

## ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТЕЙ ПРУЖНИХ КОЛИВАНЬ УЛЬТРАЗВУКОВИМ ВИМІРЮВАЧЕМ

В. О. АНДРУЩЕНКО, А. П. ОНАНКО, С. А. ПОПОВ,  
Г. Т. ПРОДАЙВОДА, С. А. ВИЖВА, Ю. А. ОНАНКО

*Київський національний університет імені Тараса Шевченка*

В основі імпульсних методів покладено ідеї радіолокаційної техніки, що дали можливість використовувати методи радіоелектроніки для вимірювання швидкостей  $V$  розповсюдження коротких височастотних імпульсів у пружному середовищі. Зразок, розміри якого у всіх напрямках у багато разів перевищують довжину хвилі  $l_0 \gg \lambda$ , що розповсюджується може розглядатися як нескінченно протяжне середовище, а хвилі  $\lambda$ , що розповсюджуються, - як плоскі хвилі швидкості яких визначаються модулями пружності середовища  $C_{ik}$ . Таким чином, кристал з лінійними розмірами в декілька міліметрів може буде являти собою “необмежене середовище” для коливань, частоти яких лежать в діапазоні  $f \approx 10$  МГц.

Якщо в зразок довжиною  $l_0$  за допомогою п'єзоелектричного перетворювача надіслати короткий УЗ імпульс тривалістю  $\tau$  і частотою  $f$ , то пройшовши через зразок за час  $T = l_0/V$ , пружна хвиля буде прийнята приймачем УЗ на протилежній стороні зразка і частково відіб'ється від його торцевої поверхні. Універсальність імпульсного УЗ методу роблять його найбільш зручним для дослідження пружних властивостей мінералів і гірських порід. В останні роки цей метод стає переважаючим при дослідженнях твердих тіл. В усіх модифікаціях імпульсного методу вимірюваними величинами є швидкості  $V$  розповсюдження пружних хвиль в середовищі. Відбита хвиля піде у зворотному напрямку, знову відіб'ється і повернеться до приймача через інтервал часу  $2T$ . Процес послідовних відбиттів пружної хвилі в плоскопаралельному зразку буде продовжуватися до повного затухання хвилі за рахунок втрат у зразку та інших причин. Імпульси ультразвуку, прийняті приймачем, після підсилення можуть спостерігатися на екрані осцилографу у вигляді послідовності імпульсів, що затухає, розділених інтервалами часу, що дорівнюють  $T$  і  $2T$ .

Вимірювання швидкості розповсюдження ультразвукових коливань у зразках твердих тіл, приладом УЗВШ-ЛЕТІ, засновано на порівнянні часу розповсюдження УЗ у зразку і в еталонній рідині, для якої відома швидкість розповсюдження УЗ. Час розповсюдження імпульсу в зразку з заданими розмірами може визначатися, наприклад, шляхом введення в схему приладу другого каналу 3, де ультразвук розповсюджується в середовищі з відомим значенням швидкості УЗ  $V_{et}$ , на рис. 1.

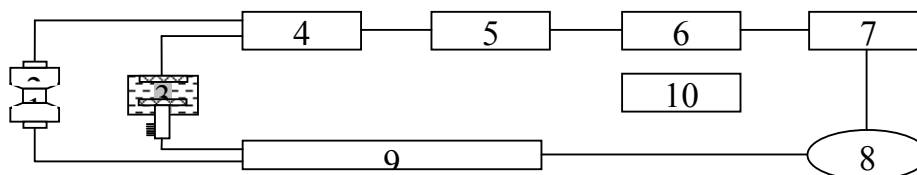


Рис.1 Блок-схема приладу УЗВШ-ЛЕТІ: 1 - зразок, 2 - вимірювальна лінія, 3 - еталонна лінія, 4 - генератор коротких імпульсів, 5 - задаючий мультівібратор, 6 - чекаючий мультівібратор, 7 - генератор розгортки, 8 - електронно-променева трубка, 9 - підсилювач, 10 - блок живлення

Задаючий мультивібратор генерує прямокутні імпульси змінної довжини (рис.1). Переднім фронтом імпульсу запускається генератор коротких імпульсів, що збудує одночасно п'єзопластини в еталонній (ЕЛ) і вимірювальній (ВЛ) лініях. Заднім фронтом прямокутного імпульсу запускається чекаючий мультивібратор, що формує від'ємний прямокутний імпульс, тривалість якого визначає час розгортки променя по екрану електронно-променевої трубки. Положення за часом від'ємного імпульсу чекаючого мультивібратора по відношенню до імпульсу генератора коротких імпульсів визначається тривалістю імпульсу задаючого мультивібратора і регулюється ручкою "задержка". Цей пристрій дозволяє переглянути імпульси з ліній затримки (ЕЛ) і (ВЛ) у різні відрізки часу, від моменту запуску генератора коротких імпульсів, і з найбільшою зручністю проводити відлік по екрану приладу.

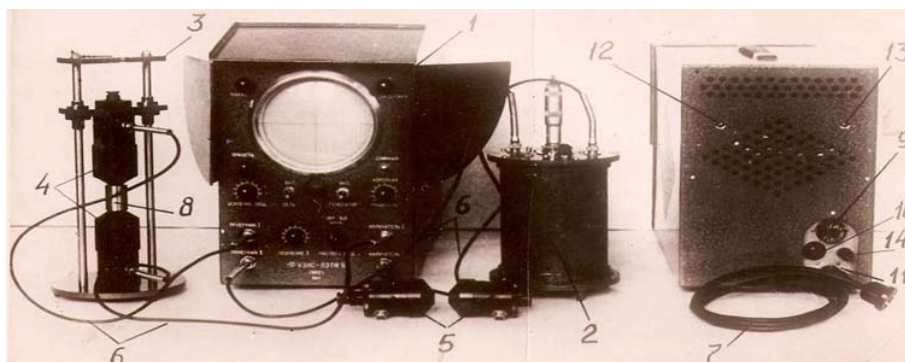


Рис.2 Прилад УЗВШ-ЛЕТІ

Імпульси УЗ коливань, перетворені прийомними п'єзопластинами в електричні коливання, подаються на підсилювач приладу і спостерігаються на електронно-променевої трубці. Обертанням мікрометричного гвинта еталонної лінії (ЕЛ) оператор може міняти відстань між п'єзопластинами і, отже, час проходження УЗ імпульсу через еталонну лінію. При вимірюваннях суміщають, обертуючи мікрометричний гвинт, зображення імпульсів на екрані приладу, тобто роблять час проходження УЗ через еталонну і вимірювальну лінії однаковим. Таких відліків роблять два: перший без зразка у вимірювальній лінії, другий зі зразком. Різниця часу проходження УЗ у вимірювальній лінії без зразка і зі зразком визначається за довжиною стовпа рідини, в якому час проходження УЗ відповідає часу проходження у зразку. Отже, знаючи довжину зразка  $l$ , швидкість розповсюдження УЗ в еталонній рідині  $V_{ет}$  і довжину стовпа еталонної рідини  $L$ , в якому час проходження УЗ відповідає часу проходження УЗ через зразок, швидкість УЗ коливань  $V_{зр}$  визначається з формули

$$V_{зр} = \frac{l}{L} V_{ет}.$$

Прилад УЗВШ-ЛЕТІ складається з вимірювальної лінії (3), в яку закладається випробовуваний зразок (8), еталонної лінії (2) і електронного пристрою (1), представлених на рис.2, що формує короткий імпульс напруги для збудження кварцових пластин вимірювальної і еталонної ліній з синхронним осцилоскопом, що дозволяє порівнювати малі проміжки часу проходження УЗ у зразку і в еталонній рідині.

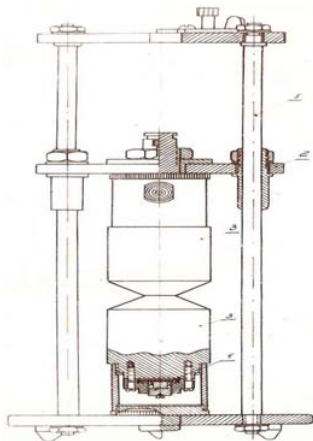


Рис.3 Вимірювальна лінія

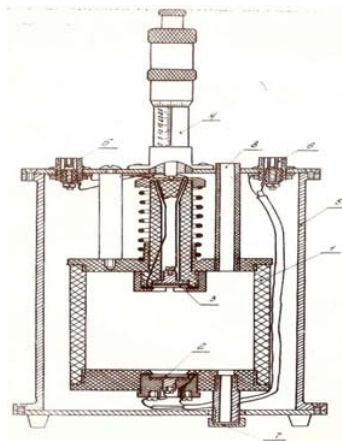


Рис.4 Еталонна лінія

Вимірювальна лінія, зображена на рис.3, складається із станини з напрямними (1) і рухомої траверси (2) для кріплення п'єзокварцових датчиків для повздовжніх і поперечних коливань (3). Випробовуваний зразок поміщається між кварцовими датчиками (3) на акустичний контакт. Кварцовим датчиком є металевий концентратор (3) циліндрової форми з приклеєною кварцовою п'єзопластиною (4), Х - зрізу для повздовжніх і У - зрізу для поперечних коливань і пристроєм для кріплення датчика до станини і приєднання коаксіального кабелю.

Еталонна лінія, представлена на рис.4, складається з циліндрової поліетиленової посудини (1), залитої еталонною рідиною, що має малу зміну величини швидкості розповсюдження ультразвуку в робочому інтервалі температур. У рідину поміщені дві кварцові п'єзопластини: нерухома (2) і рухома (3), переміщувана мікрометричній гвинтом (4) з шкалою відліку переміщення пластини. Поліетиленова посудина з кварцовими пластинами поміщена в металевий корпус (5), в якому також змонтований пристрій для регулювання і виключення сигналу з еталонної лінії, приєднання сполучних кабелів (6) і пристосування для зливання (7) і заливки (8) еталонної рідини.

Електронний блок містить задаючий мультівібратор, що синхронізує роботу приладу, генератор коротких імпульсів, схему розгортки променя електронно-променевої трубки, підсилювач сигналів, електронно-променеву трубку для спостереження імпульсів, що пройшли вимірювальну і еталонну лінії, і блок живлення електронної схеми.

Робота приладу відбувається таким чином: задаючий мультівібратор ( $J_3$ ) генерує прямокутні імпульси з частотою повторення близько 2 кГц. З правого анода (6) лампи задаючого мультівібратора ( $J_3$ ) від'ємний імпульс подається на сітку (4) лампи буферного каскаду ( $J_2$ ) і з анода (3) буферного каскаду, в додатній полярності, подається на сітку (5) генератора коротких імпульсів ( $J_1$ ) – тиратрона, що працює в режимі ключа. При приході додатного імпульсу тиратрон підпалюється переднім фронтом імпульсу і розряджає ємність  $C_2$  через контур, утворений кварцовими п'єзопластинами  $KB_1$  і  $KB_3$  і котушками  $L_1$  (для частоти 5 МГц) або  $L_1$  і  $L_2$  (для частоти 1,67 МГц), викликаючи ударне збудження цього контуру. Затухання контуру, а отже, і час звучання контуру регулюється реостатом  $R_1$  “мощность”. Кварцові п'єзопластини  $KB_1$  і  $KB_3$  перетворюють електричні коливання в механічні ультразвукові коливання тієї ж частоти і залежно від зрізу кварцу Х - зрізу повздовжні, а У - зрізу поперечні коливання.

Для гасіння тиратрона після розряду ємкості  $C_2$  використовується ліва половина лампи  $L_2$ , яка знижує напругу на аноді тиратрона після розрядження ємкості до напруги згасання тиратрона.

УЗ коливання, що пройшли еталонну лінію, збуджують кварц  $KB_2$ , з кварцу електричні коливання через потенціометр  $R_{53}$  “усиление П”, регулюючого величину сигналу з еталонної лінії, надходять на сітку (5) лампи змішувача  $L_8$  (при частоті 5 МГц до сітки (5) лампи  $L_8$  підключається котушка  $L_5$ ). УЗ коливання, що пройшли вимірювальну лінію, збуджують контур, що складається з кварцу  $KB_4$  і котушок  $L_3$  (для  $f \approx 5$  МГц) або  $L_3$  і  $L_4$  (для  $f \approx 1,67$  МГц). Електричні коливання з котушок надходять на потенціометр  $R_{54}$  “усиление I”, яким регулюється величина сигналу від вимірювальної лінії, і з потенціометра  $R_{54}$  на сітку (4) лампи  $L_7$  попереднього підсилювача. Посилені коливання з анода (8) лампи  $L_7$  подаються на сітку (8) лампи  $L_8$  змішувача. У катоді лампи змішувача  $L_8$  включений реостат  $R_{62}$  “усиление общее”, регулюючий величину сигналів з еталонної і вимірювальної ліній одночасно. Після змішувача сигнали надходять на підсилювач напруги  $L_9$ ,  $L_{10}$ ,  $L_{11}$ ,  $L_{12}$  і  $L_{13}$  і з нього на пластини електронно-променевої трубки  $L_{14}$ , що вертикально відхиляють, на екрані якої спостерігаються оператором.

Заднім фронтом додатного імпульсу, що знімається з анода (3) лампи  $L_3$  задаючого мультівібратора, запускається мультівібратор  $L_4$ , що чекає та генерує залежно від положення перемикача  $P_{2(1)}$  “длинная” “короткая” прямокутні імпульси тривалістю 40 мксек для довгої розгортки або 20 мксек для короткої. Імпульсом від’ємної полярності, що знімається з анода (2) мультівібратора, що чекає, запускається генератор розгортки  $L_5$ , що формує імпульс напруги розгортки, що лінійно-зростає. Швидкість наростання напруги імпульсу залежить від положення перемикача  $P_{2(2)}$ . З генератора розгортки імпульс напруги, що лінійно-зростає, подається на парафазний підсилювач розгортки  $L_6$  і з нього на пластини електронно-променевої трубки  $L_{14}$ , що горизонтально відхиляють.

При довгій розгортці перемикач  $P_{2-1}$  підключає паралельно конденсатору  $C_{14}$  конденсатор  $C_{15}$  і паралельно конденсатору  $C_{19}$  ланцюжок з конденсатора  $C_{20}$  і опору  $R_{32}$ , чим забезпечується розгортка променя електронно-променевої трубки на весь екран за час 40 мксек. При короткій розгортці конденсатори  $C_{15}$ ,  $C_{20}$  і опір  $R_{32}$  не підключені, і промінь проходить екран за 20 мксек, чим забезпечується крупніший масштаб сигналу на екрані електронно-променевої трубки по горизонталі, дозволяючи тим самим детально розглядати сигнал на екрані.

Процес вимірювання полягає у суміщенні імпульсів а і б на екрані осцилографа зі зразком без зразка. За різницею шляху у рідині визначається швидкість звуку у зразку. Тоді  $T$  визначається з двох вимірів – без зразка і з зразком. При цьому імпульси обох каналів суміщаються на екрані осцилографу, а в другому каналі шлях ультразвуку може змінюватись. Так у приладі УЗВШ, що працює на частотах  $f_1 \approx 1,67$  МГц і  $f_2 \approx 5$  МГц, забезпечувалась точність вимірювань  $\Delta V/V \approx 0,5 \div 1,5\%$  в залежності від довжини зразка  $l_0$ .

В іншому різновиді методу для посилення і прийому імпульсів використовуються окремі перетворювачі. Імпульс, що пройшов через зразок, виявляється і за допомогою ланцюга зворотного зв’язку запускає генератор, що виробляє новий високочастотний імпульс. Частота повторення серія імпульсів, що отримується таким чином, може бути точно виміряна і використана для визначення часу  $T$  і швидкості розповсюдження хвиль. Інша модифікація цього методу, що також придатна для вимірювань малих змін швидкості

розповсюдження пружних хвиль, тобто особливо зручна при дослідженні залежності  $v = f(T)$  і  $v = f(P)$ , де  $T$  і  $P$  – температура і тиск відповідно. Ідея цього методу полягає в підборі періоду повторення імпульсів посилення так, щоб він був кратним часу проходження УЗ через зразок. Метод достатньо простий і зручний в експериментальному відношенні, а використання великих за розмірами зразків, необхідних в цьому методі, забезпечує високу точність вимірювань  $\Delta V/V \approx 0,02\%$ . Сучасні серійні радіоелектронні прилади за допомогою міток часу дозволяють проводити безпосередні вимірювання часових інтервалів, забезпечуючи точність вимірювань швидкостей звуку  $\Delta V/V \approx 0,01\%$ .

Обчислення швидкості розповсюдження ультразвукових коливань в зразку виконується за допомогою формули  $V_{зр} = V_{ет} \cdot l_0/(P_1 - P_2)$ , де  $V_{ет}$  – відома швидкість розповсюдження ультразвукових коливань в еталонній рідині, яка визначається в залежності від температури  $V_{ет}(300\text{ K}) = 1598$  м/сек для 22% розчину етилового спирту в воді,  $l_0$  – довжина зразка,  $P_1$  – перший відлік по шкалі мікрометричного гвинта без зразка,  $P_2$  – другий відлік по шкалі мікрометричного гвинта із зразком. Коефіцієнт Пуассона  $\mu$  рівний [1-10]:

$$\mu = \frac{\frac{1}{2}V_{||}^2 - V_{\perp}^2}{V_{||}^2 - V_{\perp}^2}. \quad (1)$$

Температура Дебая  $\theta_D$  визначалась за формулою[5]:

$$\theta_D = \frac{h}{k_B} \cdot \left( \frac{9N_A \rho}{4\pi A} \right)^{1/3} \cdot \left( \frac{1}{V_{||}^3} + \frac{2}{V_{\perp}^3} \right)^{1/3}, \quad (2)$$

де  $k_B = 1,38066 \cdot 10^{-23}$  дж/К стала Больцмана,  $h = 6,62617 \cdot 10^{-34}$  дж·сек стала Планка,  $N_A = 6,02209 \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup> число Авогадро,  $A$  – середня молярна маса,  $\rho$  – густина,  $V_{||}$  – повздовжня УЗ швидкість,  $V_{\perp}$  – поперечна УЗ швидкість,  $\mu$  – коефіцієнт Пуассона.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Грінченко В.Т., Вовк І.В., Маціпура В.Т. Основи акустики. – Київ: Наукова думка, 2007. – 640 с.
2. Грінченко В.Т., Маціпура В.Т., Снарский А.А. Введение в нелинейную динамику. – Київ: Наукова думка, 2005. – 263 с.
3. Вовк І.В., Грінченко В.Т. Звук, рожденный потоком. – Киев: Наукова думка, 2010. – 221 с.
4. Никаноров С.П., Кардашев Б.К. Упругость и дислокационная неупругость кристаллов. – М.: Наука, 1985.
5. Новик А., Берри Б. Релаксационные явления в кристаллах. – М.: Атомиздат, 1975.
6. Кулиш Н.П., Мельникова Н.А., Онанко А.П. и др. // Металлофизика и новейшие технологии. - 1999. - **21**, №4. - С. 72.
7. Онанко А.П. // Металлофизика и новейшие технологии. - 2011. - **33**, №2. - С. 253.
8. Шпак А.П., Куницкий Ю.А., Карбовский В.Л. Кластерные и наноструктурные материалы. – Киев: Академперіодика, 2001.
9. Молодкин В.Б., Низкова А.И., Шпак А.П. и др. Дифрактометрия наноразмерных дефектов и гетерослоев кристаллов. – Киев: Академперіодика, 2005.
10. Юркова А.И., Белоцкий А.В., Бякова А.В. // Наносистемы, наноматериалы, нанотехнології. – 2006. – **4**, №2. - С. 483.

Табл. 1. Швидкості повздожніх  $V_{\parallel}$  і швидкості поперечних  $V_{\perp}$  хвиль в матеріалах.

Матеріал	Густина, $\rho \times 10^3$ , кг/м <sup>3</sup>	Швидкість повздожньої хвилі $V_{\parallel}$ , м/сек	Модуль пружності E, ГПа	Швидкість поперечної хвилі $V_{\perp}$ , м/сек	Модуль зсуву G, ГПа
Al	2,70	6260	105,81	3080	25,613
Fe	7,80	5850	266,94	3230	81,377
Cu	8,93	4730	199,79	2298	47,158
Pb	11,4	2160	53,188	700	5,5860
латунь	8,10	4430	158,96	2120	36,405
трансформаторне масло	0,895	1425	1,8174	0	0

 Табл. 2. Коефіцієнт Пуассона  $\mu$  матеріалів.

Матеріал	$V_{\parallel}$ , м/сек	$V_{\perp}$ , м/сек	$\mu$
Ti(BT1-0)	6210	3201	0,3191
Д16	6471	3064	0,3555
Al	6260	3080	0,3403
Fe45	5899	3275	0,2772
Fe	6070	3230	0,3025
Cu	4730	2298	0,3455
Pb	2160	700	0,4413
teflon-4	1365	617	0,3716
teflon-3M	1815	893	0,3403

 Табл. 3. Температура Дебая  $\theta_D$  матеріалів.

Матеріал	$V_{\parallel}$ , м/сек	$V_{\perp}$ , м/сек	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$A$ , г/моль, $10^{-3}$ , кг/моль	$\theta_D$ , К	$\theta_D$ , К [1-10]
Ti(BT1-0)	6210	3201	4420	0,0479	407	
Д16	6471	3064	2700	0,02698154	402	398
Al	6260	3080	2700	0,02698154	403	398
Fe45	5899	3275	7800	0,055847	476	400
Fe	6000	3198	7800	0,055847	466	400
Cu	4774	2290	8930	0,063546	337	310
Pb	2160	700	11400	0,2072	76	88
teflon-4	1365	617	2190	0,012011	99	
teflon-3M	1815	893	2190	0,012011	143	

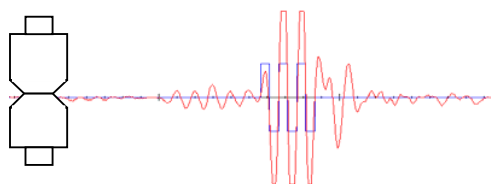


Рис. 5. Джерело збурень та приймач – п’єзокварци (датчик УЗВШ), прозвучування звукопроводів.  
 $U_c/U_{ш} = 15:1$

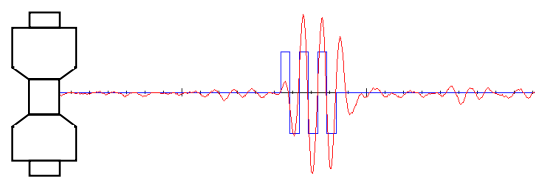


Рис. 6. Джерело збурень та приймач – п’єзокварци (датчик УЗВШ), прозвучування дюралі Д16.  
 $U_c/U_{ш} = 12:1$

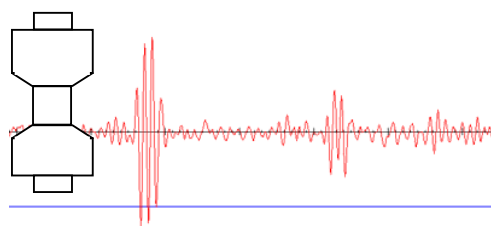


Рис. 7. Джерело збурень та приймач – п’єзокварци (датчик УЗВШ), прозвучування гірської породи.  
 $U_c/U_{ш} = 5:1$

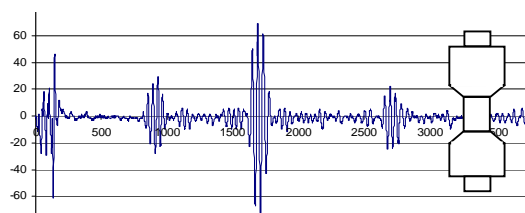


Рис. 8. Джерело збурень та приймач – п’єзокварци (датчик УЗВШ), прозвучування п’єзокераміки.  
 $U_c/U_{ш} = 3:1$

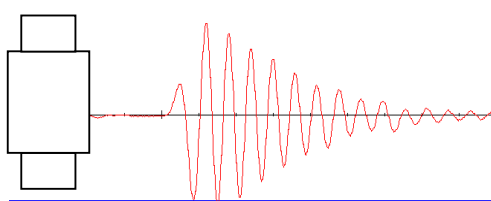


Рис. 9. Джерело збурень та приймач – п’єзокварци (без звукопроводів), прозвучування дюралі Д16.  
 $U_c/U_{ш} = 100:1$

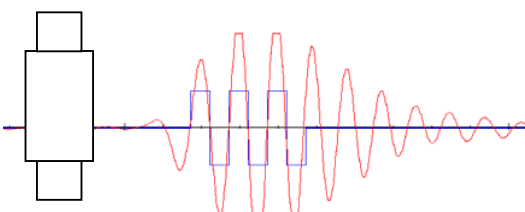


Рис. 10. Джерело збурень та приймач – п’єзокварци (без звукопроводів), прозвучування гірської породи.  
 $U_c/U_{ш} = 20:1$

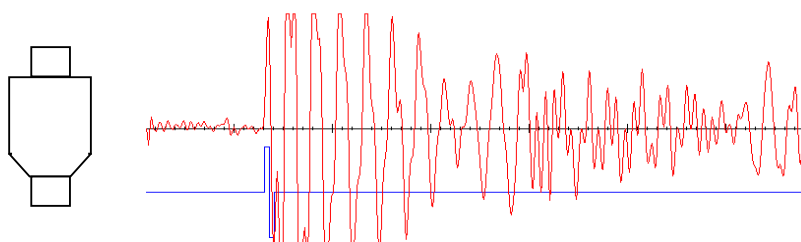


Рис. 11. Джерело збурень – п’єзокварц (датчик УЗВШ), приймач – п’єзокераміка.  
 $U_c/U_{ш} = 150:1$

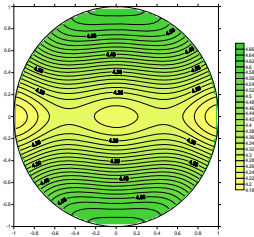


Рис. 12.  
Стереоекція  
азимутальної  
залежності фазової  
швидкості  $V_{\parallel}$   
пісковика

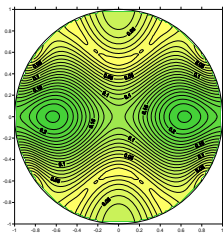


Рис. 13.  
Стереоекція  
різниці  
квазіпоперечних  
швидкостей  $\Delta V_{\perp}$   
пісковика

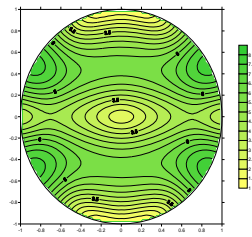


Рис. 14.  
Стереоекція  
диференціального  
коефіцієнта  
пружної анізотропії  
 $A_d$  пісковика

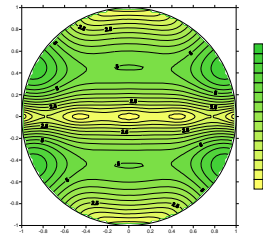


Рис. 15.  
Стереоекція  
кута відхилення  
вектору пружних  
зміщень від  
напрямку хвильової  
нормалі  $(\vec{U}, \vec{n})$   
пісковика

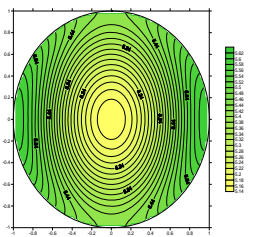


Рис. 16.  
Стереоекція  
азимутальної  
залежності фазової  
швидкості  $V_{\parallel}$   
вапняку

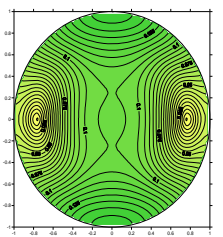


Рис. 17.  
Стереоекція  
різниці  
квазіпоперечних  
швидкостей  $\Delta V_{\perp}$   
вапняку

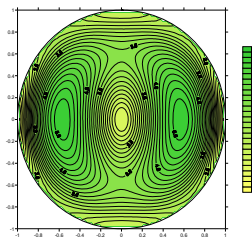


Рис. 18.  
Стереоекція  
диференціального  
коефіцієнта  
пружної анізотропії  
 $A_d$  вапняку

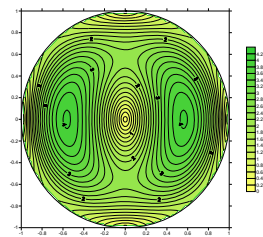


Рис. 19.  
Стереоекція  
кута відхилення  
вектору пружних  
зміщень від  
напрямку хвильової  
нормалі  $(\vec{U}, \vec{n})$   
вапняку