

УДК 622.235.4

Меньшиков Павел Владимирович

научный сотрудник,
лаборатория разрушения горных пород,
Институт горного дела УрО РАН,
620075 г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58
e-mail: menshikovpv@mail.ru

Жариков Сергей Николаевич

кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник,
заведующий лабораторией
разрушения горных пород,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: 333vista@mail.ru

Кутуев Вячеслав Александрович,

научный сотрудник,
лаборатория разрушения горных пород,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: slavik1988@mail.ru

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕТОНАЦИОННЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК ЭВВ ПОРЭМИТ 1А****Аннотация:*

Представлены результаты исследования скорости детонации ЭВВ порэммит 1А в картонных гильзах диаметром Ø100 мм. Данное ВВ применяется на карьере ПАО «Ураласбест». На основании замеров определены дополнительно другие характеристики ЭВВ порэммит 1А. Измерения проводились реостатным методом с использованием цифрового измерителя скорости детонации VODMate. Одновременно с измерениями скорости детонации испытывали гильзовые заряды ЭВВ порэммит 1А на полноту детонации при их иницировании разными промежуточными детонаторами, которые были проведены одновременно с измерениями скорости детонации. На основании измеренных значений скорости детонации, геометрических параметров зарядов ЭВВ и фактической плотности проведен расчет основных детонационных характеристик ЭВВ порэммит 1А: массовой скорости и скорости звука продуктов детонации, детонационного давления, удельной теплоты взрыва при постоянном объеме, объема газообразных продуктов детонации, коволюма, температуры взрыва, времени протекания и ширины зоны химической реакции и критического диаметра заряда ЭВВ. Расчетные значения критического диаметра заряда ЭВВ подтверждают значения критического диаметра детонации в стальной оболочке согласно техническим условиям.

DOI: 10.25635/2313-1586.2020.04.032

Menshikov Pavel V.

Research Worker,
Laboratory of Rock Destruction,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,
620075 Ekaterinburg,
58 Mamina-Sibiryaka str.
e-mail: menshikovpv@mail.ru

Zharikov Sergey N.

Candidate of Technical Sciences,
Leading Research Worker,
Head of Laboratory of Rock Destruction,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS
e-mail: 333vista@mail.ru

Kutuev Vyacheslav A.

Research Worker,
Laboratory of Rock Destruction
Institute of Mining, Ural Branch of RAS
e-mail: slavik1988@mail.ru

**RESEARCH OF DETONATION
PARAMETERS OF EMULSION
EXPLOSIVES POREMIT 1A****Abstract:*

The article presents the main parameters and results of the study of the detonation velocity of emulsion explosives Poremit 1A in cardboard tubes with a diameter of Ø100 mm during a large-scale blast in the conditions of the Asbestovsky open pit of PJSC «Uralasbest». Detonation velocity measurements were carried out by the rheostat method using a set of equipment: a VODMate digital detonation velocity meter and a VOD PROCABLE GREEN sensing cable. Also presented are the results of tests of the charges in cardboard tubes of an emulsion explosive Poremit 1A for the completeness of detonation, initiated by different boosters, which were carried out simultaneously with the measurements of the detonation velocity. Based on the measured values of the detonation velocity, the geometric parameters of the emulsion explosive charges, and the actual density, the main detonation parameters of the emulsion explosives were calculated for the Poremit 1A: mass velocity and sound velocity in detonating products, detonation pressure, specific heat of explosion at constant volume, volume of gaseous detonation products, covolume, explosion temperature, flow time, and width of the chemical reaction zone, as well as the critical diameter of the emulsion explosive charge. The calculated values of the critical diameter of the emulsion explosive charge confirm the values of the critical diameter of detonation in the steel shell according to the specifications.

* Исследования выполнены в рамках Госзадания № 075-00581-19-00, тема № 0405-2019 -0005, а также при дополнительном привлечении хоздоговорных средств.

Ключевые слова: эмульсионные взрывчатые вещества, взрывчатые материалы, скорость детонации, порэмит 1А, полнота детонации, детонационные характеристики, детонационное давление, удельная теплота взрыва, объем газообразных продуктов детонации, коволюм, температура взрыва, время протекания химической реакции, ширина зоны химической реакции, критический диаметр заряда.

Key words: emulsion explosives, explosive materials, detonation velocity, Poremit 1A, detonation completeness, detonation parameters, detonation pressure, specific heat of explosion, volume of gaseous detonation products, covolume, explosion temperature, duration time of chemical reaction, width of the chemical reaction zone, critical charge diameter.

Введение

В течение последних нескольких десятков лет эмульсионные взрывчатые вещества (ЭВВ) показали высокую эффективность применения, т.к. они имеют приемлемые взрывчатые характеристики, высокую дисперсность частиц, вследствие чего повышается стабильность и скорость детонации ВВ, а также уменьшается критический диаметр заряда и ширина зоны химической реакции. Также ЭВВ обладают низкой чувствительностью к тепловому и механическому воздействию, в связи с чем полностью автоматизирован процесс заряжания скважин. ЭВВ являются однородными смесями и состоят из эмульсионной основы и сенсibilизатора. Основа получается при смешивании водного раствора аммиачной селитры с минеральным маслом и эмульгатором. При заряжании эмульсия имеет свойство проникать в трещины. С одной стороны, это негативно влияет на формирование колонки заряда. С другой стороны, если это растекание невелико и основной объем успевает сенсibilизироваться около стенок скважины, то дробление во время взрыва может быть лучше. В каждом конкретном случае на эффективность оказывают влияние свои особенности. Недостатки при осуществлении процесса тоже могут привести к некоторому положительному результату. В целом можно отметить, что направление использования эмульсионных ВВ на горных предприятиях уверенно развивается, а детонационные характеристики вызывают стабильный интерес, потому что разница в скорости детонации, например, на 1000 м/с вызовет различное давление и соответствующий разрушающий эффект.

Основными характеристиками ВВ являются скорость детонации, плотность заряжания, диаметр заряда, теплота взрыва, массовая скорость, скорость звука в продуктах детонации, детонационное давление, показатель политропы, удельная внутренняя энергия в точке Чепмена-Жуге, критический диаметр, ширина зоны химической реакции и другие показатели.

Согласно гидродинамической теории, детонацией считается перемещение по ВВ зоны химического превращения – ударной волны с постоянной амплитудой (скачком давления). Амплитуда и скорость перемещения ударной волны постоянны, так как диссипативные потери, сопровождающие ударное сжатие вещества, компенсируются теплотой реакции превращения ВВ.

Скорость детонации определяется химическим составом ВВ, плотностью, характеристиками заряда и условиями взрывания. При одинаковых условиях скорость детонации постоянна и ее значение является максимально возможным. Это делает скорость детонации одной из важнейших характеристик ВВ [1].

Основные характеристики ЭВВ порэмит 1А

Изготовленное ЭВВ порэмит 1А должно соответствовать требованиям ТУ 84-08628424-671-96 [2], указанным в табл. 1.

Основные физико-химические и взрывчатые показатели ЭВВ порэмит 1А приведены в табл. 2 [2].

Таблица 1

Основные контролируемые показатели при приемке ЭВВ порэмита 1А

№ п/п	Наименование показателя	Норма
Контролируемые показатели при приемке		
1.	Внешний вид	Пластичное вещество от светло-желтого до темно-коричневого цвета
2.	Массовая доля компонентов, %: эмульсия порэмита 1А газогенерирующая добавка (ГГД)	99,0 ± 0,5 1,0 ± 0,5
3.	Плотность, г/см ³	1,15-1,28
4.	Детонация заряда в бумажной или полиэтиленовой оболочке диаметром 100 ± 5 мм от промежуточного детонатора	Полная
5.	Водоустойчивость: масса аммиачной селитры, перешедшей в раствор с единицы площади контакта порэмита 1А с водой, кг/м ² , не более чем за 4 часа или за 24 часа	0,05 0,15

Таблица 2

Основные характеристики ЭВВ порэмита 1А

№ п/п	Наименование характеристики	Значение
Неконтролируемые показатели при приемке		
<i>Расчетные</i>		
1.	Теплота взрыва, МДж/кг (ккал/кг)	2,96 (723)
2.	Удельный объем газообразных продуктов взрыва, л/кг	1010
3.	Кислородный баланс, %	- 6,2
4.	Тропиловый эквивалент по теплоте взрыва	0,72
5.	Концентрация энергии при плотности заряда 1,28 г/см ³ , МДж/дм ³ (ккал/дм ³)	3,80 (922)
<i>Экспериментальные</i>		
1.	Время нахождения заряда порэмита 1А в обводненной скважине без потери физико-химических и взрывчатых свойств, сутки, не более	10
2.	Скорость детонации заряда массой не менее 1000 г от дополнительного детонатора массой 50 г в стальной трубе 60x3 (ГОСТ 8732-78), км/с	4,8 – 5,2
3.	Плотность заряжания при массовой доле ГГД 0,5-1,5%, г/см ³	1,15 – 1,28
4.	Газовая вредность (массовая концентрация вредных газов в пересчете на условную окись углерода), л/кг	24
5.	Критическая плотность заряда в стальной оболочке диаметром 100 ± 2 мм, г/см ³	1,3
6.	Чувствительность к удару по ГОСТ 4545-88: нижний предел, мм частность взрывов, %	500 0
7.	Чувствительность к трению на приборе К-44-3: нижний предел, МПа (кгс/см ²) частность взрывов при давлении прижатия ≈ 800 МПа (8000 кгс/см ²)	≈ 1200 (12000) 0
8.	Критический диаметр детонации в стальной оболочке, мм	30
9.	Температура вспышки при времени задержки 60 с, °С	305 – 315
10.	Минимальная энергия зажигания, Дж	Более 1
11.	Динамическая вязкость при температуре 80 °С, кПахс (кП)	0,8 – 1,2 (8 – 12)

Метод измерения

Измерение скорости детонации взрывчатых веществ выполняется реостатным методом по методике Института горного дела УрО РАН [3, 4]. Погрешность измерений по данной методике составляет $\delta = \pm 5\%$. В гильзовый заряд ВВ по всей его длине помещают измерительный кабель-датчик, который присоединяют к кабелю РК-75 (рис. 1). При взрыве по мере прохождения детонационной волны длина измерительного кабеля уменьшается (он сгорает, и сопротивление падает) 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.

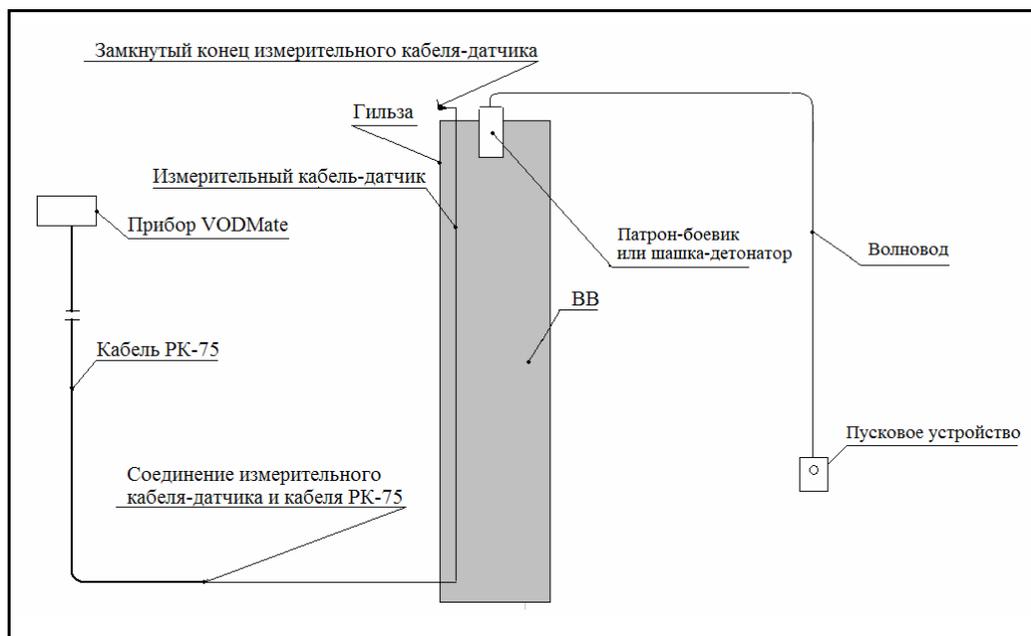


Рис. 1. Схема измерения скорости детонации ЭВВ в гильзе

Измерения проводят с использованием аппаратуры VODMate («Instantel», Канада) (рис. 2). Комплект оборудования состоит из двух частей: измерительного кабеля VOD PROCABLE GREEN и блока регистрирующей аппаратуры VODMate [3, 5].



Рис. 2. Цифровой измеритель скорости детонации VODMate

Измерительный кабель VOD PROCABLE GREEN (удельное сопротивление – 11,2 Ом/м) имеет классическую конфигурацию стандартного коаксиального кабеля типа RG, где провод с высоким сопротивлением является главным проводом, а оплетка действует как обратный провод. Диэлектрический материал, помещенный между проводом высокого сопротивления и обратным проводом, обеспечивает изоляцию и их физическое разделение. Последнее снижает возможность короткого замыкания в процессе работы с кабелем. Он представляет собой одножильный кабель с внешним диаметром 1,5 мм. Центральная жила – проволока диаметром 0,2 – 0,3 мм из материала (константан) с большим удельным сопротивлением. Она окружена полимерным покрытием (внутренняя изоляция), 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 [3, 5].

Результаты замеров скорости детонации ЭВВ порэмит 1А

Замеры скорости детонации ЭВВ порэмит 1А в картонных гильзах [6, 7] проводились в августе 2020 г. при проведении массового взрыва на карьере ПАО Ураласбест (размеры гильз в табл. 3). Одновременно с замерами скорости детонации на взрываемом блоке проводились испытания зарядов ЭВВ порэмит 1А в гильзах на полноту детонации при инициировании разными промежуточными детонаторами [8]. Скорость детонации измерялась только в гильзах № 1, 2 и 3.

Заполнение гильз ЭВВ порэмит 1А осуществлялось из шланга зарядной машины. Начальная плотность ЭВВ на выходе из зарядной машины $\rho=1,17 \text{ г/см}^3$. Первыми заполнялись гильзы для испытаний на полноту детонации.

Результаты замеров скорости детонации ЭВВ порэмит 1А в гильзах представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты замеров скорости детонации ЭВВ порэмит 1А в гильзах

№ Гильзы	Диаметр заряда ВВ, мм	Длина заряда ВВ, мм	Промежуточный детонатор, (масса, г)	Система инициирования	Плотность ЭВВ, г/см ³	Масса заряда ВВ, кг	Скорость детонации ЭВВ порэмит 1А, м/с ($\delta=\pm 5\%$)	Полнота детонации
1	100	1000	Шашка ДПУ ПТ-600 (600)	НСИ Rionel	1,2	9,4	4294 $\pm \delta$	полная
2	100	1000			1,18	9,3	3977 $\pm \delta$	полная
3	100	1000		НСИ ИСКРА-П	1,24	9,7	3847 $\pm \delta$	полная
4	100	1000	Патрон-боевик Сферит (1000)	НСИ Rionel, ДШ	1,17	9,2	не измерялась	полная
5	100	1000	Патрон-боевик Нитронит (800)	НСИ ИСКРА-П, ДШ	1,17	9,2	не измерялась	отказ 600 мм

Графическая интерпретация замеров скорости детонации ЭВВ порэмит 1А цифровым измерителем скорости детонации VODMate представлена на рис. 3 – 5.

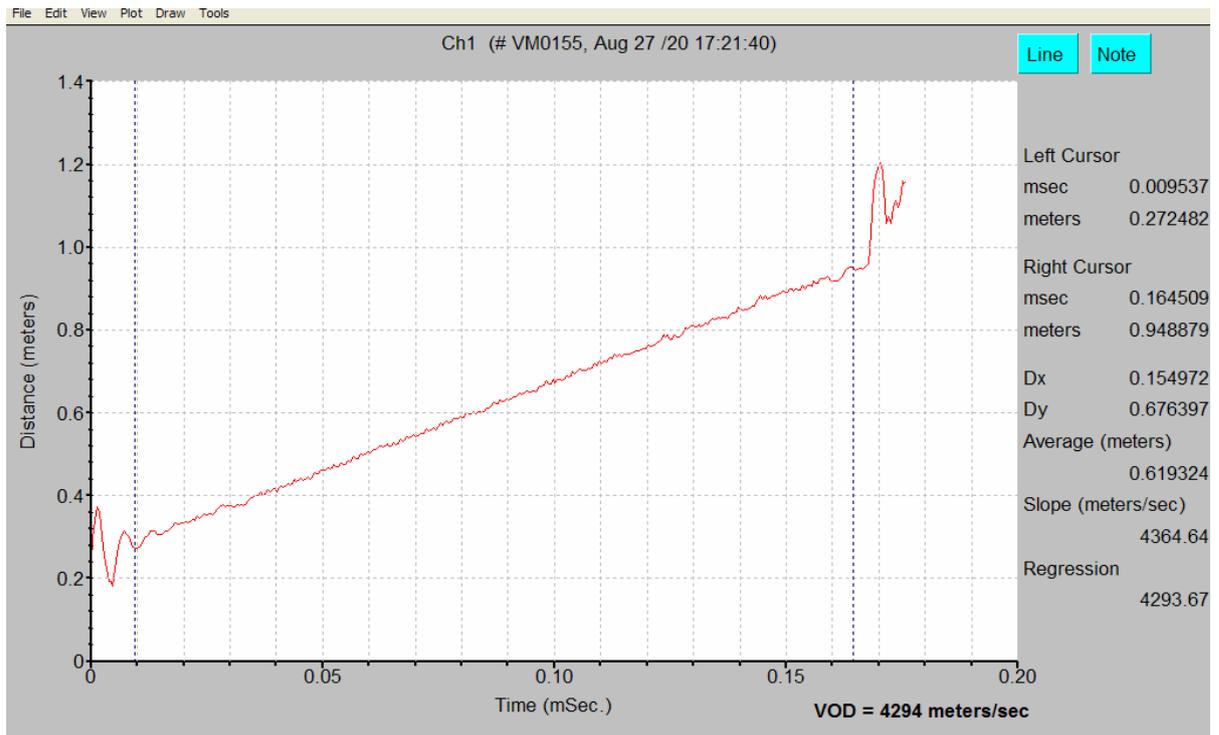


Рис. 3. Подрыв гильзы № 1

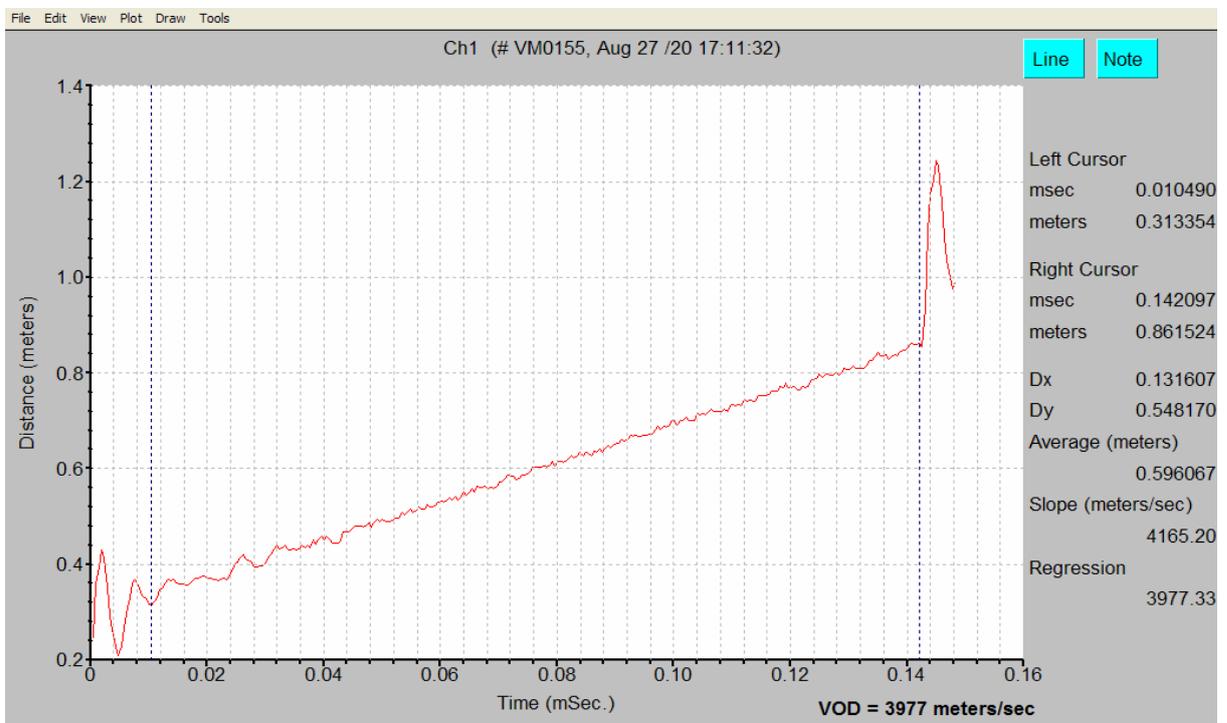


Рис. 4. Подрыв гильзы № 2

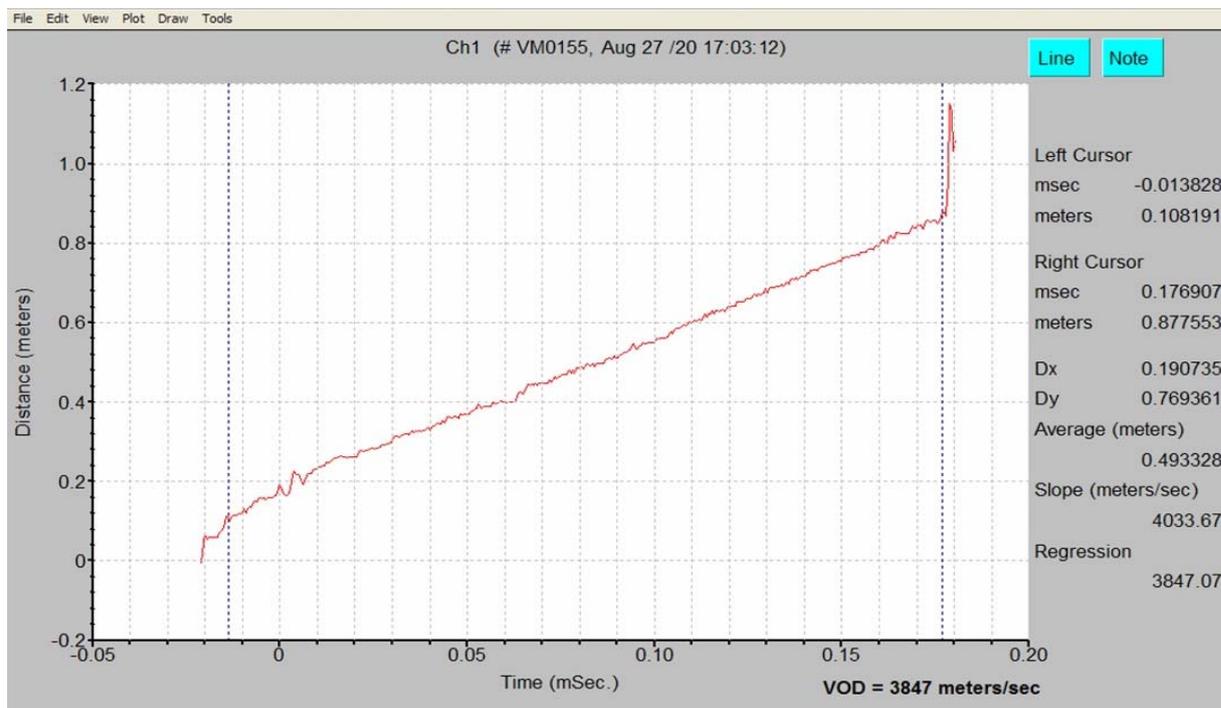


Рис. 5. Подрыв гильзы № 3

В процессе испытания ЭВВ порэмит 1А на полноту детонации при подрыве гильзы № 4, инициируемой промежуточным детонатором (ПД) сферит (1000 гр.), произошла полная детонация заряда ЭВВ, а при подрыве гильзы № 5, инициируемой ПД нитронит (800 г), сдетонировала только верхняя часть заряда ЭВВ длиной 400 мм вместе с ПД. Отказавшая часть заряда длиной 600 мм упала на землю, и эмульсия вытекла. Предположительно это могло произойти от ударной волны при подрыве гильзы № 4 или от воздействия зарядов в блоке при массовом взрыве в карьере.

По результатам проведенных замеров скорости детонации ЭВВ порэмит 1А были определены его основные детонационные характеристики [9 – 19], представленные в табл. 4.

Таблица 4

Результаты расчета детонационных характеристик ЭВВ порэмит 1А

№ подрыва	Диаметр заряда, d , мм	Плотность ВВ, ρ , г/см ³	Масса заряда ВВ, Q , кг	Скорость детонации ЭВВ порэмит 1А, D , м/с ($\delta = \pm 5\%$)	Массовая скорость истечения продуктов взрыва, U , м/с	Скорость звука в продуктах взрыва, C , м/с	Детонационное давление в т. Ч-Ж, $P_{\text{Ч-Ж}}$, ГПа	Удельная теплота взрыва при постоянном объеме, Q , МДж/кг	Объем газообразных продуктов взрыва, $V_{\text{пв}}$, м ³	Коволом, α , м ³	Температура взрыва, $T_{\text{взр}}$, °К	Время протекания химической реакции, τ , мкс	Ширина зоны химической реакции, α , мм	Критический диаметр заряда ВВ, $d_{\text{кр}}$, мм
1	100	1,20	9,4	4294 ±δ	1074	3221	5,53	1,15	9,51	0,006	3365	4,66	15	30,01
2		1,18	9,3	3977 ±δ	994	2983	4,68	0,99	9,39	0,006	2989	5,25	15,6	31,29
3		1,24	9,7	3847 ±δ	962	2885	4,57	0,92	9,80	0,006	2485	6,31	18,2	36,41

Выводы

1. Фактическая плотность ЭВВ составила $1,17 - 1,24 \text{ г/см}^3$ и находится в диапазоне плотности заряжания при массовой доле ГГД $0,5 - 1,5 \%$, которая согласно ТУ составляет $1,15 - 1,28 \text{ г/см}^3$.

2. При расчете основных детонационных характеристик ЭВВ порэммит 1А [14] расчетные значения критического диаметра заряда ЭВВ составили от 30 до 36,4 мм, что подтверждает значения критического диаметра детонации в стальной оболочке (30 мм) согласно ТУ 84-08628424-671-96.

3. Инструментальные замеры скорости детонации трех зарядов ЭВВ порэммит 1А в картонных гильзах диаметром $\varnothing 100 \text{ мм}$ показали, что при плотности заряжания $\rho = 1,18 - 1,24 \text{ г/см}^3$ фактическая скорость детонации составляет $D = (3847 - 4294 \text{ м/с}) \pm \delta$. Измеренные значения находятся ниже диапазона скорости детонации ЭВВ порэммит 1А в стальной трубе диаметром $\varnothing 60 \text{ мм}$, которая согласно ТУ 84-08628424-671-96 составляет $4800 - 5200 \text{ м/с}$. Вероятно, материал оболочки заряда, время сенсibilизации и качество входящих компонентов ЭВВ оказывают существенное влияние на скорость детонации. Данный вопрос в научно-технической литературе пока раскрыт недостаточно и, безусловно, требует дальнейших исследований.

Список литературы

1. Юханссон А.К., 1973. *Детонация взрывчатых веществ*: пер. с англ. / П. Персон; под ред. В.К. Бобылева. Москва: Мир, 352 с.
2. *Эмульсионное промышленное взрывчатое вещество «Порэммит-1А». Технические условия ТУ 84-08628424-671-96*, 1996. Дзержинск: ФГУП ГосНИИ «Кристалл», 19 с.
3. *Методика измерений скорости детонации взрывчатых веществ реостатным методом с использованием измерителя скорости детонации VODMate («Instantel», Канада): стандарт организации: СТО 01.01.004 – 2011*, 2011. Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 17 с.
4. Кутуев В.А., Меньшиков П.В., Жариков С.Н., 2016. Анализ методов исследования детонационных процессов ВВ. *Проблемы недропользования*, № 3 (10), С. 78 - 87. DOI 10.18454/2313-1586.2016.03.078
5. VOD Mate Operator Manual / *Instantel*, 1998, Canada, Ontario, 99 p.
6. Кутуев В.А., 2017. О взаимосвязи между скоростью детонации и временем газификации на примере промышленного эмульсионного взрывчатого вещества порэммит 1А. *Проблемы недропользования*, №2(13), С. 106 - 111. DOI: 10.18454/2313-1586.2017.02.106.
7. Castedo R., Natale M., López L. M., Sanchidrián J. A., Santos A. P. et al., 2018. Estimation of Jones-Wilkins-Lee parameters of emulsion explosives using cylinder tests and their numerical validation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, V. 112, P. 290 - 301. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms>. (дата обращения 2018.10.027)
8. Горинов С.А., 2020. *Иницирование и детонация эмульсионных взрывчатых веществ*. Йошкар-Ола: Стринг, 214 с.
9. Бондаренко И.Ф., Жариков С.Н., Зырянов И.В., Шеменев В.Г., 2017. *Буровзрывные работы на кимберлитовых карьерах Якутии*. Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 172 с.
10. Горбонос М.Г., 2011. *Методические указания по практическим занятиям и выполнению самостоятельных работ по дисциплине «Технология и безопасность взрывных работ» для студентов специальности 130403 «Открытые горные работы». Часть I*. Петрозаводск: Петрозаводский государственный университет, 51 с.
11. Кук М.А., 1980. *Наука о промышленных взрывчатых веществах*. Пер. с англ. под ред. Г.П. Демидюка и Н.С. Бахаревич. Москва: Недра, 453 с.

12. Лин Э.Э., 2011. Определение ширины детонационной зоны на основе принципа неопределенности. *Письма в журнал технической физики*, Т. 37, №10, С. 9 - 12.
13. Лавров В.В., 2013. *О возможности определения размеров зоны детонационной волны косвенными методами*. Черноголовка: Институт проблем химической физики РАН. URL: http://conf.nsc.ru/explosion/ru/scientific_program (дата обращения 01.09.2020)
14. *Физика взрыва. Т.1*. Под ред. Л.П. Орленко, 2002. Москва: Физматлит, 832 с.
15. Митрофанов В.В., 1982. *Теория детонации*. Новосибирск: Изд-во НГУ, 92 с.
16. Меньшиков П.В., Сеницын В.А., Шеменев В.Г., 2017. Определение детонационного давления и температуры взрыва промышленных эмульсионных взрывчатых веществ, применяемых на карьерах Урала. *Успехи современного естествознания*, № 7, С. 96 - 102.
17. Меньшиков П.В., Шеменев В.Г., Сеницын В.А., 2015. О возможности определения ширины зоны химической реакции на примере эмульсионного взрывчатого вещества "Фортис". *Проблемы недропользования*, № 4 (7), С. 77 - 83. DOI: 10.18454/2313-1586.2015.04.077.
18. Маслов И.Ю., Горинов С.А., Козырев С.А., 2020. К вопросу о расчете удельной теплоты взрыва эмульсионных взрывчатых веществ и гранэмитов. *Взрывное дело*, № 126/83, С. 51 - 67.
19. Козырев С.А., Власова Е.А., Соколов А.В., 2020. Оценка фактических энергетических характеристик эмульсионных взрывчатых веществ по данным экспериментального определения скорости детонации. *Горный журнал*, № 9, С. 47 - 53. DOI: 10.17580/gzh. 2020.09.06

References

1. Yukhansson A.K., 1973. *Detonatsiya vzryvchatykh veshchestv*: per. s angl. [Detonation of explosives: tr. from Engl.]/ P. Person; pod red. V.K. Bobyleva. Moscow: Mir Publ., 352 p.
2. *Emul'sionnoe promyshlennoe vzryvchatoe veshchestvo "Poremit-1A". Tekhnicheskie usloviya TU 84-08628424-671-96 96* [Emulsion industrial explosive "Poremit-1A". Technical conditions TU 84-08628424-671-96], 1996. Dzerzhinsk: FGUP GosNII "Kristall", 19 p.
3. *Metodika izmerenii skorosti detonatsii vzryvchatykh veshchestv reostatnym metodom s ispol'zovaniem izmeritelya skorosti detonatsii VODMate ("Instantel", Kanada): standart organizatsii: STO 01.01.004 – 2011* [Method of measuring the detonation rate of explosives by rheostat method using The VODMate detonation rate meter ("Instantel", Kanada): organization standard: STO 01.01.004 – 2011], 2011. Ekaterinburg: IGD UrO RAN, 17 p.
4. Kutuev V.A., Men'shikov P.V., Zharikov S.N., 2016. *Analiz metodov issledovaniya detonatsionnykh protsessov VV* [Analysis of methods for studying EXPLOSIVE detonation processes]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 3 (10), P. 78 - 87. DOI 10.18454/2313-1586.2016.03.078
5. VOD Mate Operator Manual / *Instantel*, 1998, Canada, Ontario, 99 p.
6. Kutuev V.A., 2017. *O vzaimosvyazi mezhdu skorost'yu detonatsii i vremenem gazifikatsii na primere promyshlennogo emul'sionnogo vzryvchatogo veshchestva poremit 1A* [On relationship between detonation rate and gasification time on the example of industrial emulsion explosive Poremit 1A]. *Problemy nedropol'zovaniya*, №2(13), P. 106 - 111. DOI: 10.18454/2313-1586.2017. 02.106.
7. Castedo R., Natale M., López L. M., Sanchidrián J. A., Santos A. P. et al., 2018. Estimation of Jones-Wilkins-Lee parameters of emulsion explosives using cylinder tests and their numerical validation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, V. 112, P. 290 - 301. URL: [https://doi.org/10.1016/j.ijrmmms.\(data obrashcheniya 2018.10.027\)](https://doi.org/10.1016/j.ijrmmms.(data obrashcheniya 2018.10.027))

8. Gorinov S.A., 2020. *Iniitsirovanie i detonatsiya emul'sionnykh vzryvchatykh veshchestv* [Initiation and detonation of emulsion explosives]. Ioshkar-Ola: String, 214 p.
9. Bondarenko I.F., Zharikov S.N., Zyryanov I.V., Shemenev V.G., 2017. *Burovzryvnye raboty na kimberlitovykh kar'erakh Yakutii* [Drilling and blasting operations at kimberlite quarries of Yakutia]. Ekaterinburg: IGD UrO RAN, 172 p.
10. Gorbonos M.G., 2011. *Metodicheskie ukazaniya po prakticheskim zanyatiyam i vypolneniyu samostoyatel'nykh rabot po distsipline "Tekhnologiya i bezopasnost' vzryvnykh rabot' dlya studentov spetsial'nosti 130403 "Otkrytye gornye raboty". Chast' 1* [Guidelines for practical training and performing independent work on discipline "Technology and Safety of Explosive Works" for students of the specialty 130403 "Open-pit mining". Part 1]. Petrozavodsk: Petrozavodskii gosudarstvennyi universitet, 51 p.
11. Kuk M.A., 1980. *Nauka o promyshlennykh vzryvchatykh veshchestvakh* [Science of industrial explosives]. Per. s angl. pod. red. G.P. Demidyuka i N.S. Bakharevich. Moscow: Nedra Publ., 453 p.
12. Lin E.E., 2011. *Opreделение ширины детонационной зоны на основе принципа неопределенности* [Determination of the detonation zone width based on uncertainty principle]. Pis'ma v zhurnal tekhnicheskoi fiziki, Vol. 37, №10, P. 9 - 12.
13. Lavrov V.V., 2013. *O vozmozhnosti opredeleniya razmerov zony detonatsionnoi volny kosvennymi metodami* [On possibility of determining size of detonation wave zone by indirect methods]. Chernogolovka: Institut problem khimicheskoi fiziki RAN. URL: http://conf.nsc.ru/explosion/ru/scientific_program (data obrashcheniya 01.09.2020)
14. *Fizika vzryva* [Physics of explosion]. Vol. 1. Pod red. L.P. Orlenko, 2002. Moscow: Fizmatlit, 832 p.
15. Mitrofanov V.V., 1982. *Teoriya detonatsii* [Detonation theory]. Novosibirsk: NGU Publ., 92 p.
16. Men'shikov P.V., Sinitsyn V.A., Shemenev V.G., 2017. *Opreделение детонационного давления и температуры взрыва промышленных эмульсионных взрывчатых веществ, применяемых на карьерах Урала* [Determination of detonation pressure and explosion temperature of industrial emulsion explosives used at quarries of the Urals]. Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya, № 7, P. 96 - 102.
17. Men'shikov P.V., Shemenev V.G., Sinitsyn V.A., 2015. *O vozmozhnosti opredeleniya shiriny zony khimicheskoi reaktsii na primere emul'sionnogo vzryvchatogo veshchestva "Fortis"* [On possibility of determining the width of chemical reaction zone on the example of emulsion explosive "Fortis"]. Problemy nedropol'zovaniya, № 4 (7), P. 77 - 83. DOI: 10.18454/2313-1586.2015.04.077.
18. Maslov I.Yu., Gorinov S.A., Kozyrev S.A., 2020. *K voprosu o raschete udel'noi teploty vzryva emul'sionnykh vzryvchatykh veshchestv i granemitov* [On question about calculating the specific detonation heat of emulsion explosives and granemits]. Vzryvnoe delo, № 126/83, P. 51 - 67.
19. Kozyrev S.A., Vlasova E.A., Sokolov A.V., 2020. *Otsenka fakticheskikh energeticheskikh kharakteristik emul'sionnykh vzryvchatykh veshchestv po dannym eksperimental'nogo opredeleniya skorosti detonatsii* [Evaluation of actual energy characteristics of emulsion explosives based on experimental determination of the detonation rate]. Gornyi zhurnal, № 9, P. 47 - 53. DOI: 10.17580/gzh. 2020.09.06