

УДК 622.235.213

Флягин Александр Сергеевич
младший научный сотрудник,
Институт горного дела УрО РАН,
620075 г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58
e-mail: flyagingdr@mail.ru.

Кутуев Вячеслав Александрович
научный сотрудник,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: slavik1988@mail.ru

Жариков Сергей Николаевич
кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник,
заведующий лабораторией,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: 333vista@mail.ru

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ
ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕТОНАЦИОННЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК ПРОМЫШЛЕННОГО
ЭМУЛЬСИОННОГО ВЗРЫВЧАТОГО
ВЕЩЕСТВА НПГМ ПРОИЗВОДСТВА
НАО «НИПИГОРМАШ»***

Аннотация:

В промышленных условиях карьера «Эльдорадо» ООО «Соврудник» были проведены инструментальные замеры скорости детонации промышленного эмульсионного взрывчатого вещества НПГМ-100 и НПГМ-70 для анализа детонационных характеристик ВВ и установления их соответствия требованиям технических условий. Измерения проводились в технологических скважинах при производстве массовых взрывов в карьере, с использованием иностранного оборудования DataTrap II Data/VOD Recorder канадской фирмы «MREL Group of Companies Limited», в основе которого заложен современный вариант реостатного метода измерений (резистивный метод). В результате исследования установлено, что введение в состав ПЭВВ НПГМ сухой фазы около 30 % (при $\rho=1,2 \text{ г/см}^3$) способствует увеличению скорости детонации ВВ. Также измерения показали рост детонационных характеристик ВВ при снижении его плотности до значения $\rho=1,17 \text{ г/см}^3$. Следовательно, с понижением плотности до нормальных значений ($\rho=1,16 - 1,17 \text{ г/см}^3$) можно ожидать скорость детонации, которая заявлена в технических условиях. Ключевые слова: промышленное эмульсионное взрывчатое вещество НПГМ, физико-химические и взрывчатые характеристики НПГМ, состав НПГМ, НПГМ-100, НПГМ-70, скорость детонации, детонационные характеристики, плотность ВВ.

DOI: 10.25635/2313-1586.2020.04.023

Flyagin Aleksandr S.
Junior Research Worker,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,
620075 Ekaterinburg,
58 Mamina-Sibiryaka Str.
e-mail: flyagingdr@mail.ru

Kutuev Vyacheslav A.
Research Worker,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS
e-mail: slavik1988@mail.ru

Zharikov Sergey N.
Candidate of Technical Sciences,
Leading Research Worker,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS
e-mail: 333vista@mail.ru

**EXPERIMENTAL STUDY OF DETONATION
CHARACTERISTICS OF INDUSTRIAL
EMULSION EXPLOSIVES NPGM
PRODUCED BY COMPANY
"NIPIGORMASH"**

Abstract:

In the industrial conditions of the Eldorado quarry, OOO Sovrudnik, instrumental measurements of the detonation velocity of the industrial emulsion explosive NPGM-100 and NPGM-70 were carried out to analyze the detonation characteristics of explosives and to establish their compliance with the requirements of technical conditions. Measurements were made in technological wells during the production of mass explosions in the quarry, using foreign equipment DataTrap II Data/VOD Recorder of the Canadian "MREL Group of Companies Limited", based on a modern version of the rheostat measurement method. The study found that the introduction of a dry phase of 30% (at a density of 1.2 g/cm^3) in the composition of the NPGM contributes to an increase in the detonation velocity of explosives. The measurements also showed an increase in the detonation characteristics of the explosive with a decrease in its density to a value of $\rho=1.17 \text{ g/cm}^3$. Therefore, with a decrease in the density to normal values ($\rho=1.16-1.17 \text{ g/cm}^3$), we can expect the detonation velocity, which is stated in the technical specifications.

Key words: industrial emulsion explosive NPGM, physical and chemical and explosive characteristics of NPGM, composition of NPGM, NPGM-100, NPGM-70, detonation velocity, detonation characteristics, density of explosives.

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

Введение

Свойства взрывчатых веществ (ВВ) во многом определяют результаты промышленных взрывов и безопасность горных работ. Наливные ВВ вследствие различных обстоятельств имеют изменчивые свойства, которые должны согласно технической документации на изготовление лежать в некотором диапазоне значений. Поэтому главной задачей при изготовлении промышленных эмульсионных взрывчатых веществ (ПЭВВ) является обеспечение соответствия как технологического процесса, так и формируемого заряда свойствам, заявленным в технических условиях (ТУ), важнейшим из которых является скорость детонации ВВ при взрыве [1 – 3].

В промышленных условиях карьера «Эльдорадо» ООО «Соврудник» были проведены инструментальные замеры скорости детонации ПЭВВ НПГМ-100 и НПГМ-70 с последующим анализом детонационных характеристик ВВ и установления их соответствия требованиям ТУ 7276-001-37945333-2014 [4].

Состав и характеристики ПЭВВ НПГМ

НПГМ – промышленное эмульсионное взрывчатое вещество первого класса (по условиям применения), согласно классификации ФНиП [5] изготавливается на местах применения в процессе заряжания скважин смесительно-зарядными машинами и предназначено для производства взрывных работ на земной поверхности при отбойке сухих и обводненных горных пород с коэффициентом крепости по шкале М.М. Протоdjяконова до 18, методом скважинных зарядов в температурном диапазоне окружающей среды от –50 до +50 °С.

НПГМ марки «100» представляют собой химическим способом аэрированную эмульсию, с включениями видимых невооруженным глазом газовых пузырьков.

НПГМ марки «70» представляют собой химическим способом аэрированную смесь эмульсии и гранул аммиачной селитры, с включениями видимых невооруженным глазом газовых пузырьков.

Состав ПЭВВ НПГМ марок «100» и «70» представлен в табл. 1.

Таблица 1

Состав ПЭВВ НПГМ-100 и НПГМ-70

Наименование компонента	Норма, %	
	НПГМ-100	НПГМ-70
Эмульсия	98,0 – 99,0	69,0 – 69,5
Аммиачная селитра, гранулированная ГОСТ 2-2013(сухая фаза)	0	29,0 – 29,5
Аммиачная селитра пористая	0	0
Газогенерирующая добавка (ГГД)	0,5 – 2,0	0,5 – 2,0
Подкисляющая добавка (ПК)	0 – 0,5	0 – 0,5

Основные физико-химические и взрывчатые характеристики НПГМ приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Основные физико-химические и взрывчатые характеристики
ПЭВВ НПГМ-100 и НПГМ-70**

Характеристики	Норма для НПГМ по маркам:	
	НПГМ-100	НПГМ-70
Расчетные		
Кислородный баланс, %	-8,69	-0,11
Теплота взрыва, Ккал/кг (кДж/кг)	558 (2335,5)	716 (2993)
Объемная концентрация энергии, ккал/дм ³ при плотности от 1,05 до 1,25 г/см ³	586...697	751...895
Тротиловый эквивалент по объемной концентрации энергии	0,586...0,697	0,751...0,895
Объем газообразных продуктов взрыва, л/кг	1059	1000
Объем ядовитых газов в пересчете на СО, л/кг	25	3
Температура продуктов взрыва, К	2142	2498
Детонационное давление, кбар	26,26	29,37
Экспериментальные		
Плотность состава через 30 мин после введения ГГД, г/см ³	1,05 – 1,25	
Скорость детонации открытого заряда диаметром 240 мм при плотности 1,05-1,25 г/см ³ , км/с	5 – 5,4	
Чувствительность к удару по ГОСТ 4545-88: - нижний предел, мм..... - частота взрывов, %.....	500 0	
Чувствительность к трению на копре К-44-III, максимальное давление прижатия, МПа	Более 300	
Чувствительность к нагреву (метод ДТА)	Отсутствие экзотермического разложения до температуры 170 °С. Начало интенсивного экзотермического разложения T _{нир} =200 – 220 °С.	
Чувствительность к первичным средствам инициирования (ЭД, ДШЭ-12)	не чувствителен	

Методика измерения скорости детонации

Для проведения исследований детонационных характеристик ПЭВВ НПГМ применялась «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» №88-16358-007-2019, разработанная Институтом горного дела УрО РАН [6 – 12]. Погрешность измерений по данной методике составляет $\delta = \pm 3 \%$. Особенности реостатного метода (резистивного метода) также отражены в работах [13 – 16]. 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 и интервала замедления между взрывами скважинных зарядов.

Измерения проводились с использованием аппаратуры DATATRAP II DATA/VOD Recorder («MREL Group of Companies Limited»), представленной на рис. 1(А). Комплект оборудования для измерения скорости детонации ВВ 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 DATATRAP II. Схема последовательности соединения и измерения скорости детонации ВВ показана на рис. 1 (Б).



Рис. 1. Прибор DATATRAP II DATA/VOD Recorder (А) и схема измерения скорости детонации ВВ в одной скважине (Б)

Результаты

Инструментальные измерения скорости детонации ПЭВВ НПГМ-100 и НПГМ-70 проводились в технологических скважинах при производстве массовых взрывов в карьере при разных диаметрах и глубинах скважин, массах и длинах зарядов, промежуточных детонаторах и плотностях ВВ. Подробные исходные данные и результаты замеров скорости детонации ПЭВВ НПГМ-100 и НПГМ-70 представлены в табл. 3.

Таблица 3

Исходные данные и результаты замеров скорости детонации ПЭВВ НПГМ марок «100» и «70»

№ испытания	Диаметр скважины, м	Глубина скважины, м	Масса заряда, кг	Длина заряда, м	Промежуточный детонатор (боевик)	Взрывчатое вещество	Плотность ВВ, г/см ³	Среднее значение скорости детонации, м/с ($\delta = \pm 3\%$)
1	0,22	11,5	320	7	шашка ПТ-П750	НПГМ-100	1,2	4301 ± δ
2	0,16	9	157	6,5		НПГМ-70		4556 ± δ
3	0,22	5	44	1	шашка ДПУ-ПТ600	НПГМ-100	1,17	5018 ± δ
4	0,22	5	67	1,5		НПГМ-70		5233 ± δ

Графическая интерпретация замеров скорости детонации ПЭВВ НПГМ представлена на рис. 2 – 5.

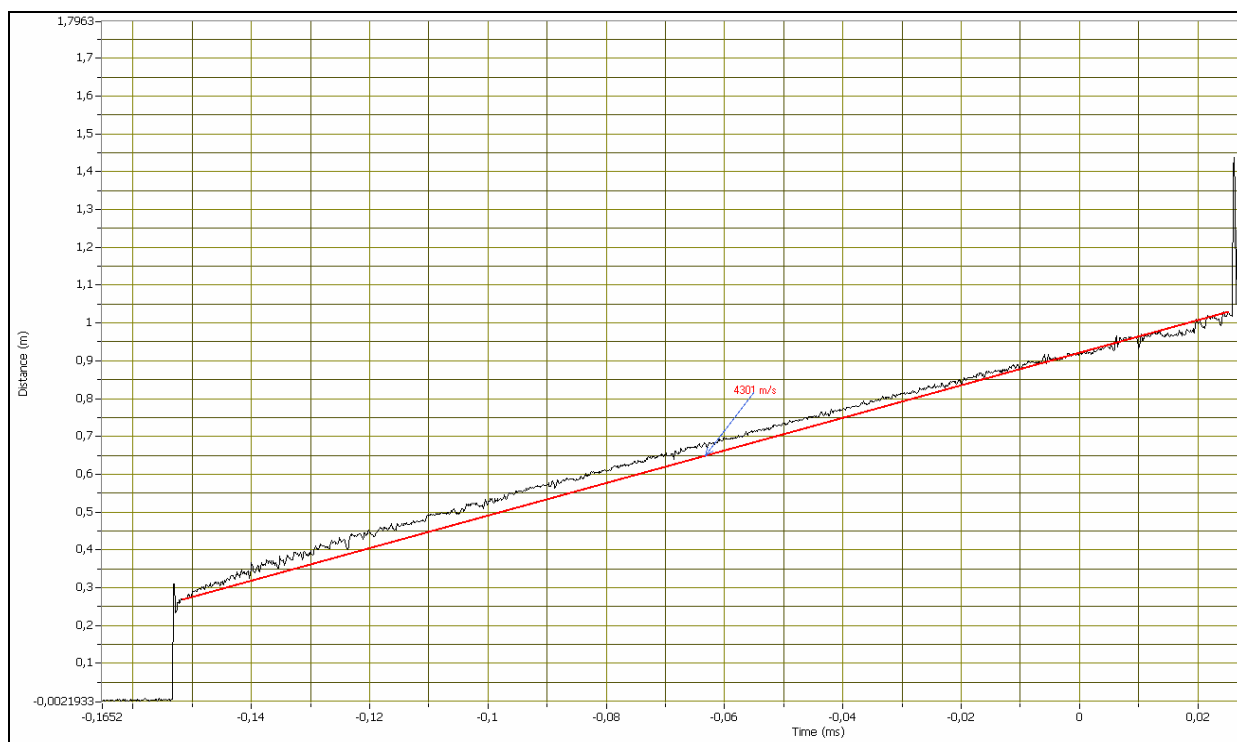


Рис. 2. Осциллограмма первого испытания (скорость детонации - 4301 м/с)

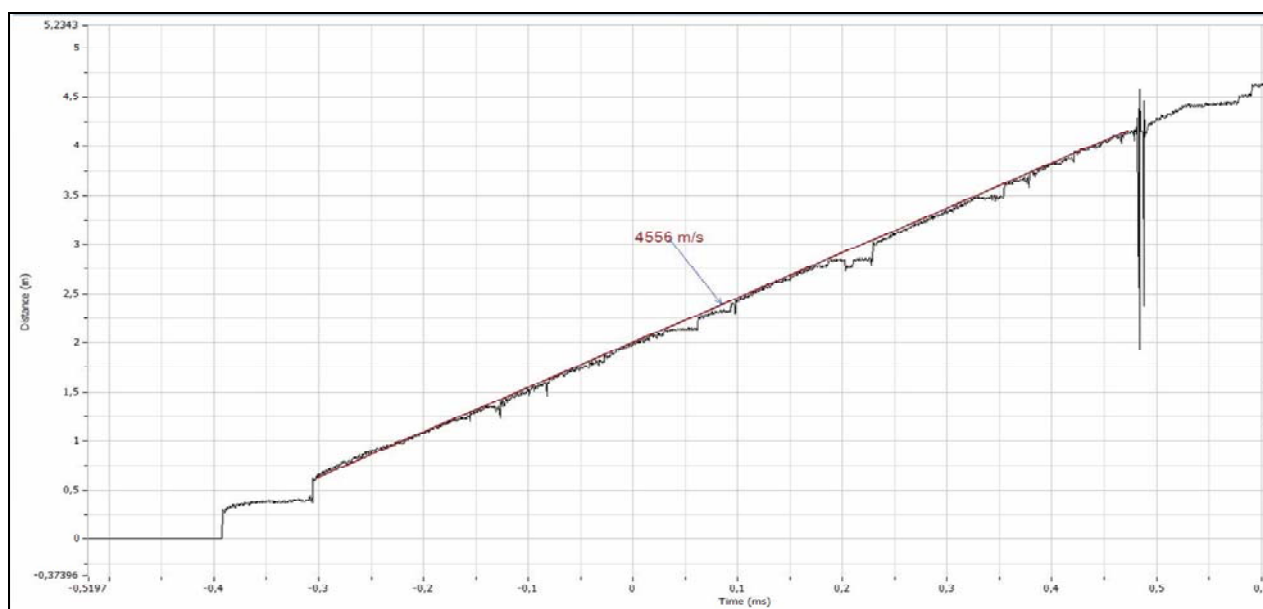


Рис. 3. Осциллограмма второго испытания (скорость детонации - 4556 м/с)

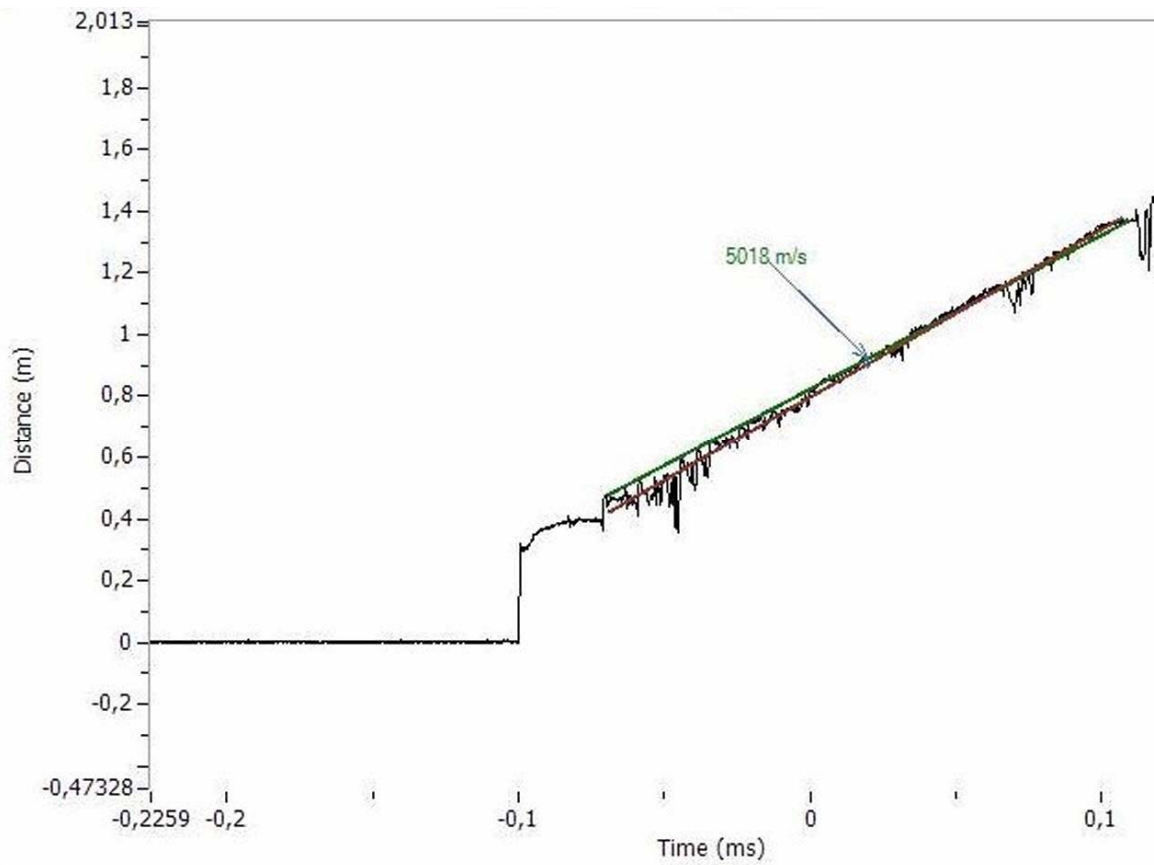


Рис. 4. Осциллограмма третьего испытания (скорость детонации - 5018 м/с)

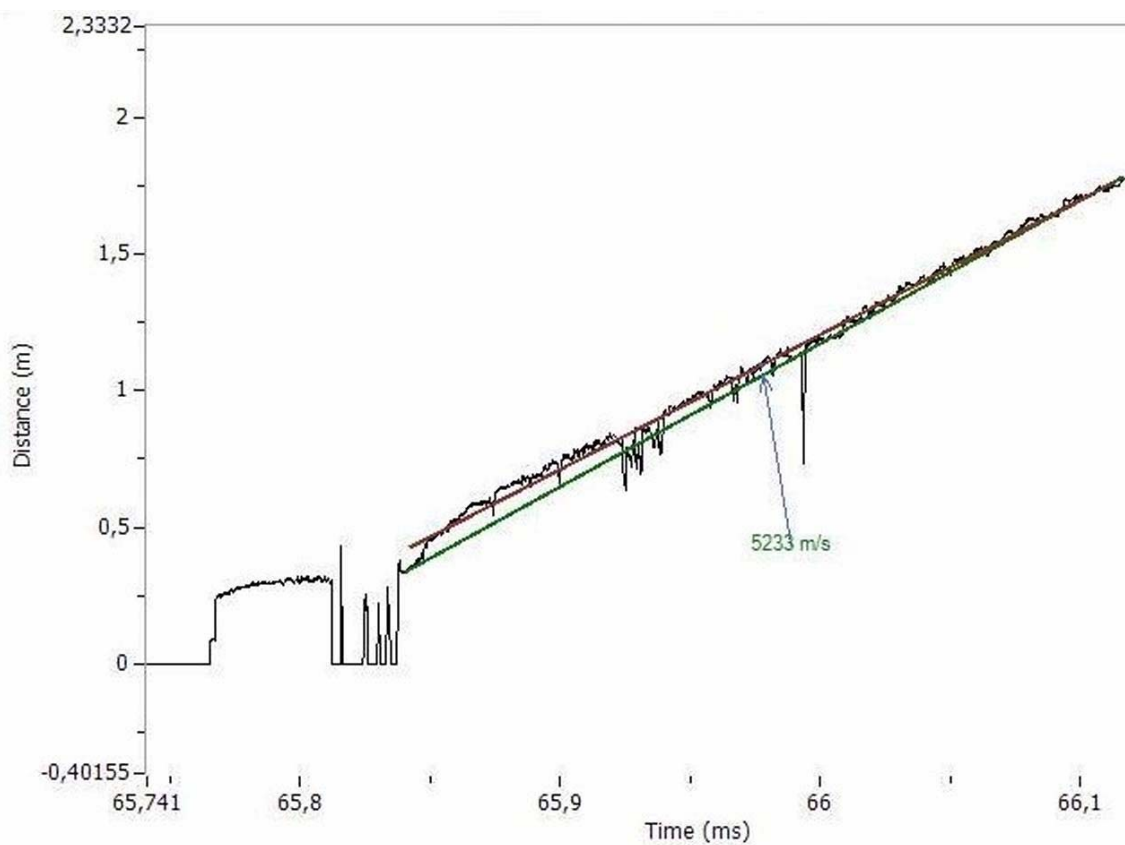


Рис. 5. Осциллограмма четвертого испытания (скорость детонации - 5233 м/с)

Выводы

В результате исследования установлено, что введение в состав ПЭВВ НПГМ сухой фазы в размере около 30 % (при $\rho=1,2 \text{ г/см}^3$) способствует увеличению скорости детонации заряда ВВ в скважинах $\varnothing 160 - 220 \text{ мм}$. Также инструментальные измерения показали рост детонационных характеристик ВВ при снижении его плотности с $\rho=1,2 \text{ г/см}^3$ до значения $\rho=1,17 \text{ г/см}^3$. Следовательно, с понижением плотности до нормальных значений $\rho=1,16 - 1,17 \text{ г/см}^3$ можно ожидать скорость детонации, которая заявлена в ТУ 7276-001-37945333-2014 [4].

На существенную разницу значений скоростей детонации зарядов ВВ НПГМ-70 между испытаниями тестируемых образцов № 2 (см. рис. 3) и № 4 (см. рис. 5), могло оказать влияние не только изменение плотности ВВ, но и различное качество исходных компонентов. Например, на детонационные характеристики ПЭВВ НПГМ-70 могла повлиять аммиачная селитра (гранулированная) низкого качества. Учитывая это, нужно обеспечивать соответствующий входной контроль [12, 13].

В целом перед использованием ПЭВВ в технологических скважинах целесообразно проводить полигонные испытания зарядов в гильзах с измерением детонационных характеристик. При отсутствии возможности замеров нужно проводить испытания хотя бы на полноту детонации.

Список литературы

1. *Физика взрыва*. Т. 1. Под ред. Л.П. Орленко. 2002, Москва: Физматлит, 832 с.
2. Ефремов Э.И., Вовк А.А., 1983. *Справочник по взрывным работам*. Киев: Наукова думка, 327 с.
3. Латышев О.Г., Казак О.О., 2015. *Физика разрушения горных пород при бурении и взрывании*. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 320 с.
4. *Вещества взрывчатые промышленные «НПГМ»*. Технические условия ТУ 7276-001-37945333-2014. 2014. Екатеринбург: ЗАО «НИПИГОРМАШ», 22 с.
5. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности. «Правила безопасности при взрывных работах» (утв. приказом Ростехнадзора от 16 декабря 2013 г. № 605, в ред. Приказа Ростехнадзора от 30.11.2017 № 518). URL: <https://legalacts.ru/doc/prikaz-rostekhnadzora-ot-16122013-n-605-ob/>
6. *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*. Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2019, 28 с.
7. Кутуев В.А., 2017. О взаимосвязи между скоростью детонации и временем газификации на примере промышленного эмульсионного взрывчатого вещества порэмит 1А. *Проблемы недропользования*, № 2, С. 106 - 111. DOI: 10.18454/2313-1586.2017.02.106.
8. Кутуев В.А., Меньшиков П.В., Жариков С.Н., 2016. Анализ методов исследования детонационных процессов ВВ. *Проблемы недропользования*, № 3. – С. 78 - 87. DOI: 10.18454/2313-1586.2016.03.078
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. Маслов И.Ю., Пупков В.В., Кампель Ф.П. и др., 2006. Метод непрерывного измерения скорости детонации зарядов промышленных ВВ. *Взрывное дело*, № 96/53, С. 101 - 113.
11. Иляхин С.В., Маслов И.Ю., Брагин П.А., 2019. Элементарная теория измерительного кабеля при резистивном методе измерения скорости детонации взрывчатых

веществ. *Известия Уральского государственного горного университета*, № 4 (56), С. 104 - 108.

12. Шеменев В.Г., Флягин А.С., Матухно Н.С., 2018. Определение детонационных характеристик ВВ гранулита ПС-2 в стальных трубах длиной 2500 мм, при использовании в составе ПАС различных производителей. *Взрывное дело*, № 119 - 76, С. 90 - 97.

13. Горинов С.А., 2020. Иницирование и детонация эмульсионных взрывчатых веществ. Йошкар-Ола: Стринг, 214 с.

14. Маслов И.Ю., Пупков В.В., Кампель Ф.Б. и др., 2003. Определение фактической скорости детонации и работоспособности новых эмульсионных ВВ с целью выбора рациональной плотности заряжания при взрывоподготовке железных руд. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 5, С. 56 - 60.

15. Feng, X. J., Zhao, J., Tian, X., 2018. Experimental Study of the Deflagration to Detonation Transition for Four Kinds of Typical Explosives. *Huozhayao Xuebao / Chinese Journal of Explosives and Propellants*. 41. 72-76. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.2018.01.014.

16. Pooley J., Price E., Ferguson J., Ibsen M., 2019. Detonation Velocity Measurements Using Rare-Earth Doped Fibres. *Sensors*. 19. 1697. DOI: 10.3390/s19071697.

References

1. *Fizika vzryva. V. 1. Pod red. L.P. Orlenko* [Physics of explosion. Vol. 1. Edited by L. P. Orlenko]. 2002, Moscow: Fizmatlit, 832 p.

2. Efremov E.I., Vovk A.A., 1983. *Spravochnik po vzryvnym rabotam* [Handbook of blasting operations]. Kiev: Naukova dumka, 327 p.

3. Latyshev O.G., Kazak O.O., 2015. *Fizika razrusheniya gornykh porod pri burenii i vzryvanii* [Physics of destruction of rock mass by drilling and blasting]. Ekaterinburg: Publ. UGGU, 320 p.

4. *Veshchestva vzryvchatye promyshlennye "NPGM". Tekhnicheskie usloviya TU 7276-001-37945333-2014*. [Industrial explosive substances "NPGM". Technical specifications of TU 7276-001-37945333-2014]. 2014. Ekaterinburg: ZAO "NIPIGORMASH", 22 p.

5. *Federal'nye normy i pravila v oblasti promyshlennoi bezopasnosti. "Pravila bezopasnosti pri vzryvnykh rabotakh' (utv. prikazom Rostekhnadzora ot 16 dekabrya 2013 g. № 605, v red. Prikaza Rostekhnadzora ot 30.11.2017 № 518)* [Federal norms and rules on field of industrial safety. "Safety rules for explosive operations" (approved by the order of Rostekhnadzor No. 605 of December 16, 2013, as amended in Order of Rostekhnadzor No. 518 dated 30.11.2017)]. URL: <https://legalacts.ru/doc/prikaz-rostekhnadzora-ot-16122013-n-605-ob/>

6. *Metodika izmerenii skorosti detonatsii vzryvchatykh veshchestv reostatnym metodom, intervalov zamedleniya mezhdru vzryvami skvazhinnykh zaryadov, uskoreniya seismicheskikh kolebanii i davleniya na fronte udarnoi vozdushnoi volny s ispol'zovaniem izmeritelya skorosti detonatsii DATATRAP II DATA/VOD RECORDER: standart organizatsii: STO 01.01.001-2019* [Methodology of measuring the explosives detonation velocity by the rheostat method, the deceleration intervals between detonations of borehole charges, the acceleration of seismic vibrations and pressure at the front of shock air wave with use of DATA-TRAP II DATA/VOD RECORDER detonation velocity meter: organization standard: STO 01.01.001-2019]. Ekaterinburg: IGD UrO RAN, 2019, 28 p.

7. Kutuev V.A., 2017. *O vzaimosvyazi mezhdru skorost'yu detonatsii i vremenem gazifikatsii na primere promyshlennogo emul'sionnogo vzryvchatogo veshchestva poremit 1A* [On relationship between the detonation rate and the gasification time on example of industrial emulsion explosive Poremit 1A]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 2, P. 106 - 111. DOI: 10.18454/2313-1586.2017.02.106.

8. Kutuev V.A., Men'shikov P.V., Zharikov S.N., 2016. *Analiz metodov issledovaniya detonatsionnykh protsessov VV* [Analysis of methods for studying detonation processes in explosive substances]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 3. – P. 78 - 87. DOI: 10.18454/2313-1586.2016.03.078
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 open-pits of Yakutia]. Ekaterinburg: IGD UrO RAN, 172 p.
10. Maslov I.Yu., Pupkov V.V., Kampel' F.P. i dr., 2006. *Metod nepreryvnogo izmereniya skorosti detonatsii zaryadov promyshlennykh VV* [Method of continuous measuring of the detonation rate in industrial explosive charges]. *Vzryvnoe delo*, № 96/53, P. 101 - 113.
11. Ilyakhin S.V., Maslov I.Yu., Bragin P.A., 2019. *Elementarnaya teoriya izmeritel'nogo kabelya pri rezistivnom metode izmereniya skorosti detonatsii vzryvchatykh veshchestv* [Elementary theory of measuring cable by resistive method of measuring the detonation rate of explosives]. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta*, № 4 (56), P. 104 - 108.
12. Shemenev V.G., Flyagin A.S., Matukhno N.S., 2018. *Opredelenie detonatsionnykh kharakteristik VV granulita PS-2 v stal'nykh trubakh dlinoi 2500 mm, pri ispol'zovanii v sostave PAS razlichnykh proizvoditelei* [Determination of the detonation characteristics of PS-2 granulate explosives in steel pipes of 2500 mm length, when used as part of LDAN of different manufacturers]. *Vzryvnoe delo*, № 119 - 76, P. 90 - 97.
13. Gorinov S.A., 2020. *Initsirovanie i detonatsiya emul'sionnykh vzryvchatykh veshchestv* [Initiation and detonation of emulsion explosives]. Ioshkar-Ola: String, 214 p
14. Maslov I.Yu., Pupkov V.V., Kampel' F.B. i dr., 2003. *Opredelenie fakticheskoi skorosti detonatsii i rabotosposobnosti novykh emul'sionnykh VV s tsel'yu vybora ratsional'noi plotnosti zaryazhaniya pri vzryvopodgotovke zheleznykh rud* [Determination of actual detonation rate and operability of new emulsion explosives in order to select the rational loading density while explosion preparation on iron ores]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 5, P. 56 - 60.
15. Feng, X. J., Zhao, J., Tian, X., 2018. Experimental Study of the Deflagration to Detonation Transition for Four Kinds of Typical Explosives. *Huozhayao Xuebao / Chinese Journal of Explosives and Propellants*. 41. 72-76. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.2018.01.014.
16. Pooley J., Price E., Ferguson J., Ibsen M., 2019. Detonation Velocity Measurements Using Rare-Earth Doped Fibres. *Sensors*. 19. 1697. DOI: 10.3390/s19071697.