

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШИРИНЫ ЗОНЫ ХИМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ ПРОМЫШЛЕННОГО ЭМУЛЬСИОННОГО ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА ПОРЭМИТ 1А НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ В КВАНТОВОЙ МЕХАНИКЕ

П. В. Меньшиков¹, С. Н. Жариков¹, В. А. Кутуев¹

¹ Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

Аннотация: Представлены результаты многолетних исследований детонационных характеристик промышленного эмульсионного взрывчатого вещества (ПЭВВ) порэммит 1А, проведенных Лабораторией разрушения горных пород ИГД УрО РАН. С 2004 по 2020 гг. проведены инструментальные замеры скорости детонации ПЭВВ порэммит 1А в полигонных условиях при диаметре гильзовых зарядов $\varnothing 100$ мм. Согласно гидродинамической теории детонации проведен расчёт массовой скорости истечения продуктов взрыва и скорости звука в продуктах детонации. На основе феноменологического подхода к рассмотрению детонационных процессов во взрывчатых веществах (ВВ) по принципу неопределенности в квантовой механике, предложенному Лин Э. Э., рассчитаны параметры детонационной волны: время и ширина зоны химической реакции для ПЭВВ порэммит 1А. В результате проведенных исследований построены аппроксимирующие функции, установлена экспериментальная зависимость скорости детонации от плотности и получены расчетные зависимости ширины зоны химической реакции от скорости детонации и плотности ПЭВВ порэммит 1А. Представленные в статье корреляционные уравнения позволяют с определенной достоверностью определять скорость детонации и ширину детонационной зоны ПЭВВ порэммит 1А в зависимости от плотности. Скорость детонации ПЭВВ порэммит 1А соответствует ТУ 84–08628424–671–96 только при оптимальных значениях плотности ВВ в интервале значений от 1,2 до 1,24 г/см³. Стабильное протекание химической реакции за фронтом детонационной волны обусловлено плотностью ПЭВВ порэммит 1А от 1,18 до 1,27 г/см³ и скоростью детонации от 2700 до 4750 м/с при диаметре заряда $\varnothing 100$ мм, при этом ширина детонационной зоны составляет от 14 до 25 мм. Определение ширины зоны химической реакции открывает возможность установления ряда параметров, позволяющих отслеживать влияние входящих в состав ПЭВВ компонентов на эффективность взрыва в известных условиях. В этом состоит инновационная направленность изучения детонационных характеристик эмульсионных ВВ в рамках темы №0405–2019–0005 государственного задания №075–00581–19–00.

Ключевые слова: детонационная волна, ширина зоны химической реакции, скорость детонации, плотность ВВ, время протекания химической реакции, детонационные характеристики, порэммит 1А, промышленное эмульсионное взрывчатое вещество (ПЭВВ).

Благодарность: Исследования выполнены в рамках Государственного задания №075–00581–19–00, темы № 0405–2019–0005 (2019–2021 гг.). Авторы выражают особую благодарность руководству и работникам ПАО «Ураласбест» за поддержку и содействие в проведении исследований.

Для цитирования: Меньшиков П. В., Жариков С. Н., Кутуев В. А. Определение ширины зоны химической реакции промышленного эмульсионного взрывчатого вещества порэмит 1А на основе принципа неопределенности в квантовой механике // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 5–2. — С. 121–134. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_52_0_121.

Determination of chemical reaction zone width for emulsion explosive Poremit 1A based on uncertainty principle of quantum mechanics

P. V. Menshikov¹, S. N. Zharikov¹, V. A. Kutuev¹

¹ Institute of Mining Ural branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

Abstract: The article presents the results of the long-term studies into detonation characteristics of commercial emulsion explosive Poremit 1A at the Rock Failure Laboratory of the Institute of Mining, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. In 2004 to 2020, the instrumental measurements of Poremit 1A detonation rates were carried out in the conditions of a test site, with a barrel charge diameter of 100 mm. The mass velocity of outflow of explosion products and the sound speed in detonation products are calculated according to the hydrodynamic theory of detonation. Based on the phenomenological approach to detonation processes in explosives by Lin's uncertainty principle in quantum mechanics, the detonation wave parameters are calculated: the time and width of the chemical reaction zone for explosive Poremit 1A. As a result of the implemented research, the approximating functions are constructed, the experimental dependence of detonation velocity on the explosive density is found, and the theoretical relationships of the chemical reaction zone width, detonation velocity and density are obtained for Poremit 1A. The empirical and theoretical correlation equations presented in the article allow relatively reliable determination of detonation rate and detonation zone width for Poremit 1A versus its density. The detonation rate of explosive Poremit 1A conforms with specifications TU 84-08628424-671-96 only within the optimal density range from 1.2 to 1.24 g/cm³. The stable chemical reaction behind the detonation wave front is governed by the density of Poremit 1A from 1.18 to 1.27 g/cm³ and by its detonation velocity from 2700 to 4750 m/s at the charge diameter of 100 mm. The denotation zone width is 14 to 25 mm in this case. Determination of the chemical reaction zone width makes it possible to find parameters of influence exerted by the emulsion explosive components on blasting efficiency under known conditions. This is an innovative trend in the study of detonation characteristics of emulsion explosives in the framework of Topic No. 0405-2019-0005 under State Contract No. 075-00581-19-00.

Key words: detonation wave, chemical reaction zone width, detonation velocity, explosive density, chemical reaction time, detonation characteristics, Poremit 1A, commercial emulsion explosive.

Acknowledgements: The study was carried out under State Contract No. 075-00581-19-00, Topic No. 0405-2019-0005 (2019–2021). The authors express special thanks to the management and personnel of Uralasbest Production Association for the backup and help in implementation of the research.

For citation: Menshikov P. V., Zharikov S. N., Kutuev V. A. Determination of chemical reaction zone width for emulsion explosive Poremit 1A based on uncertainty principle of quantum mechanics. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(5–2):121–134. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_52_0_121.

Введение

Согласно гидродинамической теории, детонацией считается стабиль-

ный, в некоторых рамках предсказуемый процесс перемещения по ВВ зоны химического превращения, ведомой

фронтом ударной волны с постоянной амплитудой, распространяющийся со сверхзвуковой скоростью и сопровождающийся химическим превращением веществ. Амплитуда и скорость перемещения ударной волны постоянны, так как диссипативные потери, сопровождающие ударное сжатие вещества, компенсируются теплотой реакции превращения ВВ. В этом одно из главных отличий волны детонации от ударной волны, распространение которой в химически неактивных материалах сопровождается спадом скорости и параметров волны (затуханием). При сжатии на фронте ударной волны происходит скачкообразное изменение состояния вещества — давления, плотности, температуры. Параметры состояния волны могут быть выведены из законов сохранения массы, количества движения и энергии в детонационной волне, уравнения состояния для продуктов детонации (ПД) в точке Жуге (или плоскости Чепмена — Жуге) [1]. В модели Чепмена — Жуге не рассматриваются закономерности протекания химической реакции в детонационной волне, в ней ударный фронт представляется в виде поверхности разрыва, отделяющей от газообразных продуктов взрыва исходное ВВ. В работах Зельдовича Я. Б., Неймана Д. и Деринга В. [2 — 4] была предложена модель детонационной волны, в которой учитывалась физическая зона превращения исходного ВВ в газообразные продукты его химического превращения, в соответствии с которой детонационный фронт распространяется вдоль заряда ВВ, и только после его нагрева через определенное время возникает химическая реакция, в результате которой выделяется тепло, приводящее к расширению продуктов химического превращения. В результате зона химической реакции

идет за фронтом ударной волны и обеспечивает устойчивость детонации.

Определение ширины зоны химической реакции детонационной волны для любого типа ВВ необходимо не только для определения устойчивости детонации и понимания времени протекания химической реакции, но и для дальнейшего расчета критического диаметра заряда ВВ, при котором происходит затухание процесса детонации.

Скорость детонации определяется плотностью, характеристиками заряда, химическим составом ВВ и условиями взрыва. Она условно постоянна, и ее значение является максимально возможным при одинаковых условиях взрыва, поэтому является одной из главных характеристик ВВ [1 — 6].

Теория вопроса

В настоящее время существует гидродинамическая теория детонации, математический аппарат которой подходит для описания процессов при детонации индивидуальных ВВ. Опыт применения смесевых и эмульсионных ВВ показал, что при детонации возникает ряд закономерностей, не укладывающихся в теорию для индивидуальных ВВ. В этом направлении следует отметить работы [7 — 9]. В целом на сегодняшний момент есть ряд неопределенностей, решение которых возможно в ближайшем будущем. При этом, хоть детонация ЭВВ и имеет существенные отличия по сравнению с индивидуальными ВВ, однако авторами статьи считается, что классическую гидродинамическую теорию детонации следует все же учитывать при поиске решений, т. к. пока строго не сформирована соответствующая теория для смесевых и эмульсионных ВВ.

В общем виде скорость детонации ВВ определяется соотношением, представленным Е. Жуге [6]:

$$D = U + C, \text{ м/с}, \quad (1)$$

где U — массовая скорость истечения газообразных продуктов взрыва, м/с; C — скорость звука в продуктах детонации, м/с.

Массовая скорость движения продуктов взрыва за фронтом детонации определяется из выражения:

$$U = D/n + 1, \text{ м/с}, \quad (2)$$

где n — показатель изоэнтропы. Для большинства промышленных ВВ: $n = 3$, откуда $U \approx D/4$. Тогда $C = 0,75 \cdot D$.

Ширина зоны химической реакции a определяется по следующей формуле:

$$a = C\tau, \text{ мм}, \quad (3)$$

где τ — время протекания химической реакции, с.

В работах [10, 11] описан подход к возможности определения ширины зоны химической реакции, при котором зона протекания релаксационных процессов в детонационной зоне рассматривается как возбужденная квантовая система в когерентном (сжатом) состоянии. Это позволяет решать сразу две задачи, определять как ширину зоны химической реакции детонационной волны, так и критический диаметр заряда ВВ. Авторы статьи считают, что нужно сделать следующую оговорку. Исключение кинематики детонационной волны все же возможно, но этот вопрос не простой и безусловно требует отдельного изучения. Вообще все, что касается теоретического описания взрывных процессов не может трактоваться однозначно, как бы ни казалось это очевидным на первый взгляд.

Согласно [10, 11] по принципу неопределенности в квантовой механике, если зону протекания химической реакции при детонации рассмотреть как зону возбуждения квантовой системы в когерентном

состоянии, можно вычислить ширину зоны химической реакции, не связанную с кинематическими параметрами детонационной волны. В соответствии с кинетикой колебательно инициируемых реакций, время протекания химической реакции можно определить по формуле [10–14]:

$$\tau = \tau_0 \cdot [\exp(3n - 6)], \text{ с}, \quad (4)$$

где $\tau_0 = [2\pi\hbar / k_B T_{\text{взр}}] \cdot 10^2$ с; \hbar — постоянная Планка, $\hbar = 1,054 \cdot 10^{-34}$ Дж·с; k_B — постоянная Больцмана, $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/°К; $T_{\text{взр}}$ — температура взрыва, °К; n — число атомов в нелинейной многоатомной молекуле. ЭВВ являются многокомпонентными и состоят из аммиачной селитры, эмульгатора, индустриального масла, газогенерирующей добавки (ГГД) и водного раствора аммиачной селитры. Массовая доля компонента эмульсии ЭВВ порэммит 1А составляет 99 %. Для грубой оценки возможно принять $n = 7$ при взрывном разложении NH_4NO_3 при температуре взрыва > 1000 °К.

Механизм детонации ЭВВ наиболее вероятен с прохождением по заряду волны сжатия, которая вызывает сжатие пузырьков ГГД и втекания в них жидкой фазы, тем не менее, возникновение дальнейшего скачка уплотнения, по мнению авторов статьи, все же зависит от параметров зоны химической реакции, т. к. кроме детонационных характеристик на устойчивость фронта детонационной волны и время протекания детонации существенное влияние оказывает дисперсность компонентов ВВ.

Основные характеристики исследуемого ВВ

Изготовленное ПЭВВ порэммит 1А должно соответствовать требованиям ТУ 84–08628424–671–96 [15], указанным в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Контролируемые показатели при приемке ПЭВВ порэмита 1А [15]**Control parameters in commissioning of emulsion explosive Poremit 1A [15]**

№ 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 за 4 часа или за 24 часа	0,05 0,15

Таблица 2

Характеристики ПЭВВ порэмита 1А [15]**Characteristics of emulsion explosive Poremit 1A [15]**

№ п/п	Наименование характеристики	Значение
Неконтролируемые показатели при приемке		
Расчетные		
1.	Теплота взрыва, МДж/кг (ккал/кг)	2,96 (723)
2.	Удельный объем газообразных продуктов взрыва, л/кг	1010
3.	Кислородный баланс, %	Минус 6,2
4.	Тротиловый 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)
Экспериментальные		
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 60×3 (ГОСТ 8732 – 78), км/с	4,8 – 5,2
3.	Плотность заряжения 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

Окончание табл. 2

№ п/п	Наименование характеристики	Значение
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 частота взрывов, %	500 0
7.	Чувствительность к трению на приборе К-44 – 3: нижний предел, МПа (кгс/см ²) частота 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)

Результаты исследования

За многолетний период (2004 – 2020 гг.) сотрудниками Лаборатории разрушения горных пород ИГД УрО РАН набраны экспериментальные данные измерений детонационных характеристик промышленного эмульсионного взрывчатого вещества (ПЭВВ) порэммит 1А [16, 17]. Измерения скорости детонации проводились непрерывным

(резистивным) методом [18 – 21] в соответствии с методиками ИГД УрО РАН [22, 23] с использованием аппаратуры: DATA TRAP II DATA/VOD Recorder (“MREL Group of Companies Limited”, Канада) и VODMate (“InstanTel”, Канада) в полигонных условиях. Экспериментальные данные и расчетные детонационные характеристики ПЭВВ порэммит 1А представлены в табл. 3.

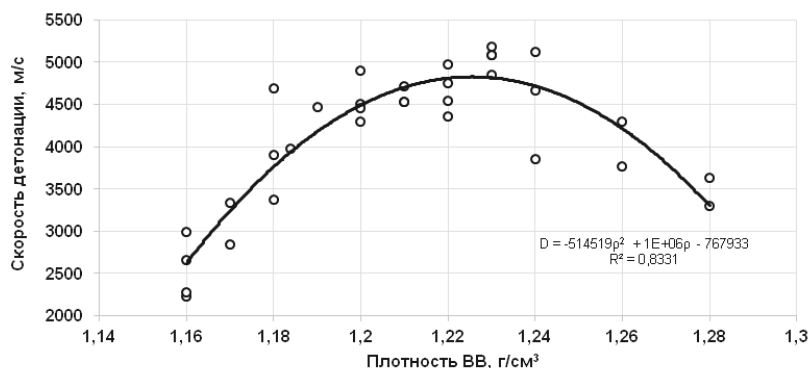


Рис. 1. Экспериментальная зависимость скорости детонации от плотности ПЭВВ порэммит 1А при диаметре гильзового заряда $\varnothing 100$ мм

Fig. 1. Experimental detonation velocity–density curve for emulsion explosive Poremit 1A emulsion explosive Poremit 1A

Таблица 3

Исходные параметры зарядов и детонационные характеристики ПЭВВ порэмит 1А
 Initial charge parameters and detonation characteristics of emulsion explosive Poremit 1A

Год проведения замеров	№ подрыва	Диаметр заряда, d , мм	Длина заряда, l , м	Плотность ВВ, ρ , г/см ³	Масса заряда ВВ, Q , кг	Скорость детонации, D , м/с	Массовая скорость истечения продуктов взрыва, U , м/с	Скорость звука в продуктах взрыва, C_1 , м/с.	Время протекания химической реакции, t , мкс	Ширина зоны химической реакции, a , мм
2004	1	100	1,15	1,26	11,4	4302	1076	3227	5,36	17,28
	2		1,1		10,9	3763	941	2822	7,00	19,76
	3		0,9	1,18	8,3	4692	1173	3519	3,74	13,15
	4		1,15	1,28	11,6	3294	824	2471	9,63	23,79
	5		1	10,0	3625	906	2719	7,95	21,62	
2015	1		1,16	9,1	2990	748	2243	8,83	19,79	
	2	1,17	9,2	3329	832	2497	7,27	18,15		
	3	1,16	9,1	2658	665	1994	11,17	22,26		
	4			2230	558	1673	15,87	26,54		
	5	1,18	9,3	3369	842	2527	7,25	18,31		
	6	1,16	9,1	2275	569	1706	15,24	26,01		
	7	1,17	9,2	2844	711	2133	9,96	21,24		
	8	1,18	9,3	3896	974	2922	5,42	15,83		
	9	1,22	9,6	4363	1091	3272	4,72	15,45		
	10			4546	1137	3410	4,35	14,83		
	11	1,23	9,7	5177	1294	3883	3,43	13,33		
	12			5080	1270	3810	3,57	13,59		
	13			4852	1213	3639	3,91	14,23		
	14	1,2	9,4	4503	1126	3377	4,24	14,31		
	15	1,22	9,6	4748	1187	3561	3,99	14,20		
	16	1,21	9,5	4536	1134	3402	4,27	14,53		
	17	1,2	9,4	4456	1114	3342	4,33	14,46		
	18	1,23	9,7	5079	1270	3809	3,57	13,59		
	19	1,2	9,4	4901	1225	3676	3,58	13,15		
	20	1,22	9,6	4979	1245	3734	3,63	13,54		
	21	1,24	9,7	4660	1165	3495	4,34	15,17		
	22	1,19	9,3	4464	1116	3348	4,22	14,12		
	23	1,21	9,5	4530	1133	3398	4,28	14,55		
	24			4709	1177	3532	3,96	13,99		
	25	1,24	9,7	5120	1280	3840	3,60	13,81		
2020	1				3847	962	2885	6,37	18,38	
	2	1,18	9,3	3977	994	2983	5,25	15,64		
	3	1,20	9,4	4294	1074	3221	4,66	15,00		

На основании данных табл. 1 построен график зависимости «скорость детонации – плотность ВВ» (рис. 1).

Из графика (рис. 1) видно, что скорость детонации заряда ВВ порэммит 1А в некотором интервале соответствует ТУ 84–08628424–671–96 [15], при этом только в рамках оптимальных значений плотности ВВ в интервале $\rho = 1,2 \div 1,24 \text{ г/см}^3$ (выделено на рис. 1 пунктирной линией). Также стоит отметить, что с увеличением плотности заряда ВВ в интервале значений $\rho = 1,25 \div 1,28 \text{ г/см}^3$ и при снижении $\rho = 1,19 \div 1,16 \text{ г/см}^3$ наблюдается падение скорости детонации до минимальных значений – $D < 3000 \div 3500 \text{ м/с}$. При таких низких скоростях время протекания химической реакции снижается втрое, соответственно, в 2 раза увеличивается ширина зоны химической реакции (рис. 2). Это говорит о снижении энергетики взрыва конкретного заряда ВВ, а значит, и о плохой работе взрыва при производстве взрывных работ в условиях карьера, следствием чего может являться непроработка подошвы уступа и большой выход негабарита.

На основании расчетных данных построена зависимость зоны химической реакции от плотности (рис. 3), из которой видно, что ширина зоны химической реакции до оптимального значения плотности ВВ порэммит 1А убывает, а затем монотонно растет при увеличении плотности. Это указывает на то, что при малых плотностях (менее $1,18 \text{ г/см}^3$), когда ВВ не успевает газифицироваться полностью, в связи с недостаточным распределением пузырьков газа во всей колонке заряда, а также при неравномерной плотности заряжения ВВ, детонация будет нестабильной, и ширина зоны химической реакции, идущей за фронтом ударной волны в момент взрыва

будет иметь большие значения (более 17 мм). Похожая ситуация может возникнуть при переуплотнении заряда ВВ, когда не все «горячие точки» успевают вовлечься в процесс детонации, а также в случае большего содержания в составе ВВ некоторых добавок (более 10–12 %), контролирующих рН водного раствора, таких как сульфаминовая кислота, или снижающих чувствительность к тепловому воздействию, температуру взрыва и скорость детонации заряда ВВ (пламегасителей), ведущих к снижению устойчивости и качества ВВ, при больших плотностях (более $1,26 \text{ г/см}^3$).

Наилучшие детонационные свойства достигаются при обеспечении равномерной плотности заряжения ВВ с полной газификацией по всей колонке заряда ВВ ($\rho = 1,18 \div 1,26 \text{ г/см}^3$), при этом ширина зоны химической реакции составляет менее 17 мм и в основном лежит в диапазоне $a = 13 \div 17 \text{ мм}$. Соответственно, если придерживаться расчета критического диаметра заряда ВВ по Харитону Ю. Б. [6, 24], то он составляет от 26 до 34 мм.

Стабильное протекание химической реакции за фронтом детонационной волны обусловлено плотностью ПЭВВ порэммит 1А от $1,18$ до $1,27 \text{ г/см}^3$ и скоростью детонации от 3500 до 4750 м/с , при этом ширина детонационной зоны составляет от 13 до 25 мм . Это является условием для устойчивой детонации для ПЭВВ порэммит 1А при диаметре заряда $\varnothing 100 \text{ мм}$. При этом оптимальная плотность для достижения устойчивой детонации соответствует плотности $\rho = 1,15 \div 1,28 \text{ г/см}^3$, указанной в ТУ [15]. Скорость детонации заряда ПЭВВ порэммит 1А соответствует нижнему пределу скорости детонации 4800 м/с , согласно [15], но следует учитывать, что в ТУ [15] указаны величины скорости детонации в стальной трубе диаметра

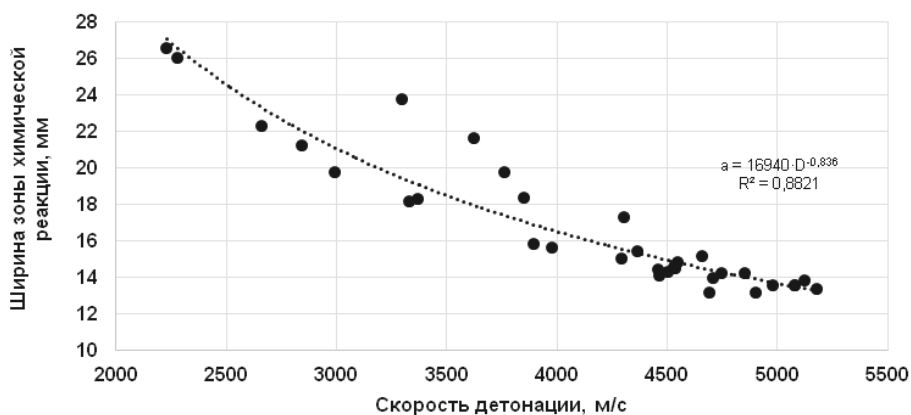


Рис. 2. Расчетная зависимость ширины зоны химической реакции от скорости детонации ПЭВВ порэмит 1А при диаметре гильзового заряда $\varnothing 100$ мм (ширина зоны химической реакции рассчитывалась по формуле (3))

Fig. 2. Calculated chemical reaction zone width versus detonation velocity for emulsion explosive Poremit 1A (from formula (3))

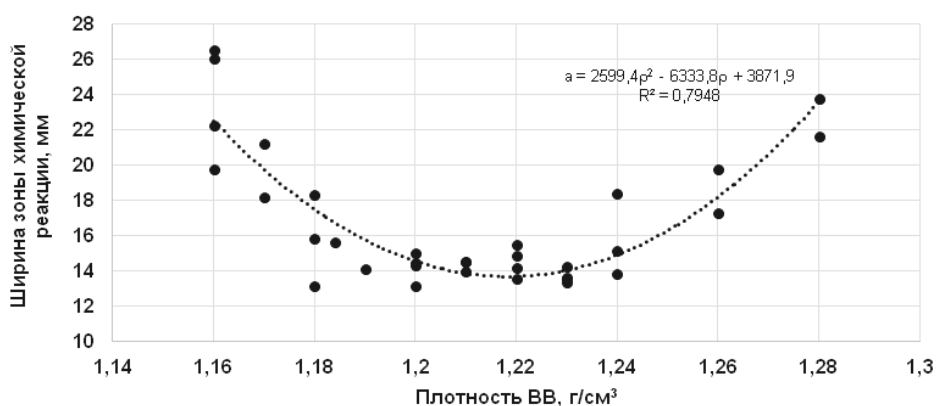


Рис. 3. Расчетная зависимость ширины зоны химической реакции от плотности ЭВВ порэмит 1А при диаметре гильзового заряда $\varnothing 100$ мм (ширина зоны химической реакции рассчитывалась по формуле (3))

Fig. 3. Calculated dependence of the width of the chemical reaction zone on the density of the EVV poremit 1A at the diameter of the sleeve charge $\varnothing 100$ mm (the width of the chemical reaction zone was calculated using the formula (3))

тром $\varnothing 60$ мм. Оболочка, окружающая зарядную полость, также существенно влияет на скорость детонации, т. к. в полигонных условиях измерения проводились в картонных гильзах, продукты детонации легко сжимают эту оболочку, и их энергия быстро убывает. Меняется зона первичной реак-

ции, фронт ударной волны и, в итоге, величина скорости детонации. Вероятно, поэтому в картонных гильзах $\varnothing 100$ мм скорость детонации меньше, чем в стальных трубах при диаметре $\varnothing 60$ мм.

При максимальной скорости детонации ПЭВВ порэмит 1А от 4800

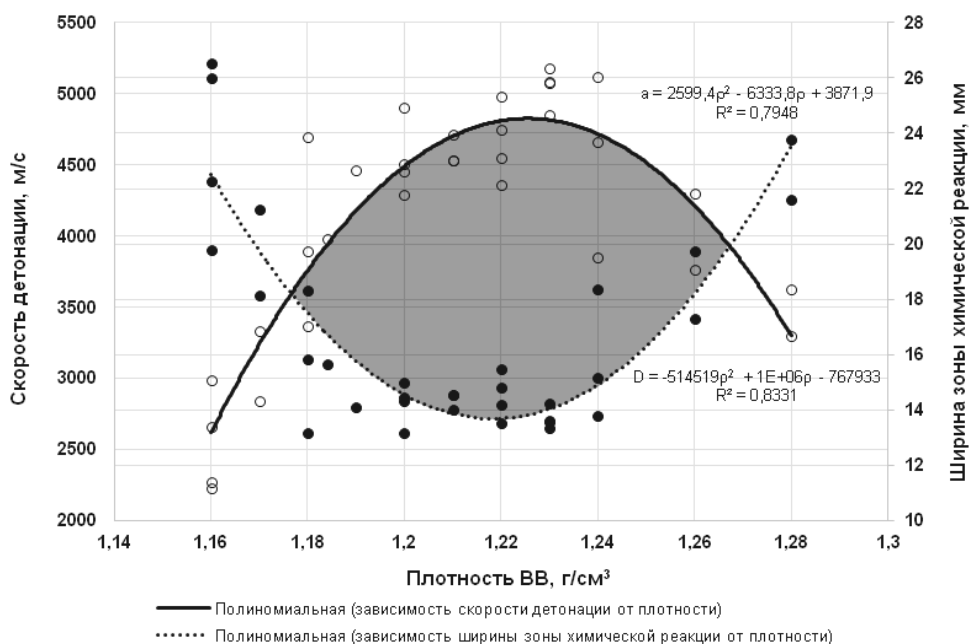


Рис. 4. Зависимость скорости детонации и ширины зоны химической реакции от плотности ЭВВ порэмит 1А при диаметре гильзового заряда $\varnothing 100$ мм
 Fig. 4. Dependence of the detonation rate and the width of the chemical reaction zone on the density of the EVV poromit 1A at the diameter of the sleeve charge $\varnothing 100$ mm

до 5200 м/с ширина зоны химической реакции может составлять менее 13 мм. При плотности менее 1,18 г/см³ и более 1,27 г/см³ скорость детонации падает ниже 3500 м/с, а ширина детонационной зоны составляет более 20 мм.

В результате установленной экспериментальной зависимости скорости детонации от плотности и расчетных зависимостей ширины зоны химической реакции от скорости детонации и плотности ПЭВВ порэмит 1А (рис. 4) получены корреляционные уравнения, позволяющие с определенной достоверностью определять ширину детонационной зоны и скорость детонации ПЭВВ порэмит 1А в зависимости от плотности:

$$a = 2599,4\rho^2 - 6333,8\rho + 3871,9, \text{ мм} \quad (5)$$

$(R^2 = 0,7948; R = 0,8915),$

$$D = -514519\rho^2 + 1E + 06\rho - 767933, \text{ м/с} \quad (6)$$

$(R^2 = 0,8331; R = 0,9127)$

Заключение

1. По результатам проведенных инструментальных замеров скорости детонации ПЭВВ порэмит 1А с 2004 по 2020 гг. в полигонных условиях при диаметре гильзовых зарядов $\varnothing 100$ мм установлена экспериментальная зависимость скорости детонации от плотности и расчетные зависимости ширины зоны химической реакции от скорости детонации и плотности ПЭВВ порэмит 1А. Полученные корреляционные уравнения позволяют с определенной достоверностью определять скорость детонации и ширину детонационной зоны ЭВВ порэмит 1А в зависимости от известной плотности.

2. Параметры детонационной волны, такие, как время и ширина зоны химической реакции, для ПЭВВ порэмит 1А рассчитаны на основе

феноменологического подхода к рассмотрению детонационных процессов в ВВ по принципу неопределенности в квантовой механике, предложенному Лин Э. Э. [10, 11], они находятся в диапазонах $\tau = 3 - 16$ мкс и $a = 13 - 27$ мм. Это позволяет решать сразу две задачи: определять как ширину зоны химической реакции детонационной волны, так и критический диаметр заряда для любого типа ВВ. Критический диаметр заряда ВВ возможно определить

в дальнейшем из соотношения Харитона или уравнения Эйринга.

3. Стабильное протекание химической реакции за фронтом детонационной волны обусловлено плотностью ПЭВВ порэммит 1А от 1,18 до 1,27 г/см³ и скоростью детонации от 2700 до 4750 м/с, при этом ширина детонационной зоны составляет от 14 до 25 мм. Это является условием для устойчивой детонации для ПЭВВ порэммит 1А при диаметре заряда $\varnothing 100$ мм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юханссон А. К., Персон П. Детонация взрывчатых веществ / Под ред. В. К. Бобылева ; пер. с англ. — М.: Мир, 1973. — 352 с.
2. Зельдович Я. Б. К теории распространения детонации в газообразных системах // Журнал экспериментальной и теоретической физики. □ 1940. □ Т. 10. — № 5. — С. 542—568.
3. Neumann J. Theory of detonation waves // Office of Scientific Research and Development Rept. 1942. No 549.
4. Doring W., Burkhard G. Contribution to the theory of detonation // Tech. Rept. Wright-Patterson Air Force Base, Dayton, 1949.
5. Бондаренко И. Ф., Жариков С. Н., Зырянов И. В., Шеменев В. Г. Буровзрывные работы на кимберлитовых карьерах Якутии. — Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2017. — 172 с.
6. Орленко Л. П. Физика взрыва и удара: учебное пособие для вузов. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. — 304 с.
7. Горинев С. А. Инициирование и детонация эмульсионных взрывчатых веществ. — Йошкар-Ола: ООО ИПФ «Стринг», 2020. — 214 с.
8. Белин В. А., Кутузов Б. Н., Ганопольский М. И. и др. Технология и безопасность взрывных работ. — М.: Издательство «Горное дело», 2016. — 424 с.
9. Белин В. А. Исследования качества взрывных работ при использовании эмульсионных взрывчатых веществ // Взрывное дело. — 2020. — №127/84. — С. 37—64.
10. Лин Э. Э. Определение ширины детонационной зоны на основе принципа неопределенности // Письма в журнал технической физики. — 2011. — Т.37. — № 10. — С. 9—12.
11. Lin E. E. Detonation zone width determination based on uncertainty principle // Technical Physics Letters. 2011, T. 37, No 5, pp. 449—450. doi.org/10.1134/S1063785011050257
12. Меньшиков П. В., Шеменев В. Г., Синицын В. А. О возможности определения ширины зоны химической реакции на примере эмульсионного взрывчатого вещества «Фортис» // Проблемы недропользования. — 2015. — № 4. — С. 77—83. DOI: 10.18454/2313—1586.2015.04.077
13. Лавров В. В. О возможности определения размеров зоны детонационной волны косвенными методами // Институт проблем химической физики РАН. — Черноголовка, 2013. — URL: http://conf.nsc.ru/explosion/ru/scientific_program (дата обращения: 01.09.2020).
14. Сильверстов В. В., Караханов С. М. Влияние плотности эмульсионного ВВ на ширину зоны реакции // Взрывное дело. — 2006. — № 96/53. — С. 189—199.

15. Эмульсионное промышленное взрывчатое вещество «Порэммит-1А». Технические условия ТУ 84–08628424–671–96. – Дзержинск: ФГУП ГосНИИ «Кристалл», 1996. – 19 с.

16. Кутуев В. А. О взаимосвязи между скоростью детонации и временем газификации на примере промышленного эмульсионного взрывчатого вещества порэммит 1А // Проблемы недропользования. – 2017. – № 2. – С. 106–111. DOI: 10.18454/2313–1586.2017.02.106

17. Матухно Н. С., Флягин А. С., Шеменев В. Г., Русских А. П., Леонтьева И. А. Особенности применения волокон хризотил-асбеста в качестве сенсбилизатора при производстве эмульсионного взрывчатого вещества // Вестник Технологического университета. – 2016. – Т. 19. – № 13. – С. 71–76.

18. Žganec S., Bohanek V., Dobrilović M. Influence of a primer on the velocity of detonation of anfo and heavy anfo blends // Central European Journal of Energetic Materials. 2016, Vol. 13, No 3, pp. 694–704. doi.org/10.22211/cejem/65017

19. Mishra, Arvind & Rout, M & Singh, Deepanshu & Jana, S. Influence of Density of Emulsion Explosives on its Velocity of Detonation and Fragmentation of Blasted Muckpile // Current Science (India). 2017, Vol. 112, No 3, pp. 602–608. doi.org/10.18520/cs/v112/i03/602–608

20. Yang S., Zhang X., Peng W., Shu J., Qin S., Zhong B. Impact Initiation Characteristics of TATB Based Insensitive Explosives Mixed with HMX by Electromagnetic Velocity Gauges // Gaoya Wuli Xuebao. 2020, Vol. 34, No 3, pp. 033403. doi.org/10.11858/gywlb.20190852

21. Pooley J., Price E., Ferguson J., Ibsen M. Detonation Velocity Measurements Using Rare-Earth Doped Fibres, 2019, Sensors, 19. 1697. doi.org/10.3390/s19071697

22. Методика измерений скорости детонации взрывчатых веществ реостатным методом с использованием измерителя скорости детонации VODMate («InstanTel», Канада): стандарт организации: СТО 01.01.004 – 2011 / ИГД УрО РАН. – Екатеринбург, 2011 – 17 с.

23. Методика измерений скорости детонации взрывчатых веществ реостатным методом, интервалов замедления между взрывами скважинных зарядов, ускорения сейсмических колебаний и давления на фронте ударной воздушной волны с использованием измерителя скорости детонации DATATRAP II DATA/VOD RECORDER: стандарт организации: СТО 01.01.001 – 2019 / ИГД УрО РАН. – Екатеринбург, 2019 – 28 с.

24. Харитон Ю. Б. Сборник научных статей. – Саров: ВНИИЭФ, 2003. – 451 с. 

REFERENCES

1. Johansson A. K., Person P. *Detonatsiya vzryvchatykh veshchestv* [Detonation of explosives], Moscow, Mir, 1973, 352 p. [In Russ]

2. Zel'dovich Ya. B., Rajzer Yu. P. *Fizika udarnykh voln i vysokotemperaturnykh gidrodinamicheskikh yavlenij* [Physics of shock waves and high-temperature hydrodynamic phenomena], Moscow, Nauka, 1966, 687 p. [In Russ]

3. Neumann J. Theory of detonation waves. Office of Scientific Research and Development: Report no. 549. 1942.

4. Doring W., Burkhard G. Contribution to the theory of detonation. Tech. Report. Wright-Patterson Air Force Base, Dayton, 1949.

5. Bondarenko I. F., Zharikov S. N., Zyryanov I. V., Shemenев V. G. *Burovzryvnyye raboty na kimberlitovykh kar'yerakh Yakutii* [Drilling and blasting operations at kimberlite quarries of Yakutia], Ekaterinburg, IME of UB of RAS, 2017, 172 p. [In Russ]

6. Orlenko L. P. *Fizika vzryva i udara: uchebnoye posobiye dlya vuzov* [Physics of explosion and blow: textbook for universities], Moscow, FIZMATLIT, 2006, 304 p. [In Russ]
7. Gorinov S. A. *Iniciirovanie i detonacija jemul'sionnyh vzryvchatyh veshhestv* [Initiation and detonation of emulsion explosives], Yoshkar-Ola, LLC PPC "String", 2020, 214 p. [In Russ]
8. Belin V. A., Kutuzov B. N., Ganopol'skij M. I. et al. *Tehnologija i bezopasnost' vzryvnyh robot* [Technology and safety of blasting operations], Moscow, "Gornoe delo", 2016, 424 p. [In Russ]
9. Belin V. A. Studies of the quality of blasting operations with the use of emulsion explosives. *Vzryvnoye delo*, 2020, no. 127/84, pp. 37–64. [In Russ]
10. Lin E. E. Detonation zone width determination based on uncertainty principle. *Pis'ma v zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, 2011, Vol. 37, no. 10, C. 9–12. [In Russ]
11. Lin E. E. Detonation zone width determination based on uncertainty principle. *Technical Physics Letters*, 2011, Vol. 37, no. 5, pp. 449–450. doi.org/10.1134/S1063785011050257
12. Menshikov P. V., Shemenev V. G., Sinitsyn V. A. On the possibility of determining the width of the chemical reaction zone on the example of the emulsion explosive "Fortis". *Problemy nedropol'zovaniya*, 2015, no. 4, pp. 77–83. doi.org/10.18454/2313–1586.2015.04.077 [In Russ]
13. Lavrov V. V. *O vozmozhnosti opredeleniya razmerov zony detonacionnoj volny kosvennymi metodami* [On the possibility of determining the size of the detonation wave zone by indirect methods] Institute of Problems of Chemical Physics RAS, available at: http://conf.nsc.ru/explosion/ru/scientific_program (accessed 09.01.2020).
14. Silverstov V. V., Karakhanov S. M. Influence of the density of emulsion explosive on the width of the reaction zone. *Vzryvnoye delo*, 2006, no. 96/53, pp. 189–199. [In Russ]
15. Emulsion industrial explosive "Poremit-1A". Technical conditions TU 84-08628424-671–96, Dzerzhinsk, JSC "GosNII "Kristall", 1996, 19 p. [In Russ]
16. Kutuev V. A. On the relationship between detonation velocity and gasification time on the example of an industrial emulsion explosive poremit 1A. *Problemy nedropol'zovaniya*. 2017, no. 2, p. 106–111. doi.org/10.18454 / 2313–1586.2017.02.106. [In Russ]
17. Matukhno N. S., Flyagin A. S., Shemenev V. G., Russkikh A. P., Leontyeva I. A. Features of the use of chrysotile asbestos fibers as a sensitizer in the production of emulsion explosive. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta*. 2016, Vol. 19, no. 13, pp. 71–76. [In Russ]
18. Žganec S., Bohanek V., Dobrilović M. Influence of a primer on the velocity of detonation of anfo and heavy anfo blends. *Central European Journal of Energetic Materials*, 2016, Vol. 13, no. 3, pp. 694–704. doi.org/10.22211/cejem/65017.
19. Mishra, Arvind & Rout, M & Singh, Deepanshu & Jana, S. Influence of Density of Emulsion Explosives on its Velocity of Detonation and Fragmentation of Blasted Muckpile. *Current Science (India)*, 2017, Vol. 112, no. 3, pp. 602–608. doi.org/10.18520/cs/v112/i03/602–608
20. Yang S., Zhang X., Peng W., Shu J., Qin S., Zhong B. Impact Initiation Characteristics of TATB Based Insensitive Explosives Mixed with HMX by Electromagnetic Velocity Gauges. *GaoyaWuliXuebao*, 2020, Vol. 34, no. 3, pp. 033403. doi.org/10.11858/gywlyxb.20190852.
21. Pooley J., Price E., Ferguson J., Ibsen M. Detonation Velocity Measurements Using Rare-Earth Doped Fibres, 2019, *Sensors*, 19. 1697. doi.org/10.3390/s19071697.
22. Technique for measuring the velocity of detonation of explosives by the rheostat method using a detonation velocity meter VODMate (Instantel, Canada). Organization standard: STO 01.01.004 2011. IME of UB of RAS, Ekaterinburg, 2011, 17 p. [In Russ]

23. Methods for measuring the detonation velocity of explosives by the rheostat method, deceleration intervals between explosions of borehole charges, acceleration of seismic vibrations and pressure at the front of an air shock wave using a detonation velocity meter DATATRAP II DATA / VOD RECORDER. Organization standard: STO 01.01.001 – 2019. IME of UB of RAS, Ekaterinburg, 2019, 28 p. [In Russ]

24. Khariton Yu. B. *Sbornik nauchnykh statey* [Collection of scientific articles]. Sarov, VNIIEF, 2003, 451 p. [In Russ]

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Меньшиков Павел Владимирович*¹ – научный сотрудник, e-mail: menshikovpv@mail.ru;
*Жариков Сергей Николаевич*¹ – канд. техн. наук, зав. лабораторией, ведущий научный сотрудник, e-mail: 333vista@mail.ru;

*Кутуев Вячеслав Александрович*¹ – научный сотрудник, e-mail: slavik1988@mail.ru;
¹ Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук (ИГД УрО РАН), Екатеринбург, Россия.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Menshikov P. V.*¹, Researcher, e-mail: menshikovpv@mail.ru;
*Zharikov S. N.*¹, Cand. Sci. (Eng.), head of the laboratory, leading researcher, e-mail: 333vista@mail.ru;

*Kutuev V. A.*¹, Researcher, e-mail: slavik1988@mail.ru;
¹ Institute of Mining of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia.

Получена редакцией 21.12.2020; получена после рецензии 02.04.2021; принята к печати 10.04.2021.
Received by the editors 21.12.2020; received after the review 02.04.2021; accepted for printing 10.04.2021.

