

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра общей физики

**ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ЗВУКА
В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ МЕТОДОМ СОУДАРЕНИЯ
СТЕРЖНЕЙ**

Учебно-методическое пособие

ФФ НГУ

Курс I

Новосибирск

2007

Учебно-методическое пособие содержит анализ акустических процессов при соударении стержней, теорию с использованием законов сохранения массы, импульса и энергии и рекомендации по выполнению необходимых экспериментальных измерений. Разработано в рамках измерительного практикума для студентов 1-го курса физического факультета НГУ.

Предназначено для самостоятельного выполнения лабораторной работы по измерению скорости звука в металлах методом соударения стержней, расчета возникающих при соударении давлений и систематических погрешностей измерений. Для определения давления в плоскости контакта при ударе использован метод PV -диаграмм (P – давление, V – массовая скорость).

Составители

канд. хим. наук А. В. Кихтенко,
д-р физ.-мат. наук, доц. А. В. Пинаев,
канд. техн. наук, доц. О. А. Брагин

Рецензент

канд. физ.-мат. наук, доц. А.В. Багинский

Печатается по решению кафедры общей физики НГУ.

1. Введение

1.1. Звук как упругие волны

В физике звуком (звуковыми волнами, упругими волнами, механическими волнами, акустическими волнами) называется распространение в упругой среде (газообразной, жидкой или твердой) слабых возмущений или механических колебаний с малыми амплитудами. Понятие «скорость звука» охватывает ещё бóльший круг явлений. Любое локальное механическое возмущение среды, передаваемое от точки к точке за счёт упругих сил, распространяется со скоростью звука в среде.

В данной работе скорость звука в металлических стержнях измеряется как скорость распространения упругого ударного возмущения вдоль стержней.

Основные цели работы: определение скорости звука в различных металлах методом соударения стержней и анализ систематических погрешностей измерений.

1.2. Распространение продольных волн в стержне

Стержнем в акустике называется тело, длина которого много больше, а поперечный размер меньше (или порядка) длины волны упругих колебаний.

Если поперечный размер много меньше длины волны звука, то такое тело в акустике называется струной (при условии, что она сильно натянута и обладает равномерно распределённой по длине плотностью). В струне легко возбуждаются и могут устойчиво существовать лишь поперечные волны, тогда как в стержне могут возбуждаться поперечные и продольные волны. Волна называется продольной (или поперечной), если колебания частиц среды происходят в направлении (или перпендикулярно) к направлению распространения волны. Поперечные волны могут возникать лишь в твердых телах. В стержне, кроме того, могут быть возбуждены изгибные и упругие крутильные колебания, с которыми мы в данной работе не встречаемся, и рассматривать их не будем.

Для определения скорости звука (упругих продольных волн) в стержне рассмотрим следующий пример. Пусть упругий стержень

налетает со скоростью V на абсолютно жесткую стенку в момент времени $t = 0$ (рис. 1, *a*). В момент удара правый торец стержня останавливается, а по стержню начинает распространяться волна упругого сжатия со скоростью C . Через некоторое время Δt волна сжатия пройдет расстояние $\Delta x = C \Delta t$ (см. рис. 1, *б*). Это значит, что в заштрихованном участке стержня все точки уже остановились ($V = 0$), тогда как все сечения стержня слева продолжают двигаться с прежней скоростью V по направлению к стенке. Образно говоря, они ещё не знают, что стержень налетел на стенку, ибо информация об этом распространяется со скоростью C . Через время $t = L / C$ волна упругого сжатия дойдёт до левого конца стержня, и весь стержень окажется в сжатом состоянии. Скорость всех его сечений будет равна нулю (см. рис. 1, *в*).

После этого левый конец стержня начнёт двигаться с той же по величине и обратной по направлению скоростью $-V$. А по стержню в обратном направлении пойдёт волна разрежения со скоростью $-C$ (см. рис. 1, *г*).

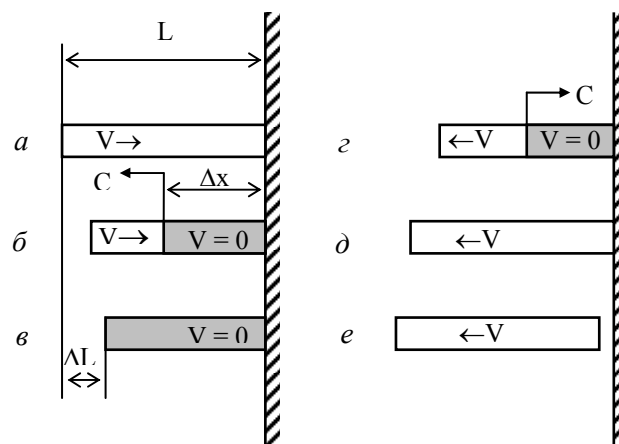


Рис. 1. Удар стержня об абсолютно жесткую стенку

Обратим внимание на то, что здесь термин «разрежение» означает «снятие напряжения сжатия», а не «растяжение» стержня. После прохождения волны разрежения стержень возвращается в своё прежнее ненапряжённое состояние, каким оно было до соударения.

Когда волна разрежения дойдёт до стенки (см. рис. 1, *з*), все сечения стержня приобретут скорость V и в следующее мгновение стержень отскочит от стенки (см. рис. 1, *д*, *е*). Очевидно, что время соударения (время контакта стержня со стенкой) будет равно

$$\tau = 2L / C. \quad (1)$$

Найдем скорость распространения продольной волны из закона сохранения энергии с использованием физических параметров материала стержня. Кинетическая энергия стержня до соударения равна

$$W_k = \frac{m V^2}{2} = \frac{1}{2} \rho S L V^2, \quad (2)$$

где ρ , S , L – плотность, площадь поперечного сечения и длина стержня, соответственно.

Когда стержень полностью сжат (см. рис. 1, *в*), скорость всех его сечений равна нулю и кинетическая энергия переходит в потенциальную энергию упругого сжатия. Величина энергии упругого сжатия определяется уравнением

$$W_n = k \frac{\Delta L^2}{2}, \quad (3)$$

где ΔL – укорочение (величина продольной деформации) сжатого стержня, k – коэффициент упругости, определяемый для твёрдого тела из закона Гука:

$$k = E \frac{S}{L}, \quad (4)$$

здесь E – модуль Юнга.

Для заданного материала, геометрии и скорости V стержня в уравнениях (2–4) неизвестна лишь величина сжатия стержня ΔL . Её можно определить следующим образом. После начала соударения (см. рис. 1, *а*) волна сжатия, распространяющаяся со скоростью звука C , дошла до конца стержня (см. рис. 1, *в*) за время $\Delta t = L / C$. В течение этого времени левый конец стержня продолжал двигаться со скоростью V . Следовательно, расстояние ΔL , которое он прошёл за это время, будет равно

$$\Delta L = \Delta t \cdot V = L \cdot V / C. \quad (5)$$

Подставляя в закон сохранения энергии $W_k = W_n$ величины,

определяемые формулами (2–5), получим искомую зависимость:

$$C = \sqrt{E / \rho} . \quad (6)$$

В формуле (6) скорость звука определяется через физические параметры исследуемого материала.

Соударение стержней

Соударение одинаковых (по размерам и материалу) стержней. Рассмотренный выше процесс соударения стержня со стенкой легко переносится на случай соударения двух стержней. Пусть два стержня движутся со скоростью V навстречу друг другу. В момент начала соударения по обоим стержням начинает распространяться волна сжатия с одинаковой скоростью C и через время Δt придёт в сечение соединения стержней. После этого стержни разлетятся, поскольку их скорости будут направлены друг от друга (стержни «обменялись» скоростями). И время соударения их τ будет равно

$$\tau = 2\Delta t = 2L / C. \quad (7)$$

Легко понять, что результат не изменится, если один стержень покоится, а другой движется со скоростью V . В этом случае мы можем рассматривать процесс в системе, связанной с их центром масс. В системе центра масс стержни будут двигаться навстречу друг другу со скоростью $V / 2$. Поскольку величина скорости не входит в формулу (7), то результат будет тем же. Аналогичное рассмотрение (в системе центра масс) показывает, что тот же результат получится и при неодинаковых скоростях V_1 и V_2 движения стержней (например, когда один стержень «догоняет» другой), лишь бы скорости обеспечивали возможность упругого соударения.

Полезно заметить, что скорости соударения, тем не менее, ограничены: они не могут быть произвольно большими, если мы желаем, чтобы соударение было упругим. Например, предел упругости стали ограничивает скорость соударения величиной менее 10 м / с.

Для того чтобы показать это, определим величину давления P в акустической волне сжатия, возникающей при ударе стержней. Переходя в систему фронта волны, запишем уравнения сохранения

массы и импульса слева и справа на звуковом скачке:

$$\rho_0 C = \rho u_f \quad (8)$$

$$P_0 + \rho_0 C^2 = P + \rho u_f^2, \quad (9)$$

где ρ_0 и ρ – соответственно плотность среды перед и за фронтом, $u_f = C - V$ – массовая скорость среды за фронтом. Считая, что давление перед фронтом $P_0 \ll P$ из уравнений (8) и (9) получаем

$$P = P_0 + \rho_0 C(C - u_f) \approx \rho_0 C(C - u_f) = \rho_0 C V. \quad (10)$$

Везде в дальнейшем под P будем понимать величину $\Delta P = P - P_0 = \rho_0 C V$. Оценим давление, возникающее при соударении движущегося со скоростью V стального стержня с покоящимся стержнем. Примем физические параметры стали $C \approx 5,5 \cdot 10^3$ м / с, $\rho_0 \approx 8 \cdot 10^3$ кг / м³. Тогда получим, что $P = 44$ МПа при $V = 1$ м / с; и $P = 440$ МПа при $V = 10$ м / с. Поскольку значение $P = 440$ МПа заметно превышает предел упругости стали, то при скоростях удара $V \geq 10$ м / с деформации становятся уже пластическими.

Соударение стержней из одинакового материала и одинакового сечения, но различной длины (рис. 2). Начальная фаза соударения (см. рис. 2 а, б) остаётся прежней: упругая волна сжатия распространилась по обоим стержням на расстояние L_1 , равное длине меньшего стержня. После этого по левому (короткому) стержню начинает распространяться волна разрежения, а по правому по-прежнему распространяется волна сжатия. Пусть для определённости длина правого стержня L_2 равна удвоенной длине левого. Тогда в момент, когда волна разрежения дойдёт по левому стержню до места их соединения, правый стержень окажется полностью сжатым (см. рис. 2, в). Все сечения короткого стержня будут при этом иметь скорость V , а все сечения длинного – $V = 0$ (в системе центра масс).

Произойдёт ли в этот момент отрыв короткого стержня, т. е. окончание времени соударения стержней? Очевидно, что нет. Хотя короткий стержень «уходит» от длинного со скоростью V , но длинный стержень начинает в этот момент «разжиматься» и оба его конца начинают двигаться с той же абсолютной скоростью V . Таким образом, скорость движения левого конца длинного стержня равна

по величине и направлена в ту же сторону, что и скорость «ухода» короткого стержня. А это означает, что оба стержня остаются «в контакте», хотя напряжения сжатия (силы сжатия) между ними уже нет.

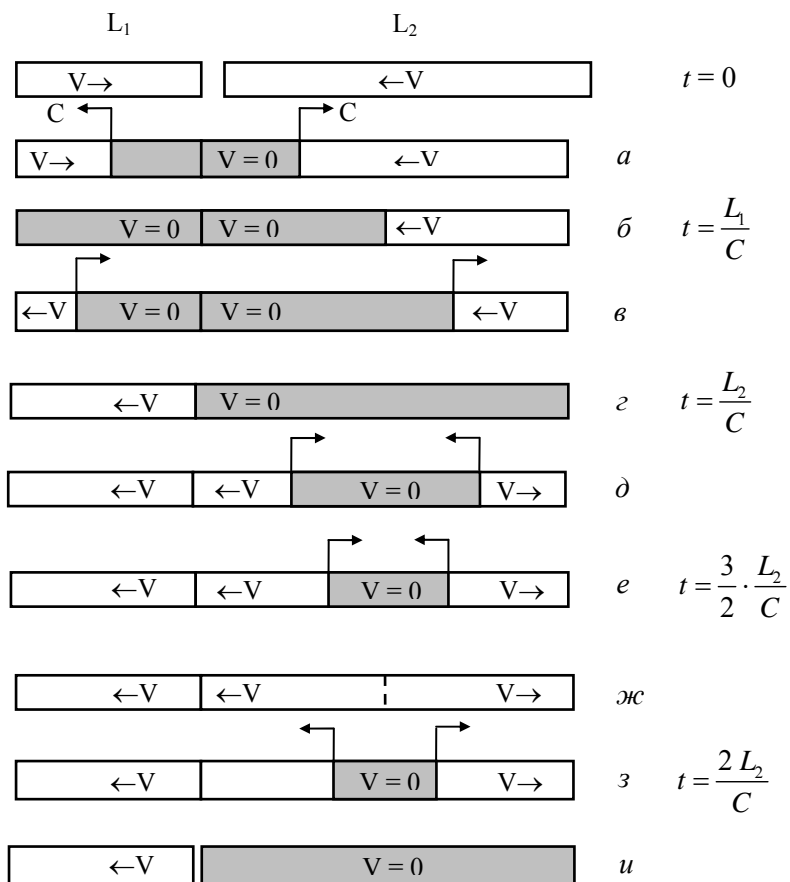


Рис. 2. Соударение стержней разной длины.

Дальнейший процесс понятен из рисунка. По длинному стержню с обоих концов по направлению к центру распространяются волны разрежения, а оба его конца приобретают равные по величине и

противоположные по направлению скорости V (см. рис. 2, *д*). После того как волны разрежения встретятся в середине длинного стержня (см. рис. 2, *е*), начинается его растяжение, так как обе половинки длинного стержня имеют противоположно направленные скорости V (см. рис. 2, *ж*). Волна разрежения «гасит» скорость движения сечений стержня (скорость $V = 0$ в заштрихованной части длинного стержня – см. рис. 2, *ж*, *з*). И когда волна растяжения дойдёт до левого конца длинного стержня, его скорость также обратится в нуль (см. рис. 2, *з*). Именно в этот момент короткий стержень действительно начнёт уходить от длинного стержня, т. е. время соударения (контакта) стержней закончится. Легко посчитать, что с момента начала соударения (см. рис. 2, *а*) и до момента отрыва стержней (см. рис. 2, *з*) волна сжатия – разрежения дважды прошла по длинному стержню со скоростью C . Отсюда получаем, что время соударения стержней различной длины равно

$$\tau = 2 L_2 / C, \quad (11)$$

где L_2 – длина более длинного стержня.

Полученный результат справедлив и в том случае, когда отношение длин стержней не является целым числом: время соударения будет определяться временем прохождения упругой волной удвоенной длины наибольшего стержня. Действительно, после состояния, изображенного на рис. 2, *г*, волна уже не может перейти в более короткий стержень, а стержни разойдутся только тогда, когда волна растяжения по длинному стержню вернётся к месту их соединения.

Проиллюстрированное выше распространение звуковых волн по стержням наиболее наглядно описывается методом PV -диаграмм (прил. 1).

2. Описание установки

Оборудование: установка для измерения скорости звука методом соударения стержней, цифровой осциллограф Tektronix TDS1012, набор стержней различной длины из различных металлов, низковольтный источник постоянного тока (элемент 1,5 В), пьезодатчик.

Схема установки по измерению скорости звука методом соударения стержней представлена на рис. 3.

Стержни L_1 и L_2 подвешены на гибких подвесах (нитях), обеспечивающих их горизонтальную подвижность вдоль общей оси, но препятствующей параллельному смещению осей относительно друг друга (для обеспечения центрального удара).

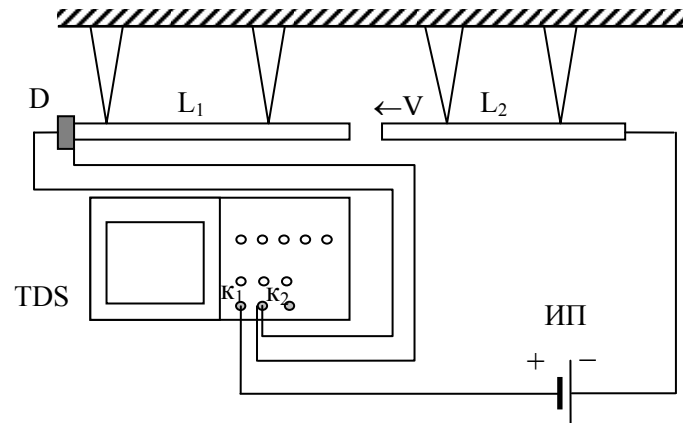


Рис. 3. Схема установки для измерения скорости звука методом соударения стержней: L_1 , L_2 – металлические стержни; D – пьезодатчик; TDS – цифровой осциллограф с двумя входами K_1 и K_2 ; $ИП$ – источник сигнала запуска осциллографа

На левом конце стержня L_1 закреплён пьезодатчик D , сигнал с которого поступает на вход K_2 осциллографа. Пьезодатчик представляет собой цилиндрическую таблетку из сегнетоэлектрической керамики (титаната бария), на торцах которой при её упругой деформации возникает разность потенциалов с амплитудой, примерно пропорциональной величине деформации. Диаметр «таблетки» равен диаметру стержня, а её длина – $L_D = 1$ см. Деформация (и сигнал) возникает в тот момент, когда распространяющаяся от удара звуковая волна достигнет левого торца стержня L_1 . Поскольку импеданс ρC сегнетоэлектрика близок к импедансу металлов, то отражение упругой волны на границе раздела металл – пьезодатчик мало, и волна сжатия распространяется до левого торца пьезодатчика. После чего по системе датчик – стержень в обратном направлении распространяется волна разрежения.

Правый конец стержня L_2 через последовательно включённую батарею ИП подключен ко входу канала K_1 осциллографа. Но сигнал на этот вход поступает лишь в течение того времени T , когда стержни L_1 и L_2 соединены между собой. Напомним, что стержни металлические и лишь при их контакте второй полюс источника «—» через них и общую шину поступает на заземленный вход осциллографа (общий для каналов K_1 , K_2 и для ИП и D).

Осциллограф должен быть установлен в режим запуска развёртки сигналом, поступающим на вход канала K_1 . В данном режиме условием появления сигнала на экране осциллографа является появление на заданном входе осциллографа сигнала по характеру (возрастающий, спадающий, импульс и т. п.) и амплитуде (или длительности) соответствующим условию запуска, заданному экспериментатором.

Поскольку в вашем распоряжении находится цифровой осциллограф, это позволяет наблюдать на экране изменения сигналов обоих каналов, происходящие до поступления на вход K_1 сигнала к запуску. **Объясните, каким образом это происходит? Какой вид и амплитуду должен иметь сигнал, приходящий на первый канал осциллографа в эксперименте со стержнями?**

На рис. 4 представлен примерный вид осциллограммы, получающейся в экспериментах по соударению стержней.

Таким образом, данная установка позволяет измерять скорость распространения звука в стержнях двумя способами:

– через время Δt соударения стержней по формуле

$$C = \frac{2L_2}{\Delta t}; \quad (12)$$

– через время δt распространения звука по стержню L_1 в соответствии с формулой:

$$C = \frac{L_1}{\delta t}. \quad (13)$$

В работе предполагается провести все необходимые измерения и сравнить между собой значения скорости звука, вычисленные по формулам (12) и (13).

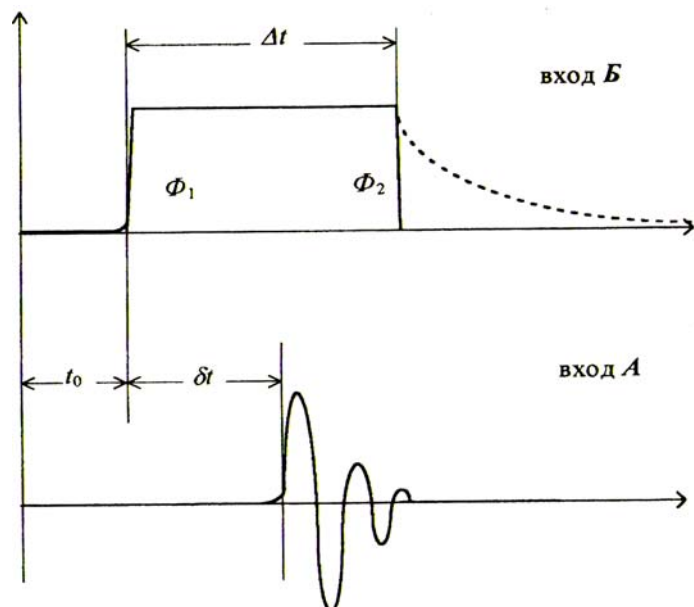


Рис. 4. Характерный вид осциллограмм при соударении стержней.

3. Задание

1. Собрать схему установки (см. рис. 3) и произвести настройку экспериментальной установки:

- обеспечить соосность расположения стержней и возможность их центрального соударения;
- обеспечить жёсткий механический контакт поверхности датчика со стержнем;
- подобрать режимы работы осциллографа: необходимую чувствительность по входам K_1 и K_2 , длительность развёртки, время опережения (прил. 2); для уменьшения амплитуды напряжения с пьезодатчика и увеличения постоянной времени датчика RC рекомендуется параллельно датчику подключить конденсатор ёмкостью около 1000 пФ.

2. Измерить скорость распространения звука в стальных стержнях различной длины (различного соотношения L_1 / L_2).

Для этого произвести **не менее 10 измерений** времени соударения и времени распространения звука по стержню L_1 . Построить графическую зависимость δt от длины стержня L_1 . Объяснить полученные результаты. По измеренным данным найти наилучшие значения скорости звука в металле, измеренные каждым из предложенных способов. Оценить погрешности измерений скорости звука.

3. Измерить скорость звука в различных металлических **стержнях (алюминий, латунь, медь)** при $L_1 = L_2$.

Результаты измерений величины C для различных металлов должны быть сведены в таблицу, включающую колонки:

- а) полученный результат (скорость звука в данном металле);
- б) оценки погрешностей измерения;
- в) табличное (справочное) значение соответствующей скорости.

4. Объясните различие результатов измерения скорости звука, полученных разными способами (по времени соударения и времени прохождения звуковой волны по стержню с пьезодатчиком).

Дополнительно. Внимательно рассмотрите наблюдаемые при соударении стержней сигналы (осциллограммы). По этим наблюдениям предложите иной, третий способ измерения скорости звука в металлах с использованием данной установки. Проведите предложенным способом серию измерений скорости звука. Обработайте результаты измерений и сравните их с полученными ранее значениями скорости звука.

Список литературы

1. Методы физических измерений. Лабораторный практикум по физике / Под ред. Р. И. Солоухина. Новосибирск, НГУ, 1975.
2. Кошкин Н. И., Ширкевич М.Г. . Справочник по элементарной физике. М.: Наука, 1980.
3. Смажевская Е. Г., Фельдман Н. Б. . Пьезоэлектрическая керамика. М.: Сов. радио, 1971.
4. Овсянников Л. В. Лекции по основам газовой динамики. М.: Наука, 1981.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Описание распространения звуковых волн по стержням методом PV -диаграмм.

Распространение звуковых волн по стержням можно описать с применением PV -диаграмм. По диаграммам можно дополнительно рассчитать давление и массовую скорость. Продемонстрируем применение этого метода в трех наиболее характерных случаях.

А) Удар стержня об абсолютно жесткую стенку (см. рис. 1, *a*), *физически это проще осуществить путем соударения двух стержней из одинаковых материалов, движущихся навстречу друг другу со скоростями V* (см. рис. 2, *a*);

В этом случае массовая скорость движущегося стержня соответствует скорости его движения V_1 . При соударении двух движущихся одинаковых стержней по ним в обе стороны распространяются волны сжатия I – вправо и I^* – влево (рис. 5, *a*). Прямые I и I^* расположены симметрично относительно точки (P_1, V_1) , где $P_1 = \rho_{01} C_1 V_1$. На границе контакта стержней массовая скорость $V = 0$, а давление удваивается: $P = 2P_1$.

Б) Выход звуковой волны на свободную поверхность (см. рис. 1, *б*).

При выходе звуковой волны сжатия на свободную поверхность $P = 0$ и происходит удвоение массовой скорости: $V = 2V_1$ (см. рис. 5, *a*).

В) Соударение стержней из двух разных материалов.

Пусть стержень I (ударник) движется со скоростью V_1 , а стержень II (мишень) покоится. Пусть у мишени акустическое сопротивление ρC больше, чем у ударника. При соударении стержней по мишени пойдет волна сжатия 2, а по ударнику – влево волна сжатия I^* , причем прямые I и I^* описывают ударник и расположены симметрично относительно точки (P_1, V_1) , где $P_1 = \rho_{01} C_1 V_1$

(см. рис. 5, *б*). Прямая I^* описывается уравнением $P^* = 2P_1 - \frac{P_1}{V_1} V$.

В плоскости контакта в момент соударения (точка *b*) параметры

(P_x, V_x) находятся из условия $P^* = P_2 = \rho_{20} C_2 V$. Откуда легко получить, что

$$P_x = \frac{2\rho_{10}\rho_{20}C_1C_2}{\rho_{10}C_1 + \rho_{20}C_2}, \quad V_x = \frac{2\rho_{10}C_1V_1}{\rho_{10}C_1 + \rho_{20}C_2}. \quad (14)$$

Легко видно, что случай (Б) – более общий, и из уравнений (14) следуют как частные случаи (А) и (Б). Поясните это самостоятельно.

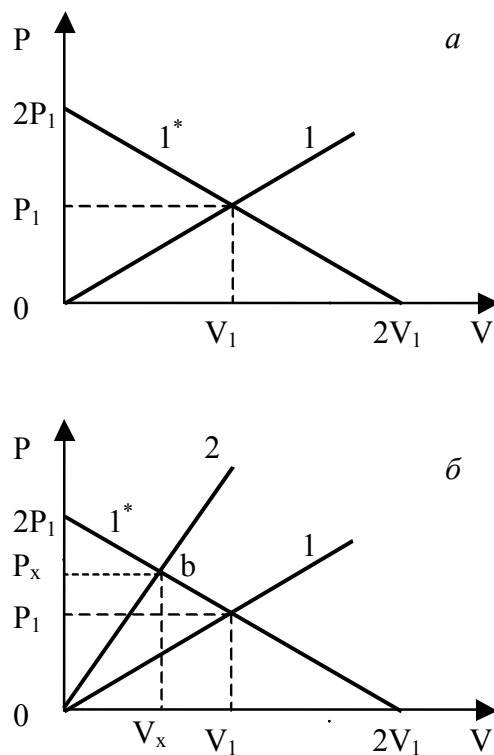


Рис. 5. К методу PV -диаграмм

**Настройка осциллографа TDS 1012 для проведения
измерений скорости звука в металлах**

1. Включите осциллограф кнопкой на верхней панели. Дождитесь завершения самопроверок и появления на экране поля осциллограмм. Обратите внимание, что в правой части экрана выводится текущее меню с названием сверху и вертикально расположенными пунктами, напротив которых на панели управления расположены кнопки изменения параметров этих пунктов меню. При нажатии несколько раз на эти кнопки, устанавливаются соответствующие параметры работы осциллографа.

2. Включите режим «*одинокый запуск*» (*single seq*) кнопкой на лицевой панели прибора.

3. Установите значения параметров вертикальной развертки для обоих каналов и параметров горизонтальной развертки. Для этого в средней части панели управления нажмите кнопку «*меню K1*» (/ *CH1 menu*). В появившемся в правой части экрана меню с общим заголовком CH1 и вертикально расположенными пунктами установите следующие значения параметров:

Coupling

DC

BWLimit

Off

100MHz

Volts/Div

Coarse

Probe

1X

Invert

Off

Проделайте то же самое для второго канала, нажав кнопку «*меню K2*» (*CH2 menu*).

Ручками «ВОЛЬТ / ДЕЛ» (VOLTS / DIV) первого и второго канала установите чувствительность каналов 500 mV, а ручкой «СЕК / ДЕЛ» (SEC / DIV) развертку 100 μ s. Установленные этими ручками значения высвечиваются в нижней части экрана:

CH1 500 mV CH2 500 mV M 100 μ s CH1 $\sqrt{0.00}$ V.

Последние параметры в надписи сообщают о режиме работы генератора развёртки.

4. Установите запуск развёртки по первому каналу K1. Для этого нажмите на кнопку «**меню синх.**» (**TRIG menu**) и установите следующие параметры:

Type
Edge
Source
CH1
Slope
Rising
Mode
Normal
Coupling
DC

Установите ручкой «**уровень**» (**LEVEL**) уровень запуска порядка 100 mV. Значение уровня запуска отображается графически справа в окне осциллограмм стрелкой «**◀**», а его численное значение показано в правом нижнем углу экрана.

5. Убедитесь, что осциллограф находится в состоянии «готовность». На это указывает символ [R] (Ready) вверху в центре экрана. Нажмите кнопку «**одиночный запуск**» (**single seq**) и произведите соударение стержней. Получив сигналы, при необходимости откорректируйте чувствительности каналов и параметры временной развёртки ручками «ВОЛЬТ / ДЕЛ» (VOLTS / DIV) и «СЕК / ДЕЛ» (SEC / DIV), а также регуляторами «**положение**» (**POSITION**) выберите удобное расположение наблюдаемых сигналов на экране. При отсутствии сигнала проверьте и откорректируйте условия запуска.

6. Проведите измерения продолжительности δt и Δt . Для этого кнопкой «**курсор**» (**CURSOR**) в верхней части панели прибора выведете меню для работы с курсорами. Для измерения временных интервалов выберите значение параметра «Type» **Time** (время). Регуляторами «курсор 1» и «курсор 2» подведите курсоры в соответствующие точки осциллограммы. В окне DELTA в правой части экрана автоматически отобразится измеренная величина времени.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Введение	3
2. Описание установки	9
3. Задание	12
4. Список литературы	13
Приложение 1	14
Приложение 2	16

ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ЗВУКА В ТВЕРДЫХ СРЕДАХ МЕТОДОМ СОУДАРЕНИЯ СТЕРЖНЕЙ

Учебно-методическое пособие

ФФ НГУ

Курс I

Составители:

Кихтенко Андрей Владимирович,
Пинаев Александр Владимирович,
Брагин Олег Анатольевич

Редактор С. Д. Андреева