

УДК 622.235.535.2

Кутуев Вячеслав Александрович

младший научный сотрудник,
Институт горного дела УрО РАН,
620075 г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58
e-mail: kutuev88@gmail.com

Меньшиков Павел Владимирович

младший научный сотрудник,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: menshikovpv@mail.ru

Жариков Сергей Николаевич

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: 333vista@mail.ru

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕТОНАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ВВ

Аннотация:

В статье приводится обзор известных методов измерения скорости распространения фронта детонационной волны, такие как метод Дотриша, фотографический метод, электромагнитный метод, осциллографический метод (ионизационный метод), реостатный метод, метод "НИСД", метод импульсной рефлектометрии. Представлен анализ современного состояния изучения детонационных процессов непосредственно в условиях горных предприятий.

Ключевые слова: скорость детонации, методы измерения скорости детонации, взрывчатые вещества, показатель изоэнтропы, детонационное давление, плотность ВВ, методика измерений скорости детонации, современное цифровое оборудование Data Trap II

DOI: 10.18454/2313-1586.2016.03.078

Kutuev Vyacheslav A.

junior researcher,
The Institute of Mining Ural branch RAS,
620219, Yekaterinburg, 58 Mamin-Sibiryak st.
e-mail: kutuev88@gmail.com

Menshikov Pavel V.

junior researcher,
The Institute of Mining Ural branch RAS
e-mail: menshikovpv@mail.ru

Zharikov Sergey N.

candidate of technical sciences,
senior researcher,
The Institute of Mining Ural branch RAS
e-mail: 333vista@mail.ru

THE ANALYSIS OF METHODS FOR STUDYING EXPLOSIVES' DETONATION PROCESSES

Abstract:

The article presents an overview of known methods for measuring the speed of detonation wave propagation such as the Dotrish method, the photography procedure, electro-magnetite method, oscillography (ionization) method, rheostate method, the NISD procedure, the method of impulse reflexometry. The analysis of up-to-date state of detonation processes studying in the conditions of mining plants is presented.

Key words: detonation velocity, methods of measuring the detonation, velocity explosives, iso-entropic exponent, detonation pressure, explosives' density, the methods of detonation velocity measurement, the Data Trap II modern digital equipment

Скорость распространения волны детонации во взрывчатых веществах, применяемых в современных условиях, равна, как известно, нескольким километрам в секунду. С точки зрения привычных представлений большинства людей, детонация взрывчатого вещества считается явлением своеобразным и необычным. Для облегчения его анализа можно изыскать прием, который позволил бы изучаемое явление представить в такой форме, которая окажется достаточно привычной, понятной и простой.

Если проанализировать историю изучения скорости детонации с давних времен и применявшиеся ранее способы, такие как хронографы Меттеганга, Боаса, конденсаторные хронографы и т. д., то можно прийти к выводу, что они требовали проведения испытаний на зарядах значительной длины, но при этом не обеспечивали необходимую точность измерений. Следовательно, вышеперечисленные методы, согласно [1], уже неактуальны. Из старых методов целесообразно рассмотреть лишь метод детонирующего

шнура (метод Дотриша), который также обладает невысокой точностью, но исключительно прост, и поэтому применяется и в настоящее время.

Метод Дотриша заключается в сравнении неизвестной скорости детонации заряда с известной скоростью детонации детонирующего шнура (ДШ).

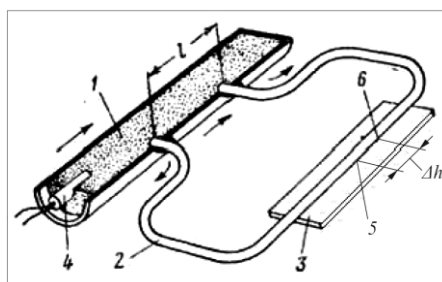


Рис. 1 – Схема определения скорости детонации по методу Дотриша:

1 – испытуемый заряд ВВ; 2 – отрезок детонирующего шнура;

3 – свинцовая пластинка; 4 – капсюль-детонатор;

5 – середина отрезка шнура; 6 – метка на пластинке после взрыва

На рис. 1 приведена схема испытания. Отрезок ДШ 2 некоторой длины располагают так, чтобы концы его соприкасались с зарядом, а середина находилась на свинцовой пластинке 3. Концы шнура углубляют в ВВ в случае, если заряд с малой скоростью детонации состоит из порошкообразного ВВ. Базой для определения D является расстояние между концами шнура l , требующее точного измерения. Возникающая в заряде детонация распространяется от левого до правого конца шнура, образуя тем самым в шнуре две детонационные волны, идущие навстречу друг другу. В месте столкновения детонационных волн произойдет повышение давления, и на свинцовой пластинке образуется углубление (метка). Так как детонация в левом конце шнура начинается раньше, чем в правом, то точка столкновения волн 6 будет находиться правее положения 5, где и получится метка. Обозначим через Δh расстояние между серединой отрезка шнура и местом столкновения волн. Время протекания детонации по левой части шнура $t_{\text{л}}$ до столкновения равно времени протекания детонации по заряду $t_{\text{зар}}$ на длине l плюс время распространения детонации по правой части шнура $t_{\text{п}}$ до места столкновения:

$$t_{\text{л}} = t_{\text{зар}} + t_{\text{п}}.$$

Обозначим через L длину отрезка шнура, а через $D_{\text{ш}}$ скорость его детонации. Скорость детонации заряда – D . Получается следующее:

$$t_{\text{л}} = \frac{L/2}{D_{\text{ш}}} + \frac{\Delta h}{D_{\text{ш}}}; \quad t_{\text{зар}} = \frac{l}{D}; \quad t_{\text{п}} = \frac{L/2}{D_{\text{ш}}} - \frac{\Delta h}{D_{\text{ш}}}.$$

Следовательно,

$$\frac{L/2}{D_{\text{ш}}} + \frac{\Delta h}{D_{\text{ш}}} = \frac{l}{D} + \frac{L/2}{D_{\text{ш}}} - \frac{\Delta h}{D_{\text{ш}}},$$

а при упрощении уравнения

$$D = D_{\text{ш}} \frac{l}{2\Delta h}. \quad (1)$$

Для нахождения скорости D необходимо и достаточно знать величины l , Δh и $D_{\text{ш}}$. Скорость детонации детонирующего шнура $D_{\text{ш}}$, применяемого для испытаний, должна быть $D_{\text{ш}} \geq 6,5$ км/с. В качестве промежуточного детонатора для получения хорошего детонационного импульса используют прессованную шашку плотностью 1,5 – 1,6 г/см³ [2].

При определении D этим методом используют заряды общей длиной 0,3 – 0,5 м с длиной базы $l = 0,2 - 0,25$ м. Погрешность измерений 3 – 5 %.

В качестве недостатка метода Дотриша отмечается [2], что с помощью него можно определить только среднюю скорость детонации ВВ по заряду (участок *l*).

Фотографический метод измерения скорости детонации, согласно [3], основан на регистрации светящегося фронта детонационной волны, распространяющейся по заряду ВВ. Фоторегистры с зеркальной разверткой (скоростной фоторегистр (СФР), фоторегистр со ждущей разверткой (ЖФР), ждущая лупа времени (ЖЛВ) и т. п.), позволяют проводить съемку как в режиме непрерывной развертки светящегося изображения, так и в режиме покадровой съемки. На схеме наиболее широко применяемого скоростного фоторегистра СФР заряд ВВ *1* расположен перпендикулярно к плоскости рисунка (рис. 2). Объектив *2* проецирует изображение процесса детонации заряда в плоскости вертикальной регулируемой щели *3*, которая выделяет из этого изображения узкую полоску. Объектив *4* с помощью вращающегося зеркала *5* фокусирует изображение этой плоскости на фокальной поверхности с неподвижной фотопленкой *6*. При вращении зеркала световая полоска, вырезанная из изображения процесса, перемещается вдоль фокальной поверхности, экспонируя пленку. Благодаря сочетанию движения изображения по пленке с движением самого процесса, на пленке образуется линия, наклон которой определяет скорость детонации заряда:

$$D = v_p \operatorname{tg} \varphi / \beta, \quad (2)$$

где v_p – скорость развертки изображения; φ – угол наклона касательной к кривой фотографии; β – коэффициент поперечного увеличения системы, равный отношению длины изображения на пленке к длине заряда.

Суммарная относительная погрешность измерения постоянной скорости детонации – 0,8 %, а процесса, идущего с переменной скоростью, – 2,5 %.

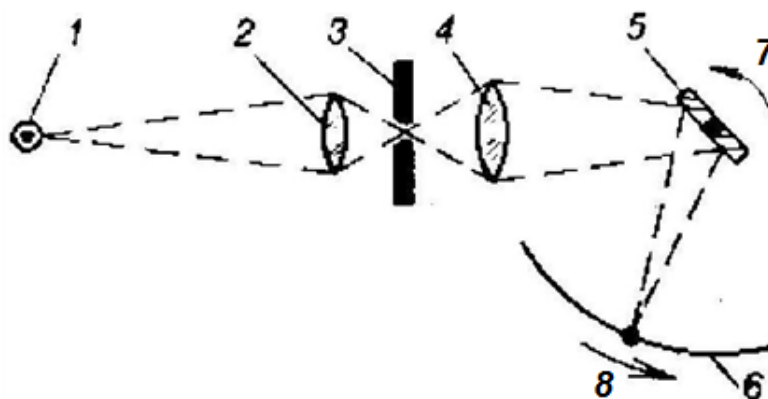


Рис. 2 – Принципиальная оптическая схема фоторегистра с зеркальной разверткой:

1 – заряд ВВ; *2* – объектив; *3* – щель; *4* – объектив; *5* – зеркало;
6 – фотопленка; *7* – направление вращения зеркала;
8 – направление перемещения изображения на пленке

Достоинством фотографического метода является возможность непрерывного измерения скорости детонации по длине заряда.

Электромагнитный метод измерения скорости детонации впервые предложен Завойским Е.К. и в дальнейшем развит в работах Шведова К.К., Дремина А.Н., Похила П.Ф. и др. [3].

При помощи электромагнитного метода можно определить среднюю скорость фронта детонации *D*. Для этого пользуются датчиком с двумя переключателями, отстоящими одна от другой на некотором расстоянии *S* (база измерения), как показано на рис. 3.

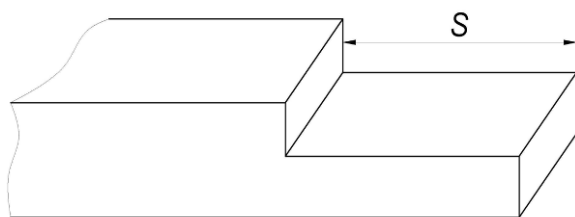


Рис. 3 – Датчик для измерения скорости детонации

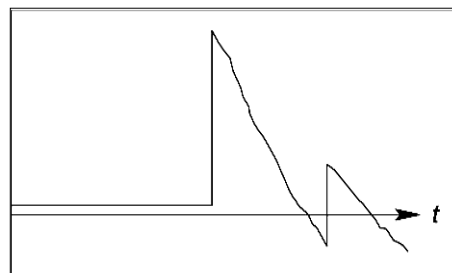


Рис. 4 – Осциллограмма, полученная при применении двухступенчатого датчика

При применении такого датчика осциллограмма процесса имеет вид, представленный на рис. 4. Время между двумя пиками на осциллограмме t_s – это период, за который фронт волны проходит расстояние S от одной ступени датчика до другой. Зная базу и время, можно определить скорость детонации:

$$D = \frac{S}{t_s}. \quad (3)$$

Согласно [3], точность измерения лежит в пределах $D = 1 \%$.

Осциллографический метод (ионизационный метод) измерения скорости детонации основан на ионизации продуктов взрыва (ПВ) за фронтом детонационной волны. Электрическое сопротивление ПВ составляет от нескольких единиц до нескольких десятков Ом на миллиметр. Если в заряд ВВ на некотором расстоянии один от другого, называемом базой измерения, поместить искровые промежутки, к которым приложено некоторое напряжение, то в момент прохождения фронтом детонации искрового промежутка в его цепи возникает электрический импульс, регистрируемый осциллографом [3].

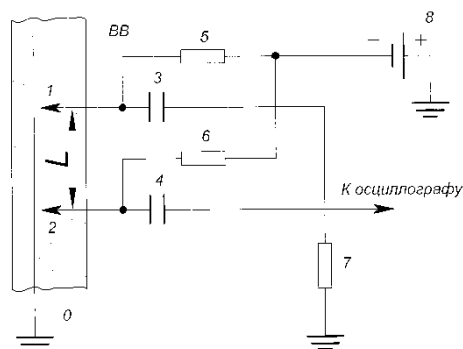


Рис. 5 – Схема осциллографического метода определения скорости детонации:
 1, 2 – ионизационные датчики; 3, 4 – конденсаторы; 5, 6, 7 – сопротивления;
 8 – источник постоянного тока; 0 – заземленный электропровод

Прежде чем измерить скорость детонации с использованием ионизационных датчиков 1 и 2 (рис. 5), необходимо зарядить от источника питания 8 конденсаторы 3 и 4 через зарядные сопротивления 5 и 6. При протекании детонации по заряду сверху вниз происходит замыкание ионизационного датчика 1, и конденсатор 3 станет разряжаться через ионизационный промежуток и разрядное сопротивление 7, вследствие этого в цепи возникает скачок напряжения. Спустя время, достаточное для подхода детонационной волны ко второму датчику, происходит его замыкание с разрядкой конденсатора 4, и в цепи возникает второй скачок напряжения. Осциллографом фиксируются последовательные скачки напряжения, возникающие при замыкании ионизационных датчиков.

Время между двумя импульсами t соответствует времени прохождения детонационной волны между датчиками, помещенными на расстоянии один от другого L , являющемся базой измерения [3].

Скорость детонации в этом случае рассчитывается по формуле

$$D = L/t. \quad (4)$$

Для обеспечения точного измерения скорости детонации необходимо, чтобы импульсы, снимаемые с ионизационных датчиков, имели, более крутой передний фронт, достаточную величину и небольшую длительность. Широкое применение нашла "спусковая" тиратронная схема формирования импульсов, позволяющая использовать последовательно до 12 ионизационных датчиков. Импульсы, получаемые от тиратронного преобразователя, фиксируются двухлучевым осциллографом ОК-17 с линейной разверткой длительностью от 3 до 2000 мкс, что позволяет измерять скорость детонации на базе 20 мм с точностью до 1 % [3].

В качестве недостатка методов следует отметить, что для измерения меняющихся по длине заряда скоростей детонации метод средних скоростей непригоден, а оптические методы не позволяют судить о процессах детонации заряда в непрозрачной оболочке.

Измерение скорости детонации с применением реостатного датчика, сопротивление которого меняется по мере движения фронта детонации, обеспечивает непрерывное измерение меняющихся по длине заряда скоростей детонации.

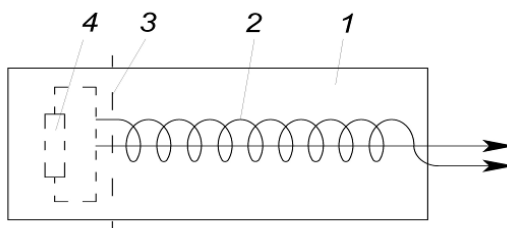


Рис. 6 – Схема работы реостатного датчика:

1 – заряд ВВ; 2 – датчик сопротивления; 3 – фронт детонации;
4 – сопротивление ионизационного промежутка

Реостатный датчик имеет следующую конструкцию – медный провод диаметром 1 мм с намотанной на него спиралью из эмалированного провода диаметром 0,1 мм с высоким удельным сопротивлением (рис. 6). При прохождении детонационной волны по заряду медный провод замыкается с проводом высокого удельного сопротивления через ионизационный промежуток. Так как сопротивление невелико и изменяется в незначительных пределах, скорость изменения сопротивления датчика определяет скорость детонации:

$$D = \frac{l}{r} \frac{dR}{dt}, \quad (5)$$

где r – сопротивление единицы длины датчика; R – общее сопротивление датчика.

Выражение (5) можно записать в следующем виде:

$$D = \frac{l}{r} \frac{d}{dt} \left(-\frac{U}{i} \right)$$

$$\text{при } i = \text{const}, \quad D = \frac{l}{ri} \frac{dU}{dt},$$

где U – напряжение, приложенное к датчику; i – ток, протекающий через датчик. Следовательно, скорость детонации в любой момент времени определяется тангенсом угла наклона кривой $U = f(t)$, фиксируемой осциллографом.

Таким образом, для измерения скорости детонации с помощью реостатного датчика необходимо обеспечить протекание через него постоянного тока, не зависящего от изменения сопротивления датчика.

Гальпериным Л.Н. и Шведовым К.К. была предложена импульсная схема питания реостатного датчика, позволяющая измерить стационарную скорость детонации с погрешностью до 2 %. При измерении скорости неустановившегося процесса суммарная погрешность не превысит 3 – 4 % [3].

Канадской фирмой "Instantel" выпущено оборудование, в основе которого лежит реостатный метод (его современный вариант), согласно [4], метод *НИСД – метод непрерывного измерения скорости детонации*.

В настоящее время измерение скорости детонации взрывчатых веществ достаточно часто выполняют современным реостатным методом. В заряд ВВ по всей его длине помещают измерительный кабель, который присоединяют к кабелю РК. При взрыве, по мере прохождения детонационной волны, длина измерительного кабеля уменьшается и, соответственно, изменяется сопротивление кабеля. Регистрирующий прибор непрерывно измеряет изменения величины сопротивления электрической цепи и записывает во встроенную память. Регистрирующий прибор фиксирует событие (взрыв одного заряда) в виде цифрового файла-таблицы «время – величина сопротивления» с возможностью расшифровки на персональном компьютере в виде диаграммы «длина заряда – время» с автоматическим вычислением скорости детонации D . Измерения проводят с использованием соответствующей аппаратуры. На рис. 7 изображен подобный прибор под названием VOD Mate («Instantel», Канада). Комплект оборудования состоит из двух частей: измерительного кабеля «Instantel» и блока регистрирующей аппаратуры VOD Mate.

Измерительный кабель «Instantel» представляет собой одножильный кабель с внешним диаметром 1,5 мм. Центральная жила – проволока диаметром 0,2 – 0,3 мм из материала с большим удельным сопротивлением. Она окружена полимерным покрытием (внутренней изоляцией), которое, в свою очередь, – оплеткой из тонкой стальной проволоки. От внешних воздействий (в основном от влаги) стальная оплетка защищена внешней изоляцией в виде тонкой полимерной пленки.

Расшифровку результатов полевых измерений проводят на персональном компьютере с помощью программного обеспечения Blast Ware III и получают распечатки результатов в виде диаграммы «длина заряда – время» (рис. 8) с автоматическим вычислением скорости детонации D , м/с:

$$D = \operatorname{tg}(\alpha) = \frac{dL}{d\tau}, \quad (5)$$

где $\operatorname{tg}(\alpha)$ – тангенс угла наклона полученной линии, градус; L – длина заряда ВВ, м; τ – отрезок времени, соответствующий длине заряда ВВ на графике, с.

Для каждого типа ВВ производят не менее 5 – 6 измерений скорости детонации [5].

Метод импульсной рефлектометрии, называемый также методом отраженных импульсов или локационным методом, базируется на распространении импульсных сигналов в проводных системах (линиях и кабелях) связи.

Сущность метода импульсной рефлектометрии заключается в выполнении следующих операций:

- зондировании измерительного кабеля импульсами напряжения;
- приеме импульсов, отраженных от места замкнутой цепи;
- выделении отражений от места замыкания на фоне помех (случайных и отражений от неоднородностей линий);
- определении расстояния до замкнутой цепи (соединения) по временной задержке отраженного импульса относительно зондирующего.



Рис. 7 – Измеритель скорости детонации VOD Mate («Instantel», Канада)

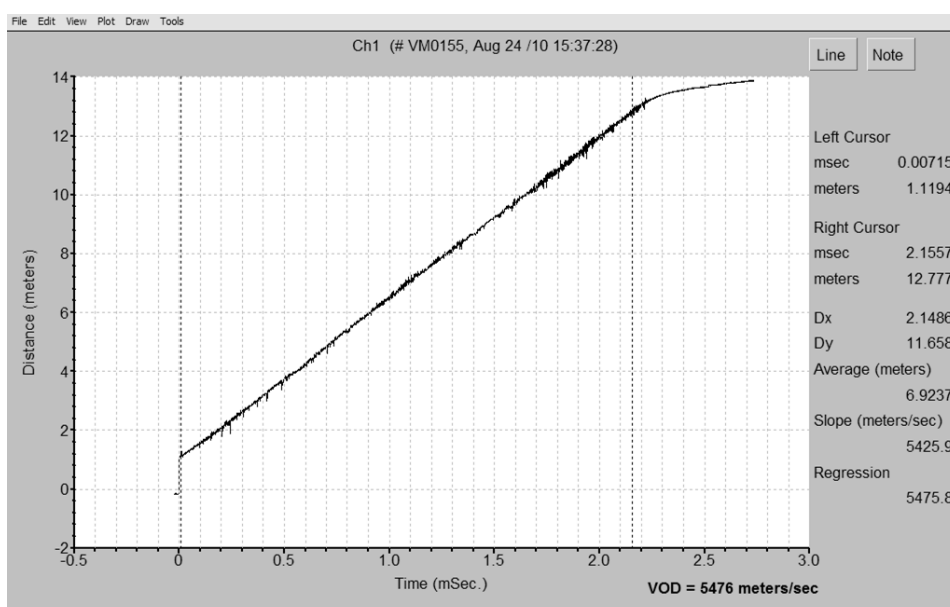


Рис. 8 – Диаграмма результатов измерений скорости детонации скважинного заряда ВВ (нитронит Э-70, скорость детонации– 5476 м/с)

Соответствующий прибор (рис. 9) обеспечивает измерение скорости детонации взрывчатых веществ с использованием метода рефлектометрии временных интервалов. В нем используется коаксиальный кабель РК-75 с волновым сопротивлением не более 100 Ом/км. С его помощью можно измерять скорость детонации ВВ в режиме «визуализации по требованию» и в стабильном режиме для определения точности синхронизации детонаторов. Указанный на рис. 9 прибор Speed VOD работает от аккумулятора. Выходные данные прибора Speed VOD скачиваются в программное обеспечение, которое работает в операционной системе Windows. В полной мере обеспечивается как последовательная связь, так и связь через коммуникационную сеть. Комплект оборудования состоит из двух частей: измерительного кабеля РК-75 и блока регистрирующей аппаратуры Speed VOD.

Измерительный кабель РК-75 представляет собой одножильный кабель с внешним диаметром 7 или 12,2 мм. Внутренний проводник диаметром 0,24 – 1,63 мм состоит из меди. Он окружен покрытием из полиэтилена (внутренней изоляцией), которое окружено оплеткой из тонкой медной проволоки. От внешних воздействий (в основном от влаги) оплетка защищена внешней изоляцией из ПВХ-пластика (поливинилхлорида) [6].



Рис. 9 – Измеритель скорости детонации Speed VOD

Расшифровку результатов полевых измерений проводят на персональном компьютере, получают распечатки результатов в виде диаграммы «длина заряда – время» с автоматическим вычислением скорости детонации D , м/с:

$$D = \operatorname{tg}(\alpha) = \frac{dL}{d\tau}. \quad (7)$$

Точность измерения скорости детонации приборами Speed VOD и VOD Mate изменяется в пределах 5 %.

Современное состояние изучения скорости детонации обстоит следующим образом. Из описанных выше методов измерения скорости распространения фронта детонационной волны широко применяется НИСД (реостатный) и метод импульсной рефлектометрии.

Лабораторией разрушения горных пород ИГД УрО РАН разработана методика измерений скорости детонации взрывчатых веществ рефлектометрическим методом с использованием измерителя скорости детонации Speed VOD [6].

Проведение испытаний с аппаратурой Speed VOD (Компания «TLC ENGINEERING SOLUTIONS (PTY) LTD»), основанной на импульсной рефлектометрии, дает погрешность в измерениях порядка $\pm 5\%$, но существенным плюсом является простота ее применения и дешевизна расходных материалов. Как было сказано ранее, понадобится измерительный кабель РК-75 и блок регистрирующей аппаратуры Speed VOD.

Реостатный метод, а точнее его современный "канадский вариант" лежит в основе таких приборов, как VOD Mate («Instantel», Канада) и DATA TRAP II («MREL Group of Companies Limited», Канада).

Лаборатория разрушения горных пород ИГД УрО РАН владеет этими методами исследований, и для каждого из них разработаны соответствующие методики:

1. Методика измерений скорости детонации взрывчатых веществ реостатным методом с использованием измерителя скорости детонации VOD Mate («Instantel», Канада) [5].

2. Методика измерений скорости детонации взрывчатых веществ реостатным методом ускорения сейсмических колебаний и давления на фронте ударной воздушной волны с использованием измерителя скорости детонации DATA TRAP II («MREL Group of Companies Limited»).

На последней хотелось бы остановиться и рассмотреть ее подробнее. В ней изложена инструкция по замеру скорости детонации при помощи аппаратуры DATA TRAP II. Комплект оборудования для измерения скорости детонации взрывчатых веществ состоит

из 4-х частей: измерительного кабеля VOD PROCABLE-LR «Синий», VOD PROCABLE «Зеленый» или зондовых стержней VOD PROBEROD-HR/HS, коаксиального радиочастотного кабеля типа РК (РК-75, РК-50 или RG-58/U), BNC-адаптеров и блока регистрирующей аппаратуры DATA TRAP II DATA/VOD Recorder. Показатель точности измерения скорости детонации – 3 %.

Схема последовательности соединения и измерения D показана на рис. 10.

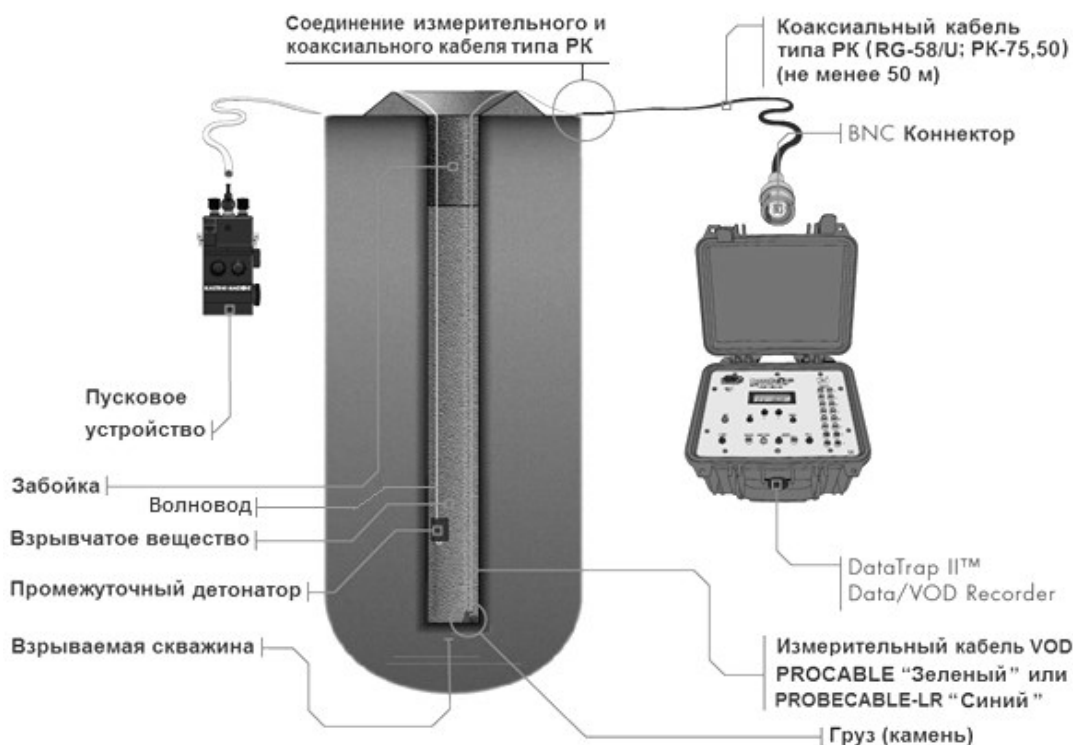


Рис. 10 – Схема измерения скорости детонации ВВ в одной скважине прибором DATA TRAP II DATA/VOD Recorder

В настоящее время, руководствуясь этой методикой и аппаратурой DATA TRAP II, можно производить замеры не только в одной, но одновременно и в восьми скважинах, а при необходимости возможен комбинированный вариант измерения скорости детонации, позволяющий измерять 32 скважины и более одновременно при синхронизации двух приборов DATA TRAP II, что указывает на большие возможности в исследовании детонационных характеристик ВВ в производственных условиях.

Следует отметить, что существует зависимость [7], которая выражает пропорциональность между давлением детонации P , плотностью ВВ ρ_0 и квадратом скорости детонации D :

$$P = \frac{\rho_0 D^2}{n + 1}, \quad (8)$$

где n – показатель изоэнтропы.

Рассмотрим показатель изоэнтропы (n) из уравнения (8). Это важнейший показатель свойств ВВ, характеризующий процессы расширения продуктов взрыва. Значение (n) можно установить при помощи теории подобия и достаточно несложных экспериментальных взрывов кольцевого и Г-образного зарядов ВВ [8]. С достаточной степенью точности можно считать, что для штатных ВВ $n = 3$. Поэтому расчеты давления при использовании ВВ заводского изготовления значительно упрощаются. Сложнее дело обстоит с эмульсионными ВВ. Указанный показатель у эмульсионных ВВ изменяется [9].

Поэтому воздействие зарядов на горную породу при технологических взрывах с применением эмульсионных взрывчатых веществ менее предсказуемо.

Используя современное цифровое оборудование фирмы «MREL», т. е. DATA TRAP II, мы можем измерить детонационное давление P с применением калиброванных PVDF манометров, карбоновых резисторов или турмалиновых датчиков. Следовательно, зная плотность ВВ, скорость детонации и детонационное давление, показатель изоэнтропы для применяемого эмульсионного ВВ вполне можно установить:

$$n = \frac{\rho_0 D^2}{P} - 1. \quad (9)$$

Таким образом, одновременное измерение давления и скорости протекания процесса позволяет установить интенсивность расширения продуктов взрыва в скважине и, следовательно, оценить эффективность дробящего действия эмульсионного ВВ.

Литература

1. Андреев К.К. Теория взрывчатых веществ / К.К. Андреев, А.Ф. Беляев. - М.: Оборонгиз, 1960. - С. 210 - 212.
2. Корнилков М.В. Разрушение горных пород взрывом: конспект лекций / М.В. Корнилков; УГГУ. - Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2008. - С. 56 - 62.
3. Дубнов Л.Н. Промышленные взрывчатые вещества / Л.Н. Дубнов Н.С. Бахаре-вич, А.И. Романов. - М.: Недра, 1988. - С. 304 - 309.
4. Определение фактической скорости детонации и работоспособности новых эмульсионных ВВ с целью выбора рациональной плотности заряжания при взрывоподготовке железных руд / И.Ю. Маслов, В.В. Пупков, Ф.Б. Кампель и др. // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2003. - № 5.
5. Методика измерений скорости детонации взрывчатых веществ реостатным методом с использованием измерителя скорости детонации VOD Mate CTO 01.01.004-2011 / ИГД УрО РАН. - Екатеринбург: УрО РАН, 2011.
6. Методика измерений скорости детонации взрывчатых веществ рефлектометрическим методом с применением измерителя скорости детонации Speed VOD CTO 01.01.004-2011 (компания «TLCEngineering-solutionsltd.») / ИГД УрО РАН. - Екатеринбург: УрО РАН, 2011.
7. Физика взрыва / Под ред. Л.П. Орленко. - Изд. 3-е, перераб. - В 2 т. Т. 1. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. - С. 95.
8. Покровский Г.И. Взрыв / Г.И. Покровский. - Изд. 4-е, перераб. и доп. - М.: Недра, 1980. - С. 42 - 43.
9. Сеницын В.А. Повышение эффективности взрывной подготовки горной массы на карьерах с применением взрывчатых веществ на основе обратных эмульсий: автореф. дис. ... канд. техн. наук / В.А. Сеницын; ИГД УрО РАН. - Екатеринбург, 2007. - 26 с.