

Скорость распространения упругой волны в стальных проволочных канатах

Г. Н. Савин и В. Г. Бессонов

Величина скорости распространения упругой волны играет существенную роль в теории динамического расчета шахтного каната [1].

В литературе, насколько нам известно, есть одна экспериментальная работа по определению скорости упругой волны — это работа Д. Ф. Перри и Д. М. Смита [2].

По данным Перри и Смита, величина скорости упругой волны вдоль каната равна 3800 м/сек. В 1948 г. А. М. Пеньковым, А. С. Бондарчуком и М. С. Кролевец [3] был определен динамический модуль упругости каната E_k через собственную частоту его продольных колебаний.

Подставляя полученную ими частоту собственных продольных колебаний каната в известную формулу

$$c = 2lf_1,$$

где c — скорость распространения упругой волны,

l — длина каната,

f_1 — собственная частота продольных колебаний каната,

можно получить для каната (6×19+1 о. с. с диаметром проволок $d=1,2$ мм) скорость распространения упругой волны, равную $c=4194$ м/сек.

Следует отметить, что в указанных выше опытах [2], [3] величина распространения скорости упругой волны в канатах не была замерена непосредственно, а подсчитана по формулам (для сплошного стержня) через собственную частоту каната.

На канатном стенде во львовском отделе математической теории упругости Института математики АН УССР были проведены опыты непосредственного измерения скорости распространения упругой волны в стальных проволочных канатах.

Общая длина стенда равна 16 м, канат расположен вертикально, верхним своим концом жестко скреплен с двумя балками „Пейне“ двутаврового сечения, которые, в свою очередь, уложены на капитальные стены здания. Расстояние между опорами балок равно 5 м. Нижним своим концом канат пропущен в вертикальную проушину клетки, расклинен клиньями из бука и снизу жестко закреплен канатными жимками (рис. 1 и 2).

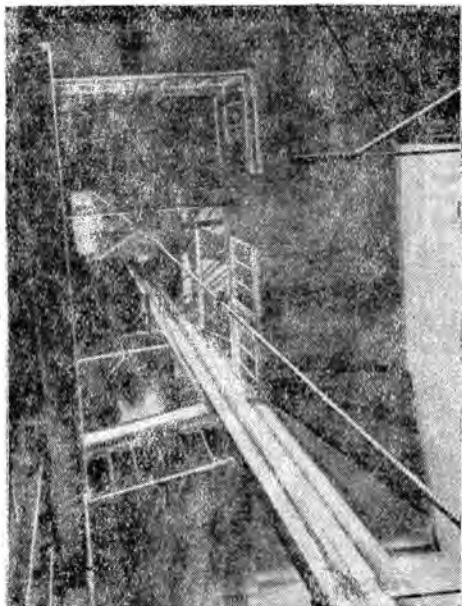


Рис. 1.

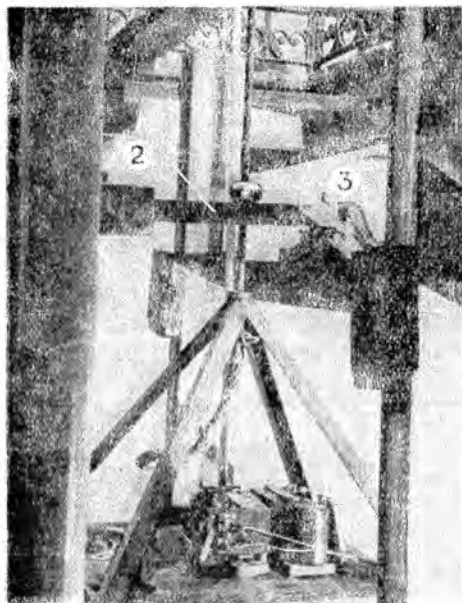


Рис. 2. 2 — рычаг, 3 — жимок на канате.

Немного выше нижнего крепления каната к клетке на канате укреплен еще один жимок. На этот жимок через шарики опирается рычаг, ко второму концу рычага на тонкой проволоке подвешивается груз. При перекусывании проволоки груз падал и канату сообщалась мгновенно приложенная нагрузка.

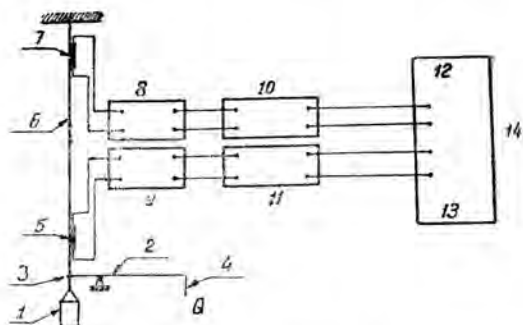


Рис. 3. 1 — клеть, 2 — рычаг, 3 — жимок на канате, 4 — тонкая проволока, 5 — датчик № 1, 6 — канат, 7 — датчик № 2, 8 — мост № 2, 9 — мост № 1, 10 — усилитель № 2, 11 — усилитель № 1, 12 — шлейф № 2, 13 — шлейф № 1, 14 — шлейфовый осциллограф.

На описанном стенде были проведены опыты по определению скорости распространения упругой волны вдоль каната следующими четырьмя различными методами:

1) Методом сдвига фаз кривых колебаний двух датчиков, помещенных в нижнем и верхнем концах каната по принципиальной схеме 1 (рис. 3).

Проволочные датчики из константановой проволоки с базой 20 мм приклеивались целлулоидным клеем в верхнем и в нижних концах каната;

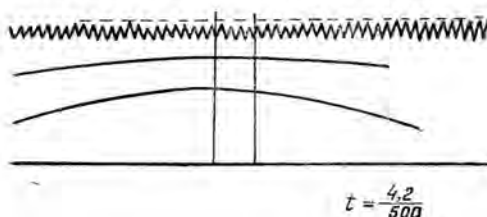


Рис. 4.

расстояние между датчиками равно 14,2 м. Нагруженная клеть при помощи рычага выводилась из равновесия мгновенно приложенной нагрузкой. Колебания напряжений в верхнем и нижнем концах каната регистрировались через усилители шлейфовым осциллографом. Одна из типовых осциллограмм приведена на рис. 4.

Согласно проведенным этим методом экспериментам средняя величина скорости распространения упругой волны в канате

($6 \times 37 + 1$ о. с., $\delta = 0,75$ мм) составила $c = 1620$ м/сек $\pm 5\%$.

2) Определение величины скорости упругой волны в канате методом разрывных контактов производилось согласно схеме (рис. 5).

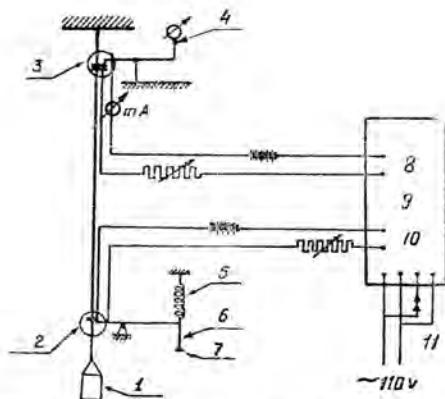


Рис. 5. 1 — клеть, 2 — нижний разрывной контакт, 3 — верхний разрывной контакт, 4 — индикатор, 5 — отбрасывающая пружина, 6 — тонкая проволока, 7 — груз, 8 — шлейф № 2, 9 — шлейф № 1.

Упругая волна начинает идти вдоль каната с момента отрыва рычага 2 (рис. 2) от жимка 3 (рис. 2).

Если пропустить через один из шлейфов осциллографа силу тока от батареи, цепь которой замыкал бы рычаг 2 и жимок 3, то при отрыве последнего от рычага (что соответствует началу движения упругой волны вдоль каната) цепь разорвется и шлейф на осциллограмме прочертит вертикальную отметку, соответствующую началу движения упругой волны вдоль каната.

В верхней части каната укреплялся изолированно от него второй контакт, который через пластинку, укрепленную на капитальной стене, замыкал цепь второй батареи и второго шлейфа (рис. 5).

Упругая волна, вызванная тем же приспособлением как при опытах в первом случае, дойдя до верхнего контакта, размыкала последний, и на осциллограмме второй шлейф прочерчивал вторую вертикальную линию. Измеряя время t между началами разрывов этих двух контактов, мы получим время прохождения упругой волны между этими контактами. Расстояние между ними в наших опытах равнялось 14,5 м.

Средняя величина скорости упругой волны, измеренная этим методом составила величину, равную $c = 1610 \text{ м/сек} \pm 5\%$. Типовая осциллограмма этой серии опытов приведена на рис. 6.

Необходимо отметить, что этот метод выгодно отличается от всех остальных своей простотой, так как не требует ни усилителей, ни датчиков.

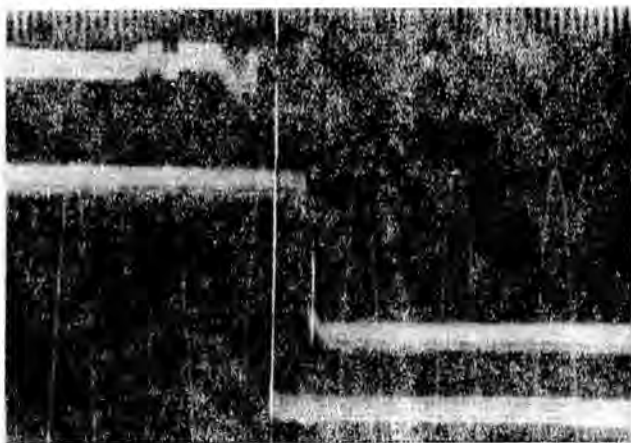


Рис. 6.

3) Третий метод определения скорости распространения упругой волны не требует ни специального стенда, ни проволочных датчиков, ибо измерение производится при помощи катодного осциллографа и обыкновенного пьезоэлектрического микрофона, служащего в данном случае датчиком, превращающим звуковые колебания в электрические. Скорость распространения упругой волны в канате (так же как и в сплошном металле) равна скорости распространения звука. Замеряя время между началом звукового импульса и началом второго, отраженного от верхнего конца каната, звукового импульса, мы получим время прохождения упругой волны на расстоянии двойной длины каната. Для этого на нижнем жимке каната был укреплен пьезоэлектрический микрофон, включенный в катодный осциллограф. Схема этого опыта показана на рис. 7, а общий вид аппаратуры на рис. 8.

Ввиду того что прямой и обратный ход электронного луча горизонтальной развертки имеют неодинаковые скорости, использовать ее (развертку) было нецелесообразно, она выключалась, и развертка в этом случае осуществлялась движущейся фотопленкой, вставленной в кинокамеру, из которой был вынут грейферный механизм. Так как движение

пленки неравномерное, необходимо было иметь отметку времени непосредственно на самой пленке. Последняя осуществлялась двумя неоновыми лампами, включенными в цепь переменного тока. Вспышки неоновой лампы чередовались через 0,01 сек., так как промышленный ток

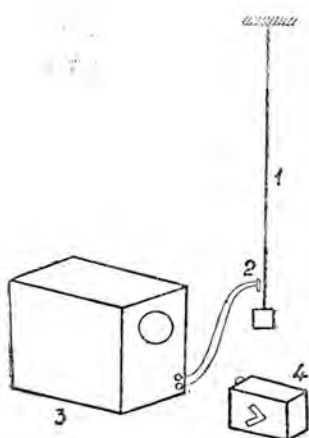


Рис. 7.

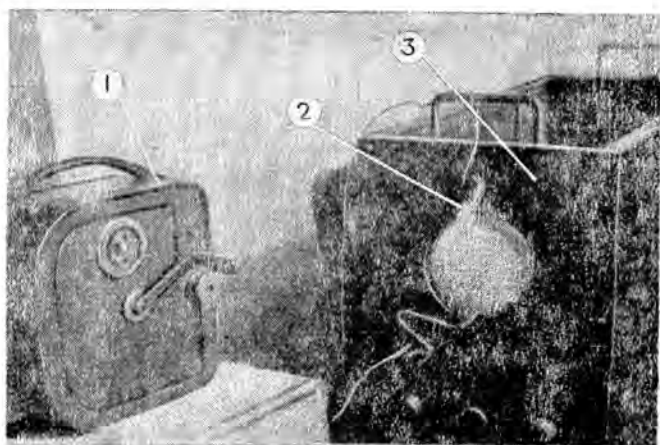


Рис. 8. 1 — катодный осциллограф, 2 — неоновая лампочка, 3 — кинокамера.

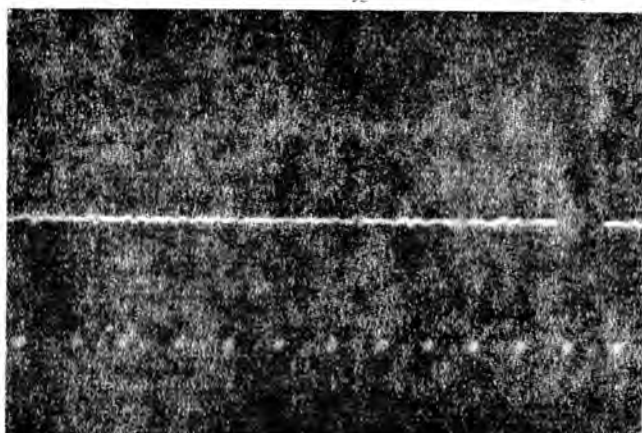


Рис. 9.

имеет частоту 50 гц. Одна из характерных осциллограмм приведена на рис. 9.

Длина каната в этом опыте равнялась 14,7 м. Средний результат, полученный из трех замеров, в этом опыте дал величину распространения волны в канате ($6 \times 37 + 1$ о. с.) равной $c = 1630 \text{ м/сек} \pm 5\%$.

Для проверки вышеприведенных опытов была определена скорость распространения упругой волны в сплошном стержне (проволоке диаметром 4 мм). Скорость упругой волны в проволоке была измерена с помощью катодного осциллографа по отраженной звуковой волне. Схема опыта аналогична схеме на рис. 7. Единственное различие заключалось в том, что в данном случае проволока была натянута не вертикально, а горизонтально, что, безусловно, существенно повлиять на результат опыта не могло. Длина проволоки в этом опыте равна 27,8 м. Одна из полученных осциллограмм приведена на рис. 10.

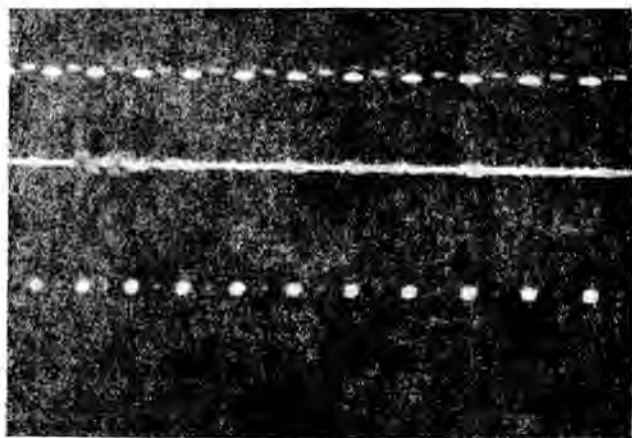


Рис. 10.

Средняя величина скорости упругой волны в сплошном стержне согласно пяти замерам получилась

$$c = 4720 \text{ м/сек} \pm 5\%.$$

4) Четвертый метод определения скорости упругой волны деформации по периоду собственных колебаний концевого груза не относится к методу прямого замера скорости упругой волны, так как в этом случае скорость упругой волны определяется по известной формуле [4]

$$c = \frac{2\pi l}{\beta_1 T_1},$$

в которую подставляется измеренная опытным путем величина T_1 и где c — скорость упругой волны, l — длина каната, T_1 — период колебания, β_1 — наименьший корень уравнения

$$a = \beta_1 \operatorname{tg} \beta_1,$$

где a — отношение веса стержня к весу груза.

Для каната $6 \times 37 + 1$ о. с., $d = 17$ мм, $\delta = 0,9$ мм величина T_1 получилась равной 0,2 сек., скорость распространения упругой волны деформации $c = 3500$ м/сек $\pm 5\%$.

Сводная таблица

Характеристика испытываемого каната	Метод измерения	Кем и когда произведен опыт	Величина c м/сек	Примечание
—	—	Перри и Смит	3800	
$d=18,5$ мм $6 \times 19+1$ о. с.	По частоте собственных продольных колебаний	Пеньков, Бондарчук, Кролевец 1948 г.	4200	Скорость c авторы подсчитали, пользуясь данными, полученными для E_k
$d=17$ мм $6 \times 37+1$ о. с.	По частоте собственных колебаний груза, свободно висящего на нижнем конце каната	По нашим данным	3400 3500	Результаты, сходные с опытными данными Перри и Смита, а также с данными Пенькова, Бондарчука, Кролевица
$d=14,8$ мм $6 \times 37+1$ о. с.	По сдвигу фаз колебаний двух датчиков помещенных в нижнем и верхнем концах каната	То же	1620	
$d=14,8$ мм $6 \times 37+1$ о. с.	Методом разрывных контактов	То же	1610	
$d=14,8$ мм $6 \times 37+1$ о. с.	По отраженной звуковой волне	То же	1630	
Диаметр проволоки 4 мм	По отраженной звуковой волне	То же	4720	Опыт проведен для проверки методов определения величины c для канатов
Диаметр проволоки 4 мм	По частоте собственных колебаний груза, свободно висящего на нижнем конце проволоки	То же	4840	Опыт проведен для сравнения величины c для сплошного стержня и каната

Период колебания концевой груза в обоих случаях был определен универсальным вибрографом „Кембридж“, специально приспособленным для замера таких низких частот.

Таким же методом была определена скорость упругой волны для сплошного стержня (диаметр проволоки 4 мм).

В этом случае период колебания $T_1 = 0,24$ сек., подсчитанная по формуле $c = \frac{2\pi l}{\beta_1 T_1}$ скорость упругой волны равна $c = 4840$ м/сек $\pm 5\%$.

На основании всего вышеизложенного можно составить сводную таблицу (см. стр. 125).

Из приведенной таблицы следует, что

1. Скорость упругой волны стальных проволочных канатов, непосредственно измеренная тремя различными методами, оказалась (в среднем) равной $c = 1620$ м/сек.

2. Скорость упругой волны в сплошном стержне (проволока $d = 4$ мм), измеренная непосредственно и вычисленная по формуле

$$c = \frac{2\pi l}{T_1 \beta_1},$$

через собственную частоту стержня оказалась равна $c = 4780$ м/сек.

3. Скорость упругой волны в проволочных канатах, вычисленная по формуле $c = \frac{2\pi l}{T_1 \beta_1}$, через собственную частоту каната равна $c = 3500$ м/сек.

Эти экспериментальные данные показывают, что скорость распространения упругой волны в проволочных стальных канатах значительно ниже ($c = 1600$ м/сек), чем в сплошном стержне ($c = 4780$ м/сек), а это показывает, что формула $c = \frac{2\pi l}{T_1 \beta_1}$ для определения скорости распространения упругой волны в стальных проволочных канатах неприменна.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. Н. Савин, Динамическая теория расчета шахтных подъемных канатов, 1949, Издательство АН УССР.
2. Д. Ф. Перри и Д. М. Смит, Механическое торможение и его влияние на оборудование подъемника, Special Publication, 1932, N 7747/7-0.
3. А. М. Пеньков, А. С. Бондарчук, М. С. Кролевец, Экспериментальное определение динамических напряжений в шахтных подъемных канатах, Записки института горной механики № 7, 1949, Издательство АН УССР.
4. С. П. Тимошенко, Теория колебаний в инженерном деле, 1934, Государственное технико-теоретическое издательство.

Поступила 12. IX 1949.