

УДК 622.235.213

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕТОНАЦИОННОГО ДАВЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ ВЗРЫВА ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭМУЛЬСИОННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ НА КАРЬЕРАХ УРАЛА

Меньшиков П.В., Синицын В.А., Шеменев В.Г.

ФГБУН «Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук», Екатеринбург, e-mail: menshikovpv@mail.ru

Приведены результаты инструментальных замеров скорости детонации эмульсионных взрывчатых веществ «Нитронит», «Порэммит-1А» и «Фортис», применяемых на карьерах Урала при разной плотности и диаметрах зарядов. Замеры скорости детонации были проведены реостатным методом с использованием измерителей скорости детонации VODMate и DataTrap II Data/VOD Recorder и рефлектометрическим методом с использованием прибора SpeedVOD. Описаны методы экспериментального определения детонационного давления и температуры взрыва. Показана возможность определения температуры взрыва эмульсионных взрывчатых веществ по молярной теплоемкости газов и исходя из давления в точке Чепмена – Жуге и объединённых законов Бойля – Мариотта и Гей-Люссака с поправкой Ван-дер-Ваальса. Проведен расчет детонационного давления и температуры взрыва эмульсионных взрывчатых веществ «Нитронит», «Порэммит-1А» и «Фортис». Представлены графики изменения детонационного давления и температуры взрыва от скорости детонации промышленных эмульсионных взрывчатых веществ.

Ключевые слова: эмульсионные взрывчатые вещества, взрывные скважины, скорость детонации, плотность взрывчатых веществ, диаметр заряда, детонационное давление, температура взрыва, теплота взрыва, молярная теплоемкость газов

DETERMINATION OF DETONATION PRESSURE AND EXPLOSION TEMPERATURE OF INDUSTRIAL EMULSION EXPLOSIVES USED AT URAL QUARRIES

Menshikov P.V., Sinitsyn V.A., Shemenev V.G.

Institute of Mining Engineering of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, e-mail: menshikovpv@mail.ru

The results of instrumental measurements of velocity of detonation of emulsion explosives «Nitronit», «Poremit-1A» and «Fortis», used in the quarries of Ural with different densities and diameters charges. Measurement of detonation velocity were carried out a rheostat method by using of detonation velocity VODMate and DataTrap II Data / VOD Recorder, and reflectometry method using SpeedVOD device. Methods of experimental determination of detonation pressure and temperature explosion. The possibility of determining the temperature of the explosion of emulsion explosives for the molar specific heat of gases and on the basis of the pressure at the Chapman-Jouguet and united laws of Boyle's law and Gay-Lussac, adjusting the van der Waals forces. The calculation of detonation pressure and temperature of the explosion of emulsion explosives «Nitronit», «Poremit-1A» and «Fortis». The graphs of the change in the detonation pressure and temperature of explosion on the detonation velocity of industrial emulsion explosives.

Keywords: emulsion explosives, blastholes, detonation velocity, density explosives, charge diameter, detonation pressure, the temperature of the explosion, the heat of the explosion, molar heat capacity of gases

В настоящее время разработаны, испытаны и применяются на ряде горных предприятий технологии изготовления многокомпонентных взрывчатых смесей на основе гранулированной аммиачной селитры, раствора окислителя и горючего. Такие смеси состоят из жидких, гранулированных, порошкообразных компонентов и других добавок, стабилизирующих, газифицирующих или придающих другие требуемые свойства приготавливаемому ВВ. На сегодняшний день широкое применение на горных предприятиях получили эмульсионные взрывчатые вещества (ЭВВ), основу которых составляют обратные эмульсии типа «вода в масле» и специальные добавки для сенсбилизации.

В настоящее время определение температуры взрыва возможно с помощью оптических цветовых методов или с использованием сгораемых термодар, а определение детонационного давления – с использованием магнитоэлектрического метода измерения скорости вещества, лазерных доплеровских интерферометрических измерителей скорости, методов, основанных на регистрации затухания ударной волны, возбуждаемой в эталонной преграде детонацией исследуемого ВВ, а также с помощью сгораемых калиброванных PVDF манометров, карбоновых резисторов, турмалиновых или манганиновых датчиков [10, 12].

Определить температуру взрыва экспериментальным путём весьма сложно

вследствие кратковременности процесса и большого давления взрыва. Наиболее точен оптический цветовой метод, основанный на определении энергии по сплошному непрерывному спектру, характерному для детонации, или на определении отношения значений яркости при двух длинах волн – метод «красно-синего сравнения» [11]. Как отмечено в статье [3], измерение температуры детонации конденсированных ВВ оптическими методами не имеет общепризнанного решения. Это связано с дополнительными эффектами свечения на границе между ВВ и оптически прозрачной средой.

В связи с высокой стоимостью датчиков и данных методов исследования определение детонационного давления и температуры взрыва с помощью экспериментальных методов представляется сложной задачей, но получение этих характеристик ВВ возможно теоретически.

Цель исследования

Определение основных детонационных характеристик взрывчатых веществ (ВВ), таких как плотность и скорость детонации, необходимо на соответствие стандартам контроля качества, устанавливаемым производителем. Определение детонационно-

го давления и температуры взрыва, а также других характеристик промышленных ВВ имеет как теоретический, так и практический научный интерес при решении различных инженерных задач взрывного дела: определения теплоты взрыва, молярной теплоемкости газов, объема продуктов взрыва, времени и ширины зоны химической реакции, а также для анализа и регулирования термодинамических характеристик массовых взрывов при взрывании ВВ разных составов для оптимизации параметров буровзрывных работ и повышения качества дробления горной массы.

Материалы и методы исследования

С 2004 по 2016 г. в технологических скважинах на взрываемых блоках и в вертикальных гильзах при полигонных испытаниях были проведены инструментальные замеры скорости детонации ЭВВ «Нитронит», «Порэммит-1А» и «Фортис» (рис. 1) при разной плотности и диаметрах зарядов ЭВВ.

Замеры скорости детонации проводились реостатным методом с использованием измерителей скорости детонации VODMate и DataTrap II Data/VOD Recorder и рефлектометрическим методом с использованием прибора SpeedVOD.



Рис. 1. Исследуемые эмульсионные взрывчатые вещества, применяемые на карьерах Урала

Таблица 1

Диапазоны изменения скорости детонации ЭВВ «Фортис», «Нитронит» и «Порэммит-1А» при разной плотности и диаметрах зарядов

Тип ЭВВ	Плотность ЭВВ, т/м ³	Диаметр заряда ЭВВ, мм	Скорость детонации, м/с
ФОРТИС 70	1,05–1,25	171–250	4281–5686
ФОРТИС 85	1,14–1,15	150–250	3868–5606
ФОРТИС 100	1,1–1,17	171–250	4770–5518
НИТРОНИТ Э-70	1,11–1,319	50–300	2474–5476
НИТРОНИТ Э-100	1,205–1,3	90–270	2718–5316
ПОРЭМИТ 1-А	1,11–1,305	95–244,5	2275–5992

Зарегистрированные значения скорости детонации ЭВВ при разной плотности и диаметрах зарядов представлены в табл. 1. Так как экспериментальные значения скорости детонации ЭВВ были получены при большом количестве инструментальных замеров (более 250), в табл. 1 сведены диапазоны изменения скорости детонации при разных диаметрах зарядов ВВ и плотности. Согласно руководству и методикам измерения скорости детонации [4, 5, 12] значения показателей точности измерений составляют 5, 3 и 7% для измерителей скорости детонации VODMate, DataTrap II и SpeedVOD соответственно.

Детонационное давление большинства промышленных ВВ изменяется в пределах 5–26 ГПа, а температура взрыва от 2000 до 4500 °К.

На основании измеренных значений скорости детонации можно произвести расчет детонационного давления в точке Чепмена – Жуге и температуры взрыва.

Детонационное давление в точке Чепмена – Жуге определяется по следующей формуле:

$$P_{ч-ж} = \rho DU, \text{ (Па)}, \quad (1)$$

где ρ – плотность ЭВВ «Фортис», «Нитронит» и «Порэммит-1А», определена во время проведения инструментальных замеров скорости детонации в технологических скважинах на взрываемых блоках и на полигонах испытаний ВВ и ВМ, т/м³;

D – измеренная скорость детонации ЭВВ «Фортис», «Нитронит» и «Порэммит-1А» в технологических скважинах и в вертикальных гильзах, м/с;

U – массовая скорость истечения продуктов взрыва, м/с.

В общем виде скорость детонации ВВ определяется соотношением, постулированным Е. Жуге:

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

где C – скорость звука в продуктах взрыва, м/с.

Массовая скорость движения продуктов взрыва за фронтом детонации определяется из выражения

$$U = \frac{D}{n+1}, \text{ (м/с)}, \quad (3)$$

где n – показатель политропы.

Для большинства промышленных ВВ $n = 3$, откуда $U \approx D/4$.

В основном многими исследователями используется формула определения температуры взрыва через теплоту и удельную теплоемкость взрыва. Для аналитического расчета предполагается, что взрывчатое разложение происходит при постоянном объеме и выделяющаяся теплота целиком расходуется на нагревание продуктов взрыва.

Для смесевых ВВ определяют температуру газообразных продуктов взрыва из общего термодинамического выражения для изолированной системы, используя теплоту взрыва и теплоемкость [1, 2, 6].

$$-dE = dQ_v + pdV, \quad (4)$$

где $E = C_v t$ – внутренняя энергия продуктов взрыва, кДж;

C_v – молярная теплоемкость, кДж/моль·°С;

t – температура взрыва, °С;

Q_v – теплота взрыва, кДж/моль;

pdV – работа расширения газов, кДж.

Предполагается, что продукты взрыва образуются практически в исходном объеме ВВ, начальная температура взрыва рассчитывается из условия $dV = 0$. Тогда уравнение примет вид

$$-dE = Q_v = \sum C_i \cdot t \cdot n_i, \quad (5)$$

Откуда

$$t = \frac{Q_v}{\sum C_i n_i}, \text{ (°С)}, \quad (6)$$

где C_i – молярная теплоемкость i -го компонента продуктов взрыва, кДж/моль·°С;

n_i – число молей i -го компонента продуктов взрыва.

Молярная теплоёмкость C_V для газов в момент взрыва, т.е. до их расширения, берётся при постоянном объёме. Для реальных газов C_V – величина переменная, зависящая от температуры, и различная для разных газов. Малляр и Ле-Шателье предложили для её определения следующее уравнение:

$$C_V = a + bt, \quad (7)$$

где a – молярная теплоёмкость продуктов взрыва при 0°C (273°K); b – приращение молярной теплоёмкости при повышении температуры на 1°C .

Подставив указанное значение C_V в формулу температуры взрыва (6), получим

$$t = \frac{Q_V}{\sum n(a + bt)}$$

или

$$\sum nbt^2 + \sum nat - QV = 0. \quad (8)$$

Откуда методом решения квадратного уравнения получим

$$t = \frac{-\sum na + \sqrt{(\sum na)^2 + 4\sum nbQ_V}}{2\sum nb}. \quad (9)$$

Продукты взрыва состоят из твердых компонентов и газов, теплоёмкость которых различна. Поэтому величина $\sum na$ означает суммарную молярную теплоёмкость продуктов взрыва при температуре 0°C , т.е. $\sum na = n_1a_1 + n_2a_2 + \dots + n_na_n$. Точно так же $\sum nb$ означает суммарное приращение молярной теплоёмкости продуктов взрыва при повышении их температуры на 1° , т.е. $\sum nb = n_1b_1 + n_2b_2 + \dots + n_nb_n$ [6].

Температура взрыва переводится в $^\circ\text{K}$. $T = t + 273,15^\circ\text{C}$.

На основании формулы (9) можно провести расчет температуры взрыва для ЭВВ.

Продукты взрыва можно определить по уравнению реакции взрывчатого превращения аммиачной селитры: $2\text{NH}_4\text{NO}_3 \rightarrow 2\text{N}_2 + \text{O}_2 + 4\text{H}_2\text{O}$. Для грубой оценки содержанием газогенерирующей добавки (ГГД) и дизельного топлива (ДТ) в реакции можно пренебречь, т.к. содержание аммиачной селитры в ЭВВ составляет до 98%, ГГД – до 1,5%, а ДТ – до 5%.

Значения параметров a и b , для N_2 , O_2 и H_2O принимаются из таблицы, предложенной Г. Кастом [6]. Для N_2 , $a = 23,45$ кДж/(кмоль· $^\circ\text{C}$), $b = 0,001352$ кДж/(кмоль· $^\circ\text{C}$); для O_2 , $a = 24,07$ кДж/(кмоль· $^\circ\text{C}$), $b = 0,002209$ кДж/(кмоль· $^\circ\text{C}$);

для H_2O , $a = 29,85$ кДж/(кмоль· $^\circ\text{C}$), $b = 0,00522$ кДж/(кмоль· $^\circ\text{C}$).

$$\begin{aligned} \sum na &= 2 \cdot 23,45 + 4 \cdot 29,85 + 24,07 = \\ &= 190,37 \text{ кДж/(кмоль} \cdot ^\circ\text{C)}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum nb &= 2 \cdot 0,001352 + 4 \cdot 0,00522 + 0,002209 = \\ &= 0,025793 \text{ кДж/(кмоль} \cdot ^\circ\text{C)}. \end{aligned}$$

Используя уравнение

$$D = \sqrt{2Q(n^2 - 1)}, \quad (\text{м/с}), \quad (10)$$

можно определить удельную теплоту взрыва Q при постоянном объеме:

$$Q = \frac{D^2}{2(n^2 - 1)}, \quad (\text{Дж/кг}). \quad (11)$$

Формула расчета температуры продуктов взрыва из общего термодинамического выражения дает приблизительные результаты и используется большинством исследователей.

Давление газов в зарядной камере при взрыве конденсированных ВВ может быть определено исходя из объединённых законов Бойля – Мариотта и Гей-Люссака с поправкой Ван-дер-Ваальса [1, 2]. Если условно принять продукты взрыва за идеальные газы, то давление их возрастает пропорционально росту температуры:

$$P = \frac{P_0 V_{\text{пв}} T}{273 \cdot (V - \alpha)}, \quad (\text{Па}), \quad (12)$$

где P_0 – атмосферное давление газов при 0°C , $P_0 = 1,01 \cdot 10^5$ Па;

V – объем заряда ВВ, м^3 . $V = l_{\text{зар}} \left(\frac{\pi d^2}{4} \right)$;

T – температура взрыва, $^\circ\text{K}$;

$V_{\text{пв}}$ – объем продуктов взрыва, м^3 ;

$$V_{\text{пв}} = V_{\text{пв}}^{\text{уд}} \cdot Q_{\text{зар}}, \quad (\text{м}^3), \quad (13)$$

где $V_{\text{пв}}^{\text{уд}}$ – удельный объем газообразных продуктов взрыва, $\text{м}^3/\text{кг}$;

$Q_{\text{зар}}$ – масса заряда ВВ, кг.

Согласно ТУ 7276-001-23308410-2006 [9] для ЭВВ «Фортис 70, 85 и 100» $V_{\text{пв}}^{\text{уд}} = 1012$ (1,01), 1023 (1,02) и 1036 (1,04) л/кг ($\text{м}^3/\text{кг}$). В соответствии с ТУ 7276-003-58995878-2004 [7] для ЭВВ «Нитронит Э-70, Э-100» $V_{\text{пв}}^{\text{уд}} = 950 - 1100$ (0,95-1,1) $\text{дм}^3/\text{кг}$ ($\text{м}^3/\text{кг}$) ~ 1 $\text{м}^3/\text{кг}$. Согласно ТУ 84-08628424-671-96 [8] для ЭВВ «Порэммит-1А» $V_{\text{пв}}^{\text{уд}} = 1010$ (1,01) л/кг ($\text{м}^3/\text{кг}$).

α – поправка, учитывающая собственный объем молекул продуктов взрыва – несжимаемая часть газа или коволюм, м^3 . Для более высоких плотностей ($\rho > 1$ г/ см^3) для расчетов принимают $\rho = 0,0006 \cdot V_{\text{пв}}$. Здесь ρ – плотность заряжения ВВ, г/ см^3 .

Для грубой оценки, если принять, что детонационное давление, действующее на стенки зарядной полости, приблизительно равняется давлению в точке Чепмена – Жуге: $P \sim P_{ч-ж}$, тогда, используя формулы

(1) и (12), можно определить температуру взрыва.

$$T = \frac{273 * P(V - 0,0006V_{нв})}{1,01 * 10^5 V_{нв}}, (\text{°K}). \quad (14)$$

Таблица 2

Результаты расчета детонационного давления ЭВВ «Фортис», «Нитронит» и «Порэммит-1А»

Тип ЭВВ	Плотность ЭВВ, т/м ³	Масса ВВ, кг	Скорость детонации, м/с	Детонационное давление, ГПа
ФОРТИС 70	1,05–1,25	56–443	4281–5686	5,27–9,54
ФОРТИС 85	1,14–1,15	20–423	3868–5606	4,30–9,19
ФОРТИС 100	1,1–1,17	80–570	4770–5518	6,54–9,52
НИТРОНИТ Э-70	1,11–1,319	2–700	2474–5476	1,71–9,37
НИТРОНИТ Э-100	1,205–1,3	6–74	2718–5316	1,5–8,97
ПОРЭМИТ 1-А	1,11–1,305	8–715	2275–5992	2,05–11,40

Таблица 3

Результаты расчета температуры взрыва ЭВВ «Фортис», «Нитронит» и «Порэммит-1А» по молярной теплоемкости газов и через закон Бойля – Мариотта и Гей-Люссака

Тип ЭВВ	Температура взрыва по молярной теплоемкости газов, °К	Температура взрыва через закон Бойля-Мариотта и Гей-Люссака, °К
ФОРТИС 70	4200–5940	2989–4951
ФОРТИС 85	3645–6145	2936–5912
ФОРТИС 100	4874–5969	3994–4973
НИТРОНИТ Э-70	2463–5872	1357–5114
НИТРОНИТ Э-100	2938–5644	1119–4556
ПОРЭМИТ 1-А	2945–5726	1029–5534

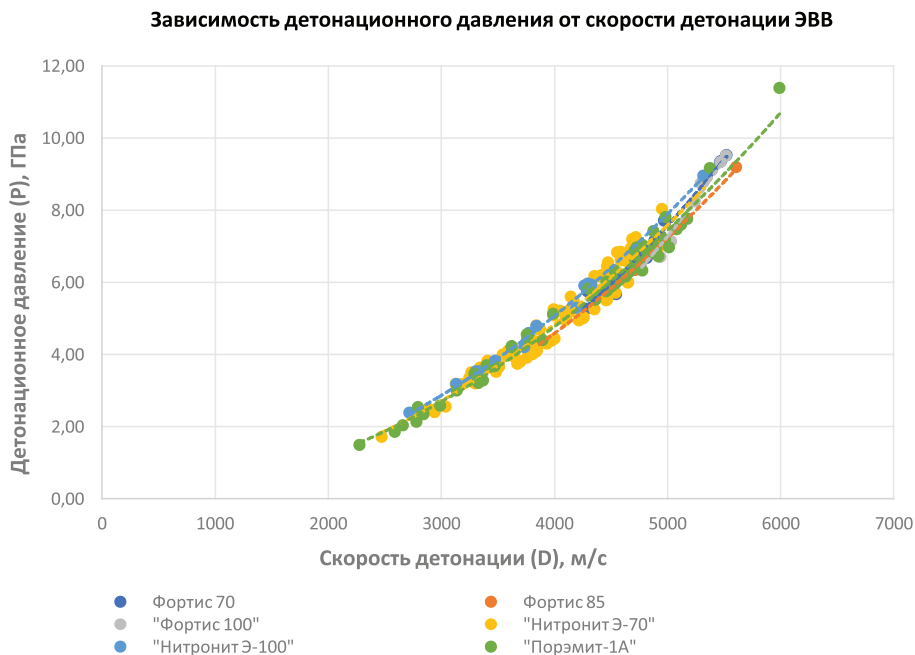


Рис. 2. Зависимость детонационного давления от скорости детонации ЭВВ «Фортис», «Нитронит» и «Порэммит-1А»

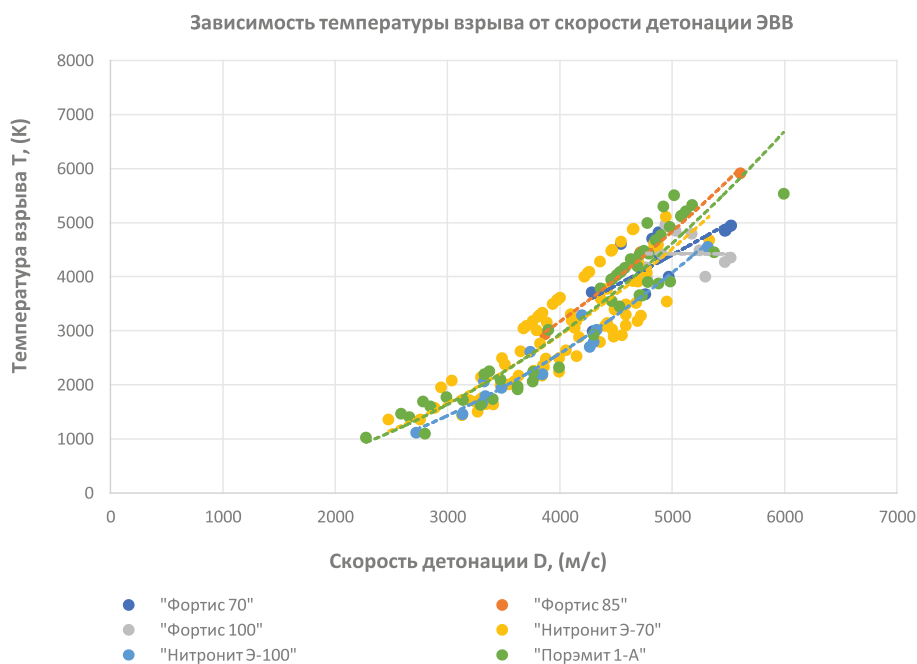


Рис. 3. Зависимость температуры взрыва от скорости детонации ЭВВ «Фортис», «Нитронит» и «Порэмит-1А». (расчет по закону Бойля – Мариотта и Гей-Люссака)

Результаты исследования и их обсуждение

На основании формул (1), (9) и (14) можно провести расчет детонационного давления и температуры взрыва для ЭВВ по двум методикам.

Результаты расчета детонационного давления и температуры взрыва ЭВВ «Фортис», «Нитронит» и «Порэмит-1А» по молярной теплоемкости газов и через закон Бойля – Мариотта и Гей-Люссака представлены в табл. 2 и 3.

Из табл. 3 видно, что значения температуры взрыва, рассчитанные по молярной теплоемкости газов, получаются немного завышенными, по сравнению с расчетом через уравнение Бойля – Мариотта и Гей-Люссака, и могут отличаться от 0,5 до 12%.

Графики изменения детонационного давления и температуры взрыва через уравнение Бойля-Мариотта и Гей-Люссака в зависимости от скорости детонации для ЭВВ «Фортис», «Нитронит» и «Порэмит-1А» на основании проведенных расчетов представлены на рис. 2 и 3.

Выводы

Кроме определения температуры взрыва через теплоту и удельную тепло-

емкость возможен расчет температуры взрыва через уравнение Бойля-Мариотта и Гей-Люссака, который дает вполне достоверные данные и может использоваться для приблизительной оценки температуры взрыва большинства промышленных ВВ, зная скорость детонации, плотность, массу ВВ, объем зарядной полости и удельный объем газообразных продуктов взрыва.

Госзадание 007-01398-17-00. Тема № 0405-2015-0013, № 0405-2015-0014.

Список литературы

1. Горбонос М.Г. Методические указания по практическим занятиям и выполнению самостоятельных работ по дисциплине «Технология и безопасность взрывных работ» для студентов специальности 130403 «Открытые горные работы». Часть 1. – Петрозаводск, Петрозаводский государственный университет, 2011 – 51 с.
2. Кук М.А. Наука о промышленных взрывчатых веществах. – М.: Недра, 1980 – 456 с.
3. Сильвестров В.В., Бордзиловский С.А., Караханов С.М. Измерение температуры детонации эмульсионного взрывчатого вещества. Доклады Академии наук. – 2014, Т. 458, № 2. – С. 155–157.
4. Скорость детонации взрывчатых веществ. Методика измерений скорости детонации взрывчатых веществ реостатным методом с использованием измерителя скорости детонации VODMate. СТО 01.01.004 – 2011. – Екатеринбург, ИГД УрО РАН, 2011. – 17 с.
5. Скорость детонации взрывчатых веществ. Методика измерений скорости детонации взрывчатых веществ рефлектометрическим методом с использо-

ванием измерителя скорости детонации SpeedVOD. СТО 01.01.004 – 2013. – Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2013. – 21 с.

6. Теплота и температура взрыва. Все о горном деле. Добывающая промышленность, 2012–2016 [Электронный ресурс]. – URL: <http://industry-portal24.ru/gornorazvedochnye-vyrobki/2335-teplota-i-temperatura-vzryva.html> (дата обращения: 02.03.2017).

7. Эмульсионное промышленное взрывчатое вещество «Нитронит». Технические условия ТУ 7276-003-58995878-2004. – Качканар, ООО «АВТ-Урал», 2004 – 19 с.

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

9. Эмульсионное промышленное взрывчатое вещество «Фортис». Технические условия ТУ 7276-001-23308410-2006 (с изменениями, на 26.01.2015 г.). – М.: ЗАО «Орика СиАйЭс», 2015 – 21 с.

10. Энциклопедия по машиностроению XXL. Затухание ударной волны [Электронный ресурс]. – URL: <http://mash-xxl.info/info/400095/> (дата обращения: 02.03.2017).

11. Энциклопедия по машиностроению XXL. Метод цветовой температуры [Электронный ресурс]. – URL: <http://mash-xxl.info/info/554488/> (дата обращения: 02.03.2017).

12. DataTrap II Data/VOD Recorder. Руководство по использованию измерителя скорости детонации. Редакция 3.0. – MREL Group of Companies Limited, Kingston, Canada, 2013 – 102 p.