУРА

1. : -
- , 1992, 152 .
2. , 4 . - , 1987,
. 3, § 24.
3.
. - : , 1966.
4. -
, 1984, 403 .
5. , 2 . - , 1973, . 1, § 6.

Дополнительная литература

6. , , . 7.
- , 1974, . 4.
7. - ,
1996, . 6, § 6.1 - 6.2, . 176-188.
8. ,
. - , 1990, 656 .
9.
5 2: :
. - , 1991, 283 .

ПРИЛОЖЕНИЕ. Справочные данные об исследуемых образцах

(7) (9)

1

1

Таблица 1.

	ρ (/ ³)	σ	E (10^{10} / ²)	h ()
	1150	0.39	0.42	18.0
(~70%Cu, 30%Zn)	8500	0.36	10.	23.6
	8900	0.35	12.3	26.3
(~94% Al, 6% Cu+Mg+Mn)	2700	0.34	7.	29.3
	2500	0.24	7.	32.6
	7800	0.30	21.	39.5
(~90% Mg, 10% Al+Zn+Mn)	1800	0.35	4.8	41.7