

Факторы, влияющие на скорость детонации заряда взрывчатого вещества*

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2022-11-55-61>

При производстве взрывных работ важное значение имеет не только входной контроль взрывчатых материалов при поступлении на предприятие от поставщика, но и проведение измерений скорости детонации заряда в полевых условиях, особенно смесевых эмульсионных взрывчатых веществ. Скорость детонации заряда взрывчатых веществ, как одна из важнейших его характеристик, влияющих на качество взрыва, зависит от многих факторов, основными из которых являются: качество приготовления взрывчатых веществ и их компонентов, плотность, диаметр и высота столба заряда, параметры промежуточного детонатора и его расположение по длине заряда. Правильный подход с применением соответствующих предварительных измерений позволит повысить эффективность и безопасность подготовки горной массы к выемке буровзрывным способом. В статье приведена методика проведения измерений скоростей детонации скважинного заряда с соответствующими результатами и выводами.

Ключевые слова: измерение скорости детонации заряда взрывчатых веществ, измерительные приборы, параметры буровзрывных работ, конструкция скважинного заряда, временные интервалы, импульсная рефлектометрия.

Для цитирования: Факторы, влияющие на скорость детонации заряда взрывчатого вещества / А.А. Галимьянов, Д.Е. Герасимов, К.В. Гевало и др. // Уголь. 2022. № 11. С. 55-61. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-11-55-61.

ВВЕДЕНИЕ

Скорость распространения детонационной волны – важнейший параметр, определяющий действие взрыва в режиме реального времени. С развитием систем мониторинга взрыва в последнее время стал доступен широкий спектр средств измерений [1, 2], основанных в том числе на методе импульсной рефлектометрии, а также реостатном, контактном и электромагнитном [3] принципах. Измерение скорости детонации (СД) в скважинах помогает сравнивать и оценивать относительные характеристики взрывчатых веществ (ВВ). На скорость детонации смесевых ВВ влияют параметры буровзрывных работ: плот-

* Исследования проведены с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научным оборудованием «Центр обработки и хранения научных данных ДВО РАН», финансируемого Российской Федерацией в лице Минобрнауки России по соглашению № 075-15-2021-663.



ГАЛИМЬЯНОВ А.А.

Канд. техн. наук,
ведущий научный сотрудник,
руководитель сектора
разрушения горных пород
Института горного дела
ХФИЦ ДВО РАН,
680000, г. Хабаровск, Россия,
e-mail: azot-1977@mail.ru



ГЕРАСИМОВ Д.Е.

Генеральный директор
ОАО «Амурвзрывпром»,
680020, г. Хабаровск, Россия,
e-mail: amur_vzriv_prom@mail.ru



ГЕВАЛО К.В.

Инженер сектора разрушения
горных пород
Института горного дела
ХФИЦ ДВО РАН,
680000, г. Хабаровск, Россия,
e-mail: igddvo@yandex.ru



МИШНЕВ В.И.

Инженер сектора разрушения
горных пород
Института горного дела
ХФИЦ ДВО РАН,
680000, г. Хабаровск, Россия,
e-mail: vovchenskiyxcf@gmail.com



ГАЛИМЬЯНОВ А.А.

Ведущий инженер сектора
разрушения горных пород
Института горного дела
ХФИЦ ДВО РАН,
680000, г. Хабаровск, Россия,
e-mail: stanxi@mail.ru

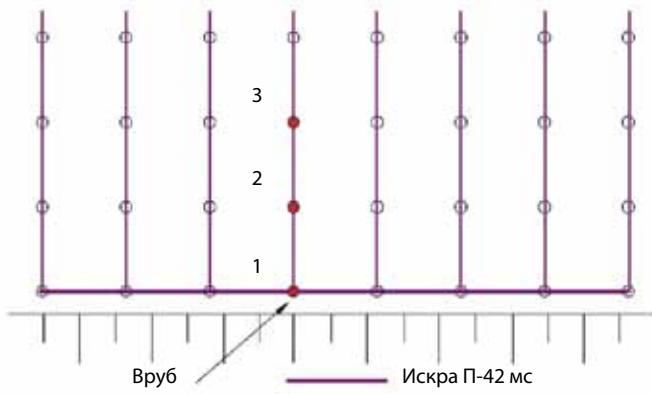


Рис. 1. Схема монтажа взрывной сети: 1, 2, 3 – скважинные заряды, в которых производились измерения скоростей детонации

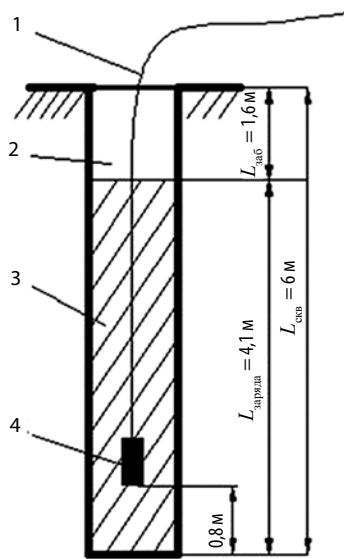


Рис. 2. Конструкция скважинного заряда, в котором проводилось измерение СД: 1 – Искра С-500; 2 – забойка; 3 – заряд ЭВВ; 4 – промежуточный детонатор + СИ (боевик)

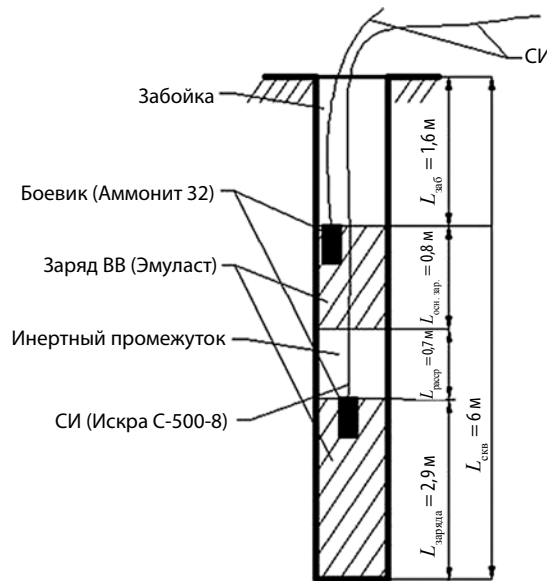


Рис. 3. Конструкция заряда основного блока

ность заряжения ВВ; диаметр и длина заряда; расположение боевиков по колонке заряда и их параметры [4, 5], в том числе диаметр и высота промежуточного детонатора. Следует подчеркнуть, что в России и мире объем потребления смесевых ВВ (эмульсии, АС-ДТ), уступающих по устойчивости детонации индивидуальным ВВ [6], превышает 80% от общего объема потребления ВВ [7].

Буровзрывные работы (БВР) на разных горнодобывающих предприятиях ведутся при отличных друг от друга горно-геологических условиях и параметрах БВР. Соответственно, в отсутствие привязки параметров БВР к натурным измерениям СД качество подготовки горной массы к выемке может быть значительно хуже относительно БВР с предварительным производством измерений СД [8]. Проведенные исследования подтверждают расхождение номинальных (указанных заводом изготовителем) значений СД со значениями, полученными инструментальными методами в полевых условиях [9, 10, 11].

Методы исследований

В целях рационализации параметров БВР сотрудниками Института горного дела ДВО РАН, при содействии руководства и персонала ОАО «Амурвзрывпром» (АВП), 9 июня 2022 г. произведены измерения скоростей детонации трех скважинных зарядов при производстве массового взрыва на карьере по разработке черных сланцев «Краснореченский» (г. Хабаровск, МУП «Южное»).

Параметры БВР по взрывному блоку: объем взорванной горной массы – 9,032 тыс. м³; удельный расход ВВ – 0,78 кг/м³; группа грунтов по СНИП – 7; коэффициент крепости по шкале профессора М.М. Протодяконова – 7-8; наименование грунтов – черные сланцы; сетка скважин 3×3 м; длина (глубина) скважин – 6 м; величина перебура – 0,5 м; диаметр скважин – 115 мм; расход ВВ на блоке – 7,05 т; ЭВВ – Эмуласт АС-30ФП ТУ 7276-014-16359200-2004 (диаметр патрона – 90 мм); промежуточный детонатор (ПД) – Аммонит 6ЖВ-32 – 1 кг в первом скважинном заряде при проведении измерений (рис. 1), по 2 кг и 3 кг на 2 и 3 скважины соответственно; СИ скважинные – Искра-С-500-8/6/4; СИ поверхностные – Искра П-42-4; заряды, в которых проводилось измерение скоростей детонации, – сплошные с одним боевиком (рис. 2); заряды основного блока – рассредоточенные одним инертным (буровой шлам) промежуток, 1 кг ПД Аммонита 6ЖВ на нижнюю часть заряда и 1 кг ПД Аммонита 6ЖВ на верхнюю часть заряда; схема монтажа взрывной сети приведена на рис. 1; скорость детонации заряда Эмуласта-30ФП в стальной трубе диаметром 60×3 мм составляет 4400-4600 м/с (по паспорту), а критический диаметр в стальной оболочке – 40-50 мм.

Для сравнения со скважинными зарядами, в которых производились измерения СД (см. рис. 2), приведена конструкция заряда основного блока (рис. 3). Заряд трех скважин (в которых измеряли скорость детонации заряда ВВ) сформирован путем исключения инертного промежутка и верхнего боевика (аммонит 6ЖВ+ИскраС-500) при неизменной массе основного заряда. При этом масса боевика была распределена по трем скважинам, как было описано выше, а именно по 1, 2 и 3 кг, начиная с первой скважины от врубовой (стартовой).

ПРИМЕНЯЕМЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И ПРИНЦИП РАБОТЫ

Для измерений скорости детонации скважинного заряда ВВ применялись приборы VOD305 [12] производства Австралии (рис. 4) и ИВИ-4 производства ООО «КТБ Интервал», г. Новосибирск (рис. 5).

Принцип работы VOD-305 основан на методе импульсной рефлектометрии [13], а именно на эффекте изменения волнового сопротивления при уменьшении длины коаксиального кабеля, посредством непосредственного воздействия на проводник детонационной волны скважинного заряда. Имеется возможность замера скорости детонации заряда сразу нескольких скважинных зарядов на взрывном блоке.

Принцип работы прибора ИВИ-4 заключается в измерении временных интервалов между короткими замыканиями датчиков прохождения детонационной волны (ДВ). Датчики прохождения ДВ, установленные по длине столба заряда ВВ на заданном расстоянии друг от друга, срабатывают на замыкание поочередно посредством воздействия ДВ скважинного заряда. Датчики подключаются через высокочастотные разъемы BNC посредством коаксиального кабеля. В процессе измерения счетчик непрерывно инкрементируется. По сигналам на канальных входах содержимое счетчика переносится в соответствующий регистр. В качестве сигнала на входе воспринимается перепад напряжения (фронт). Вычислитель рассчитывает интервалы между срабатываниями каналов, результаты выводятся на дисплей. Декларируемая изготовителем погрешность измерения времени – $\pm 50 \text{ нс} \pm 0,001\%$. В данном измерении применялись два датчика прохождения детонационной волны в первой (стартовой) скважине на расстоянии 1,3 м друг от друга.

Производство измерений: скорости детонации заряда производились на трех скважинах (рис. 6), указанных выше в плане на схеме монтажа (см. рис. 1), в том числе в скважине № 1 были установлены датчики от ИВИ-4 и коаксиальный кабель от VOD305. В двух последующих скважинах – только коаксиальный кабель от VOD305.



Рис. 4. Измеритель скорости детонации VOD-305



Рис. 5. Измеритель временных интервалов ИВИ-4

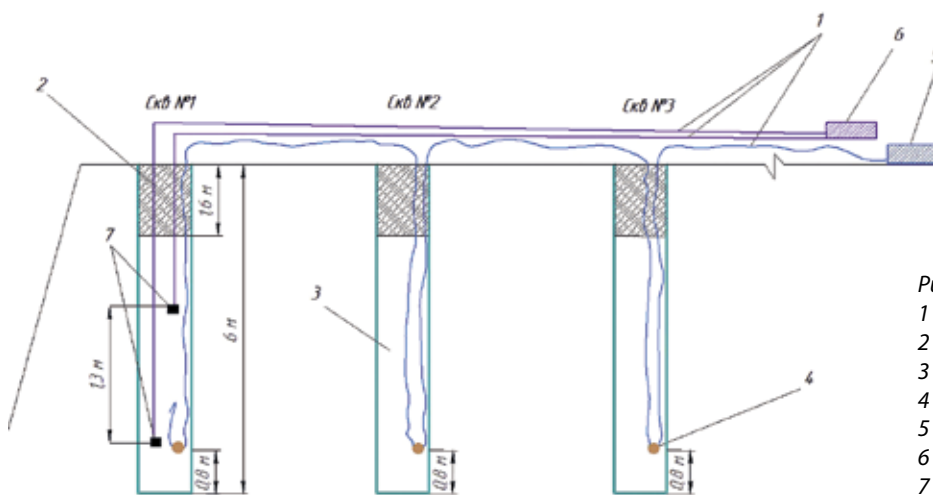


Рис. 6. Схема монтажа датчиков:
 1 – коаксиальный кабель;
 2 – забойка;
 3 – скважинный заряд;
 4 – утяжелитель для опускания кабеля;
 5 – прибор VOD305;
 6 – прибор ИВИ-4;
 7 – датчики к ИВИ-4



Рис. 7. Датчики (для ИВИ-4), закрепленные на концах рейки



Рис. 8. Монтаж коаксиального кабеля от скважин до приборов в открытиях: а – от скважин; б – к ИВИ-4; в – к VOD305

Таблица 1

Результат замера скорости детонации прибором ИВИ-4

Параметр	Значение
Расстояние между датчиками S , м	1,3
Интервал t , мкс	752,42
Скорость детонации V_d , м/с	1727,8



Рис.9. Фотофиксация временного интервала (752,42 мкс)

Для упрощения монтажа датчики от прибора ИВИ-4 опускались в скважину закрепленными к деревянной рейке заданной длины между ними (рис. 7).

На рис. 8 представлен монтаж коаксиального кабеля от скважин (см. рис. 8, а) до прибора ИВИ-4 (см. рис. 8, б) и до прибора VOD305 (см. рис. 8, в). При проведении измерений использовался коаксиальный кабель RG-6U.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

В результате измерения с применением ИВИ-4 (рис. 9) средняя скорость детонации между двумя датчиками, расположенными на расстоянии 1,3 м друг от друга в скважине №1, составила 1,73 км/с (табл. 1).

Результаты измерений скорости детонации (V_d) с применением VOD305 представлены на рис. 10, 11, 12.

СВОДНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

При проведении измерений получены следующие результаты средних скоростей детонации (табл. 2).

Результаты средних скоростей детонации при проведении измерений 30.06.2022 на карьере разработки андезито-базальтов ООО «Таежное» со схожими (представленными выше) параметрами БВР и изменением значений скорости детонации по высоте заряда приведены на рис. 3.

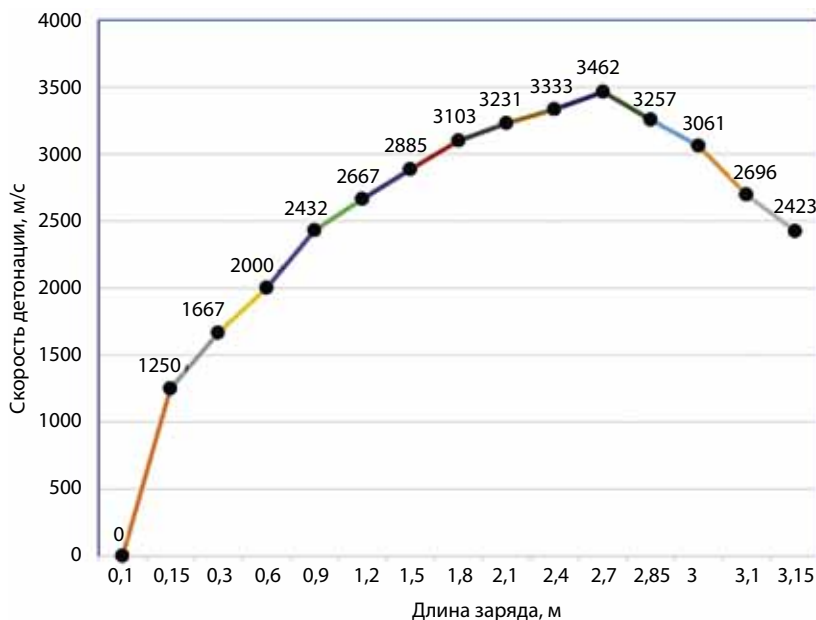


Рис.10. График скорости детонации заряда скважины № 1. Прибор VOD305

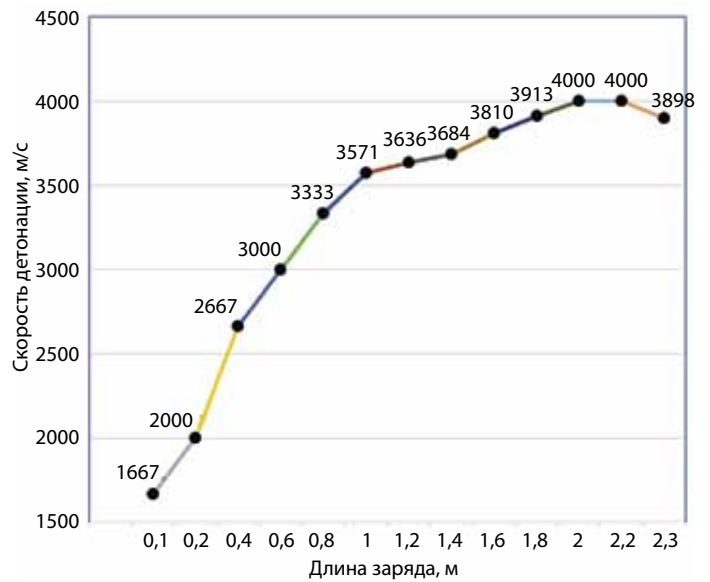
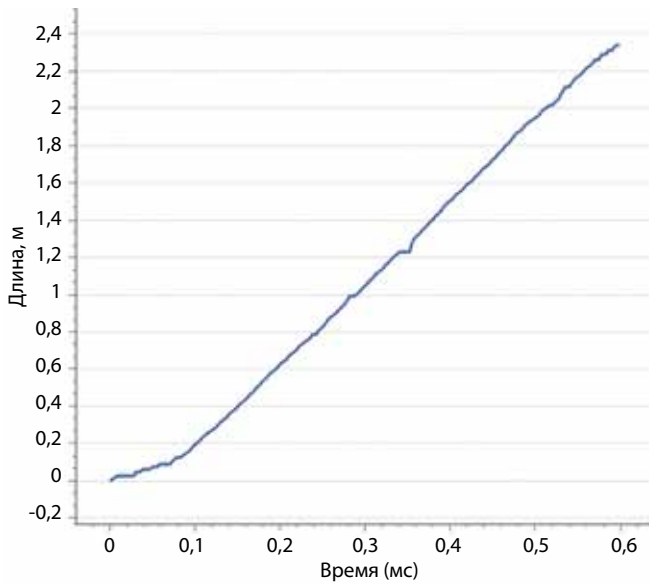


Рис.11. График скорости детонации заряда скважины № 2. Прибор VOD305

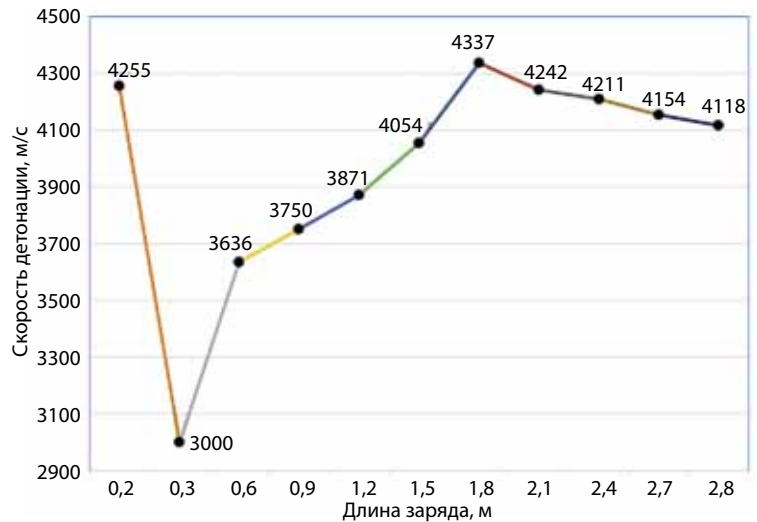
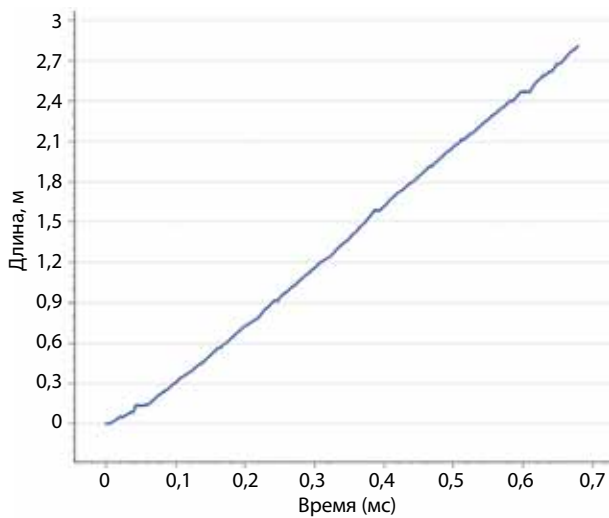


Рис.12. График скорости детонации заряда скважины № 3. Прибор VOD305

Таблица 2

Сводные данные по результатам измерений 09.06.2022

Параметр	Прибор	Скважина 1	Скважина 2	Скважина 3
Средняя скорость детонации, м/с	ИВИ-4	1727,8	–	–
Среднее значение скорости детонации на начальном отрезке скважины, равном 1,3 м, м/с	VOD305	1750,2	–	–
Среднее значение скорости детонации, м/с	VOD305	2438	3084	3636

Таблица 3

Сводные данные по результатам измерений 30.06.2022

Параметр	Прибор	Скважина 1	Скважина 2	Скважина 3
Средняя скорость детонации, м/с	ИВИ-4	1482,9	–	–
Среднее значение скорости детонации на начальном отрезке скважины, равном 1,0 м, м/с	VOD305	1505,0	–	–
Среднее значение скорости детонации, м/с	VOD305	2449	3448	4219

ВЫВОДЫ

На основании графиков значений скоростей детонации (см. рис. 10, 11, 12) сделаны следующие выводы:

– данные средних значений скоростей детонации на начальном отрезке (1,3 м) первого испытываемого заряда, измеренные разными приборами (ИВИ-4 и VOD305), совпадают, что говорит о высокой точности измерения приборов;

– с увеличением длины и массы промежуточного детонатора (в данном случае от 1 до 3 кг) соответственно повышаются скорость и устойчивость детонации по всему столбу заряда [14];

– судя по резкому «скачку» на графике (см. рис. 12), зафиксирована скорость детонации аммонита 6 ЖВ, так как длина боевика больше относительно длины боевиков двух других скважин. Предположительно можно говорить о фиксации изменения скорости детонации на границе взрывчатых веществ аммонита 6Ж и Эмуласта 30-ФП по колонке заряда;

– примерно через 2-2,5 м от начала инициирования заряда скорость детонации начинает снижаться;

– в целях формирования более полноценной статистики скоростей скважинных зарядов рекомендуется проведение дополнительных замеров скорости детонации, в том числе при разных параметрах БВР и схемах измерений.

Основываясь на результатах проведенных измерений, при неизменной сетке и глубине скважин, можно рекомендовать следующее:

– на неглубоких (до 6 м) скважинах применение сплошного заряда вместо рассредоточенного;

– применение одного боевика вместо двух;

– расположение боевика по центру скважинного заряда;

– увеличение массы промежуточного детонатора (например, вместо двух ПД по 1 кг принимается один ПД, равный 2 кг).

Реализация полученных результатов позволит получить экономический эффект, заключающийся в: уменьшении трудоемкости заряжания скважин; снижении в два раза количества скважинных средств инициирования Искра-С-500; повышении уровня качества и безопасности подготовки горной массы к выемке; повышении устойчивой детонации скважинного заряда.

В заключение следует отметить, что, так как БВР ведутся в неоднородной среде с большим процентом применения смесевых ВВ, работу по рационализации и уточнению соответствующих параметров с применением инструментальных замеров рекомендуется проводить на постоянной основе с привлечением специализированных организаций. Это позволит повысить уровень эффективности подготовки горной массы к выемке.

Список литературы

1. Mesec Josip, Zganec Stjepan, Kovac Ivan. In-hole velocity of detonation (VOD) measurements as a framework for the selection type of explosive // International Journal of Mining Science and Technology. 2015. Vol. 25. Is. 4. P. 675-680.
2. Кутуев В.А., Меньшиков П.В., Жариков С.Н. Анализ методов исследования детонационных процессов ВВ // Проблемы недропользования. 2016. № 4. С. 78-87.
3. Innovative method to measure velocity of detonation by electromagnetic pulse (EMP) / M. Seo, B. Rutter, C.E. Johnson et al. / Helsinki Conference Proceedings. 2019. P. 263-273.
4. Горинов С.А. Научно-технические основы и технологии обеспечения устойчивой детонации эмульсионных взрывчатых веществ в скважинных зарядах: дис. ... доктора техн. наук. Екатеринбург: Институт горного дела Уральского отделения РАН, 2018. 299 с.
5. Mechanism of the in-hole detonation wave interactions in dual initiation with electronic detonators in bench blasting operation / Zhendong Leng, Jinshan Sun, Wenbo Lu et al. // Computers and Geotechnics. 2021. Vol. 129.
6. Шведов К.К., Анисимов В.Н. Концепция и реальные пути создания промышленных взрывчатых веществ для качественно-дробления горных пород // Горная промышленность. 2008. № 1. С. 26.
7. Соснин В.А., Межеричкий С.Э., Печенер Ю.Г. Состояние и перспективы развития промышленных взрывчатых веществ в России и за рубежом // Горная промышленность. 2017. № 5. С. 60-64.
8. Добрынин И.А. Результаты измерения скорости детонации в скважинных зарядах в условиях горных предприятий // Безопасность труда в промышленности. 2008. № 6. С. 42-46.
9. Eugie Kabwe: Velocity of detonation measurement and fragmentation analysis to evaluate blasting efficacy // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2018. Vol. 10. Is. 3. P. 523-533.
10. Modelling the Source of Blasting for the Numerical Simulation of Blast-Induced Ground Vibrations / Daniel Ainalis, Olivier Kaufmann, Jean-Pierre Tshibangu et al. // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2017. No 50. P. 171-193.
11. Balakrishnan V., Pradhan M., Dhekne P.Y. Field investigation in the detonation behavior of emulsion explosive column induced with air gaps // Mining Science. 2019. Vol. 26. P. 55-68.
12. SHOTTRACK. [Electronic resource]. Available at: www.shottrack.com.au/product/shottrack-vod-305 (accessed 15.10.2022).
13. Дьяконов В.П. Рефлектометрия и импульсные рефлектометры // Компоненты и технологии. 2012. № 1. С. 164-172.
14. Горинов С.А., Маслов И.Ю. Иницирование ЭВВ когерентными промежуточными детонаторами // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017. № 4. С. 293-304.

Original Paper

UDC 662.1/4:622.235 © A.A. Galimyanov, D.E. Gerasimov, K.V. Gevalo, V.I. Mishnev, A.A. Galimyanov, 2022
 ISSN 0041-5790 (Print) • ISSN 2412-8333 (Online) • Ugol' – Russian Coal Journal, 2022, № 11, pp. 55-61
 DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2022-11-55-61>

Title**FACTORS AFFECTING THE DETONATION VELOCITY OF AN EXPLOSIVE CHARGE****Authors**

Galimyanov A.A.¹, Gerasimov D.E.², Gevalo K.V.¹, Mishnev V.I.¹, Galimyanov A.A.¹

¹ Institute of Mining Engineering of the Khabarovsk Federal Research Center,
 the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, 680000, Russian Federation

² Amurvzryprom JSC, Khabarovsk, 680020, Russian Federation

Authors information

Galimyanov A.A., PhD (Engineering), Leading Research Associate,
 Head of Rock Disintegration Sector, e-mail: azot-1977@mail.ru

Gerasimov D.E., Director General, e-mail: amur_vzriv_prom@mail.ru

Gevalo K.V., Engineer of Rock Disintegration Sector,
 e-mail: igddvo@yandex.ru

Mishnev V.I., Engineer of Rock Disintegration Sector,
 e-mail: vovchenskiycf@gmail.com

Galimyanov A.A., Leading Engineer of Rock Disintegration Sector,
 e-mail: stanxi@mail.ru

Abstract

In the production of explosive works, it is important not only to control the input of explosive materials when they arrive at the enterprise from the supplier, but also to measure the detonation rate of the charge in the field, especially mixed emulsion explosives. The detonation rate of the explosive charge, as one of its most important characteristics affecting the quality of the explosion, depends on many factors, the main of which are: the quality of preparation of explosives and their components, the density, diameter and height of the charge column, the parameters of the intermediate detonator and its location along the length of the charge. The correct approach with the use of appropriate preliminary measurements will improve the efficiency and safety of preparing the rock mass for excavation by drilling and blasting. The article presents a methodology for measuring the detonation rates of a borehole charge with the corresponding results and conclusions.

Keywords

Measurement of the detonation rate of the explosive charge, Measuring instruments, Parameters of drilling and blasting operations, The design of the borehole charge, Time intervals, Pulse reflectometry.

References

- Mesec Josip, Zganec Stjepan & Kovac Ivan. In-hole velocity of detonation (VOD) measurements as a framework for the selection type of explosive. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2015, Vol. 25, (4), pp. 675-680.
- Kutuev V.A., Menshikov P.V. & Zharikov S.N. Analysis of research methods of detonation processes of explosives. *Problems of subsoil use*, 2016, (4), pp. 78-87. (In Russ.).
- Seo M., Rutter B., Johnson C.E., Torrance A. & Cavanough G. Innovative method to measure velocity of detonation by electromagnetic pulse (EMP). Helsinki Conference Proceedings, 2019, pp. 263-273.
- Gorinov S.A. Scientific and technical bases and technologies for ensuring stable detonation of emulsion explosives in borehole charges. Dr. eng. sci. diss. Yekaterinburg, Institute of Mining of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2018, 299 p. (In Russ.).

5. Zhendong Leng, Jinshan Sun, Wenbo Lu, Xianqi Xie, Yongsheng Jia, Guisong Zhou & Ming Chen. Mechanism of the in-hole detonation wave interactions in dual initiation with electronic detonators in bench blasting operation. *Computers and Geotechnics*, 2021, Vol. 129.

6. Shvedov K.K. & Anisimov V.N. The concept and real ways of creating industrial explosives for high-quality crushing of rocks. *Gornaya promyshlennost*, 2008, (1), pp. 26. (In Russ.).

7. Sosnin V.A., Mezheritsky S.E. & Pechener Yu.G. The state and prospects of development of industrial explosives in Russia and abroad. *Gornaya promyshlennost*, 2017, (5), pp. 60-64. (In Russ.).

8. Dobrynin I.A. Results of measurement of detonation velocity in borehole charges in mining enterprises. *Bezopasnost truda v promyshlennosti*, 2008, (6), pp. 42-46. (In Russ.).

9. Eugie Kabwe. Velocity of detonation measurement and fragmentation analysis to evaluate blasting efficacy. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2018, Vol. 10, (3), pp. 523-533.

10. Daniel Ainalis, Olivier Kaufmann, Jean-Pierre Tshibangu, Olivier Verlinden & Georges Kouroussis. Modelling the Source of Blasting for the Numerical Simulation of Blast-Induced Ground Vibrations. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2017, (50), pp. 171-193.

11. Balakrishnan V., Pradhan M. & Dhekne P.Y. Field investigation in the detonation behavior of emulsion explosive column induced with air gaps. *Mining Science*, 2019, (26), pp. 55-68.

12. SHOTTRACK. [Electronic resource]. Available at: www.shottrack.com.au/product/shottrack-vod-305 (accessed 15.10.2022).

13. Diakonov V.P. Reflectometry and pulse reflectometers. *Componenty i tekhnologii*, 2012, (1), pp. 164-172. (In Russ.).

14. Gorinov S.A. & Maslov I.Yu. Initiation of EVV by coherent intermediate detonators. *Gornyj informatsionno-analyticheskij byulleten*, 2017, (4), pp. 293-304. (In Russ.).

Acknowledgements

The studies were carried out using the resources of the Center for Shared Use of Scientific Equipment "Center for Processing and Storage of Scientific Data of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences", funded by the Russian Federation represented by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under project No. 075-15-2021-663.

For citation

Galimyanov A.A., Gerasimov D.E., Gevalo K.V., Mishnev V.I. & Galimyanov A.A. Factors affecting the detonation velocity of an explosive charge. *Ugol'*, 2022, (11), pp. 55-61. (In Russ.). DOI: [10.18796/0041-5790-2022-11-55-61](https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-11-55-61).

Paper info

Received September 7, 2022

Reviewed September 29, 2022

Accepted October 26, 2022