

## ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ДЕТОНАЦИИ ЗАРЯДА ВВ ПРИ ВЗРЫВЕ В ГРУНТАХ

***Б.К. Маликов***

---

Разработан метод определения скорости детонации заложенных в грунт зарядов ВВ на основе измерения сейсмических волн от взрыва и совершенствования дешифрирования осциллограмм, полученных при их регистрации. Выведена эмпирическая формула для расчета скорости детонации заряда ВВ.

*Ключевые слова:* скорость детонации; волна напряжения; критический диаметр; фронт детонационной волны; продольная волна, поправочный коэффициент.

Одним из важных факторов, обеспечивающих качественное выполнение различного рода работ с использованием взрыва, является скорость детонации, и поддержание ее фиксированной величины для выбираемых технологий позволяет сделать важные выводы о механизме детонации.

Поскольку основная роль в формировании волны напряжения в массиве принадлежит скорости детонации, то управление скоростью детонации заряда взрывчатых веществ можно рассматривать как один из методов управления энергией взрывчатых веществ.

Тип ВВ, дисперсность, плотность, диаметр заряда и условия взрывания, наличие и характер оболочки заряда – все эти факторы существенно влияют на скорость и устойчивость детонации за-

ряда и должны учитываться при ведении взрывных работ.

Известно, что для каждого ВВ можно установить два характерных диаметра заряда: *критический диаметр*, меньше которого детонация заряда ВВ становится неустойчивой, т.е. может произойти затухание; *предельный диаметр*, при дальнейшем увеличении которого скорость детонации заряда ВВ становится постоянной.

Известные в настоящее время методы измерения скорости детонации базируются на использовании электронно-оптической аппаратуры, что позволяет с высокой точностью измерить скорость детонации [1]. К ним относятся фотографический и осциллографический методы.

*Фотографический* метод измерения скорости детонации основан на регистрации светяще-

гося фронта детонационной волны, распространяющейся по заряду ВВ. Для этой цели применяются фоторегистраторы или фотохронографы типа СФР, ЖФР, ЖЛВ. Фотографический метод измерения скорости детонации может быть использован при регистрации скорости детонации в лабораторных условиях при испытании ВВ в светопрозрачных оболочках, но непригоден при взрыве ВВ в шпурах, скважинах и горных выработках.

**Осциллографический метод.** Этот метод более универсальный и используется как в лабораторных, так и в производственных условиях. В зависимости от применяемого типа датчиков метод может быть основан на ионизации продуктов взрыва (ПВ) за фронтом детонационной волны или на использовании реостатного датчика, сопротивление которого меняется по мере движения фронта детонации.

В осциллографическом методе может быть использован как электронный, так и светолучевой осциллографы. Использование электронного осциллографа позволяет измерять скорость детонации на базах до 20 мм. Измерение скорости детонации светолучевым осциллографом лучше производить на базах 20 и более миллиметров.

**Определение скорости детонации удлиненных зарядов ВВ сейсмическим методом.** Время нарастания положительной фазы в продольной волне от 0 до  $\max$ , как это показано в работе [2], строго коррелирует со временем детонации заряда ВВ. Кроме того, установлены некоторые особенности ближней зоны, в том числе радиус сейсмического очага этой зоны, определяемый как:

$$r_o = C_p t_n, \text{ м}, \quad (1)$$

где  $C_p$  – скорость распространения продольной волны в массиве;  $t_n$  – время детонации заряда,

В этой зоне преобладающей по интенсивности является продольная волна. Основная энергия сейсмических колебаний здесь связана с горизонтальной составляющей скорости колебаний в этой волне. Особенностью сейсмике ближней зоны является быстрое изменение волновой картины из-за одновременного формирования отдельных волн и различия в скоростях их распространения.

В этой зоне нарастание положительной фазы (рисунок 1) происходит до тех пор, пока протекает процесс детонации заряда.

Корреляционная связь, которая существует между временем детонации заряда и временем нарастания положительной фазы, регистрируемой на некотором расстоянии от взрыва, является основанием, на котором базируется разработан-

ная методика определения скорости детонации заряда ВВ.

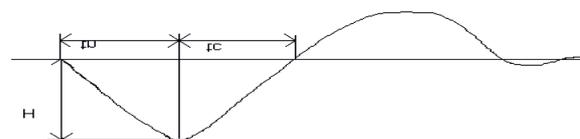


Рисунок 1 – Сейсмограмма взрыва:  
H – максимальная амплитуда;  $t_n$  – время нарастания положительной фазы, с;  $t_c$  – время спада положительной фазы, с

Скорость детонации удлиненного заряда определяется зависимостью

$$D = \frac{l}{t_o} \text{ м/с}, \quad (2)$$

где  $D$  – скорость детонации ВВ м/с;  $l$  – длина заряда, м;  $t_o$  – время детонации заряда, с.

Предположим, что время детонации  $t_o$  и время нарастания положительной фазы  $t_n$  равны.

Тогда, решая систему уравнений (1) и (2)

$$\left. \begin{aligned} r_o &= C_p \cdot t_n \\ D &= \frac{l}{t_o} \end{aligned} \right\}$$

при  $t_o = t_n$  из первого уравнения получим:

$$t_n = \frac{r_o}{C_p}, \text{ с}. \quad (3)$$

Подставив значение  $t_n$  во второе уравнение, получим:

$$D = \frac{l C_p}{r_o}, \text{ м/с}. \quad (4)$$

В этой зависимости скорость детонации прямо пропорциональна длине заряда и скорости продольной волны  $C_p$  и обратно пропорциональна радиусу сейсмического очага. При вычислении эта формула не даст правильного результата, поскольку в ней не учитывается увеличение  $t_n$  при прохождении волны напряжения по грунтам.

Предполагая, что  $t_n$  не равно  $t_o$ , можно получить мультипликативный коэффициент  $K = \frac{t_o}{t_n}$ , учитывающий увеличение времени нарастания положительной фазы, связанное с поглощением энергии грунтом. Однако  $t_o$  мы не можем знать заранее. По этой причине предлагается коэффициент  $K$  определять опытным или экспериментальным путем.

**Экспериментальное определение значения коэффициента K.** Как было сказано выше,  $t_o = t_n$  справедливо в том случае, если измерение проводится в идеально жесткой среде, где предполагает-

ся отсутствие деформации грунта и любая потеря энергии на пути продвижения волны напряжения. Однако при взрыве в натуральных средах  $t_0 \neq t_n$ , поскольку среда не является идеальной, а энергия взрыва передается по массиву на расстояние с потерями, что приводит к уменьшению амплитуды колебания, и увеличению времени нарастания положительной фазы волны.

Для того чтобы полученная формула могла быть использована для вычисления скорости детонации, необходимо в нее ввести эмпирический поправочный коэффициент  $K$ , определенный опытным путем. Коэффициент  $K$  отражает свойства среды, которые влияют на изменение временных параметров волны с расстоянием, и приводит к ослаблению волны напряжения и увеличению времени нарастания положительной фазы волны напряжения. Этот коэффициент следует из неравенства  $t_0 \neq t_n$  и характеризуется отношением  $K = t_0/t_n$ .

Полученная зависимость с учетом поправки на потерю энергии будет иметь следующий вид:

$$D = K \frac{ICp}{r}, \text{ м/с.} \quad (5)$$

Для выяснения влияния породной среды на время нарастания положительной фазы от  $t_0$  до  $t_{max}$  и получения эмпирических коэффициентов, были проведены лабораторные исследования в грунтовой модели. В качестве зарядов использовались отрезки детонирующего шнура (дш). Заряды инициировались каплями азида свинца. Взрывались заряды в лесовом грунте на глубине 10 см.

Измерение параметров волн напряжений проводилось индукционными датчиками скорости ИДС-1 с записью сигналов от датчиков на световом осциллографе Н-117 с использованием гальванометров М-017-400. Датчики располагались перпендикулярно оси заряда на расстоянии 25, 30, 40, см. Длина заряда применялась равной 0,08 м, вес заряда – 1 гр, глубина заложения заряда в грунт  $h=10$  см. Скорость детонации  $D$  определялась по зависимости (3) в лабораторном модуле.

Результаты, полученные при обработке осциллограмм взрывов, приведены в таблице 1.

Вычисление скорости детонации проводилось по формуле (3). Однако она не учитывает поглощение энергии с расстоянием.

Согласно паспортным данным ДШ детонирует со скоростью  $D = 7000$  м/с. Если мы разделим известную скорость детонации на вычисленную по зависимости (5), т.е.  $7000:50,5=138,6$ , то получим некий множитель (некое число), на который необходимо умножить результаты, вычисленные по зависимости (5), чтобы получить действительную скорость детонации.

Проведем небольшой анализ полученного числа. Это необходимо для того чтобы разобраться в структуре поправочного коэффициента. Запишем полученное число в экспоненциальной форме, то есть в виде  $\alpha \cdot 10^\beta$ , где число  $\alpha$  должно начинаться с ненулевой цифры, после которой стоит запятая [3]. Например: число 138,6 в экспоненциальном виде запишется как  $1,386 \cdot 10^2$  где число  $\alpha$  – мантисса,  $\beta$  – порядок. И мантисса и порядок, а в целом и числовой поправочный коэффициент (обозначим его в общем виде как  $K \cdot 10^2$ ), отражают увеличение времени нарастания положительной фазы с расстоянием.

Этот небольшой анализ позволяет сделать заключение, что “порядок” для данного масштаба взрыва есть величина постоянная, т.е.  $10^2 = \text{const}$ , а мантисса – величина переменная, отражающая состояние породного массива – его трещиноватость, пористость, обводненность и другие условия распространения волны напряжения.

В нашем случае мантисса характеризует относительное затухание скорости колебания с расстоянием, а порядок – потерю энергии (диссипацию) в зоне пластической деформации вокруг заряда. Мантисса, которая характеризует затухание с расстоянием параметров колебаний (напряжение, смещение, скорость, ускорение), может быть определена по одному из этих параметров как отношение результатов вычислений параметров волны напряжений, предыдущего к последующему. В данном случае мантисса определялась по скорости смещения.

Скорость смещения  $U$  в продольной волне, которая регистрируется в ближней зоне, является одним из основных параметров, который чутко реагирует на изменение породных условий, энергетических и конструктивных параметров зарядов ВВ, их влияние на скорость детонации. Поэтому коэффициент  $K$  может быть выражен через соотношение скоростей смещения:

$$K = \frac{U_1}{U_2},$$

где  $U_1$  – скорость смещения в продольной волне в 1-й точке регистрации;  $U_2$  – то же в последующей точке.

Замена временных параметров на динамические не увеличивает погрешность, что подтверждается в дальнейшем при практических расчетах скорости детонации.

Для определения скорости детонации необходимо иметь следующие исходные данные: рабочую осциллограмму, полученную при регистрации конкретного взрыва; данные о длине заряда и месте расположения инициатора; расстояние от места взрыва до точек регистрации волн напряжений.

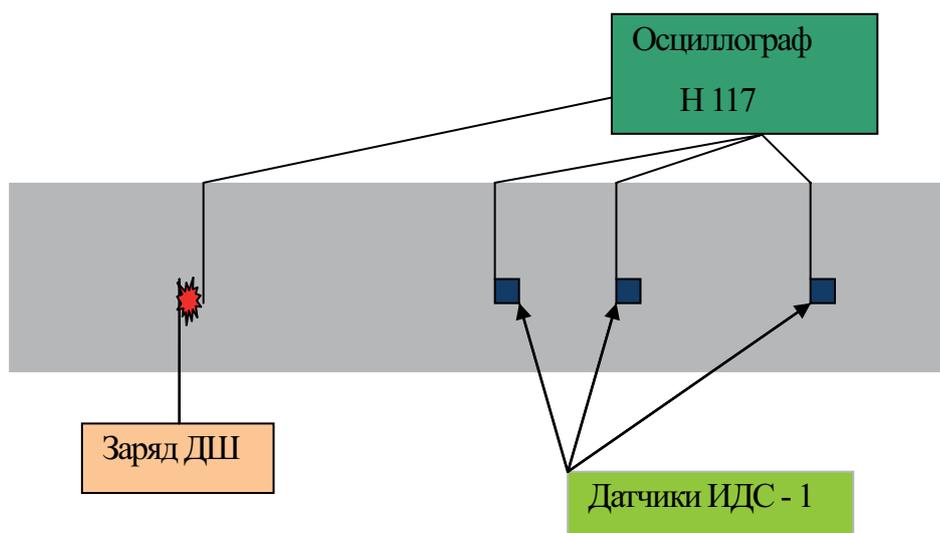


Рисунок 2 – Блок-схема измерения волн напряжений в модуле

Таблица 1 – Результаты вычисления скорости детонации

№ п/п	Длина заряда	Скорость продольной волны $C_p$ , м/с	Радиус сейсмического очага $R = C_p t$ , м	Скорость детонации $D$ , вычисленная по формуле $D = \frac{L C_p}{r}$ , м/с
Взрывание в плотном грунте				
1	0,08	120	0,19	50,5
2	0,08	138	0,22	50,2
3	0,08	121	0,19	50,9
Взрывание с воздушным промежутком вокруг заряда				
1	0,08	186	0,36	41,3
2	0,08	200	0,40	40,0
3	0,08	194	0,38	40,8

При расшифровке осциллограмм определяют следующие параметры: время нарастания положительной фазы в волне Р по  $x$ -составляющей (рисунок 1); скорость распространения продольной волны  $C_p$  между пунктом наблюдения и взрывом; скорости смещения  $U_1$  и  $U_2$  в точках наблюдения сейсмического действия взрыва по методике, представленной выше; радиус сейсмического очага  $R_0 = C_p t_n$ , м; коэффициент поглощения из отношения скорости колебания предыдущей точки к последующей  $K = U_1/U_2$ .

После этого по зависимости (5) определяется скорость детонации заряда.

Результаты вычисления скорости детонации с учетом поправочного коэффициента  $K$ , приведенные в таблице 2.

Анализируя данные таблицы можно сделать вывод, что при детонации заряда в плотно утрам-

бованном грунте скорость детонации повышается. Причиной этого является высокое давление в зарядной камере в процессе детонации. Скорость детонации снижается, если вокруг заряда создать воздушный зазор (5–15) d зар.

В графе 10 таблицы 2 числовой коэффициент получен в результате деления реальной скорости детонации ДШ на результат, полученный по зависимости (5). В конечном варианте зависимость, по которой вычисляется скорость детонации, примет вид:

$$D = K 10^2 \frac{1 C_p}{r}, \text{ м/с}, \quad (6)$$

где  $K 10^2$  – числовой поправочный коэффициент, полученный на основе эксперимента при дешифрировании осциллограмм;  $10^2$  – для зарядов при лабораторных испытаниях.

Таблица 2 – Результаты расчета скорости детонации ДШ с учетом коэффициента  $K$ 

№ п/п	Длина заряда, м	Скорость смещения $U_{x_1}$ , см/с	Скорость смещения $U_{x_2}$ , см/с	Мантисса $K=U_1/U_2$	Коэффициент $K \cdot 10^2$	Время нарастания положительной фазы $t_{п,с}$	Скорость продольной волны $C_p$ , м/с	Радиус сейсмического очага $r_0 = C_{п,с} t_{п,с}$ , м	$D_1 = \frac{LCp}{r}$	$D_2 = D_1 K \cdot 10^2$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Взрывание без воздушного зазора вокруг заряда										
1	0,08	17,0	9,21	1,84	$1,84 \times 10^2$	0,00144	120	0,19	50,5	9292
2	0,08	17,5	9,24	1,84	$1,84 \times 10^2$	0,00157	138	0,22	50,2	9236
3	0,08	18,6	10,92	1,70	$1,74 \times 10^2$	0,00157	121	0,19	50,9	8653
Взрывание с воздушным промежутком вокруг заряда										
1	0,08	8,80	4,62	1,90	$1,90 \times 10^2$	0,00193	186	0,36	41,3	7847
2	0,08	7,7	4,2	1,83	$1,83 \times 10^2$	0,00199	200	0,40	40,0	7320
3	0,08	7,7	4,2	1,83	$1,83 \times 10^2$	0,00198	194	0,38	40,8	7466

Примечание: Скорость детонации ДШ при взрыве в воздухе не менее 6500 м/с [4].

В графе 11 представлены результаты расчетов скорости детонации  $D$  с учетом числовых поправочных коэффициентов. При этом порядок для данного масштаба взрыва – величина постоянная, а мантисса изменяется от условий формирования и распространения волны напряжения. Сравнение полученных результатов показывает, что скорости детонации зарядов в грунтах выше, чем тех же зарядов на воздухе. Увеличение воздушного зазора вокруг заряда приближает скорость детонации этого же заряда к показателям, которые получены при взрывании зарядов на открытой поверхности.

#### Литература

1. Дубнов Л.В., Бахаревич Н.С., Романов А.И. Промышленные взрывчатые вещества. М.: Недра, 1982.
2. Мосинец В.Н. Энергетические и корреляционные связи процесса разрушения горных пород взрывом. Фрунзе: Илим, 1963.
3. Данилов И.Д. Секреты программируемого микрокалькулятора. М.: Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. 160 с.
4. Светлов Б.Я., Ярмольник Н.Е. Теория и свойства промышленных взрывчатых веществ. М.: Недра, 1973.