

Методика измерения детонационных характеристик эмульсионных ВВ и экспресс-определения прочностных свойств горных пород

В.Л. Яковлев, советник РАН, чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник Института горного дела УрО РАН
С.Н. Жариков, канд. техн. наук, заведующий лабораторией, ведущий научный сотрудник Института горного дела УрО РАН
А.С. Реготунов, канд. техн. наук, старший научный сотрудник Института горного дела УрО РАН
В.А. Кутуев, научный сотрудник Института горного дела УрО РАН

Производство буровзрывных работ на горнодобывающих предприятиях ведется в условиях неопределенности информации о прочностных свойствах горных пород. Это влияет как на выбор проектных параметров БВР, так и на результаты взрывного разрушения блока. На практике сопротивляемость горных пород в процессах бурения и взрывания оценивается по классификациям, в основе которых

лежат различные классификационные признаки, например, буримость, взрываемость, энергоемкость (линейная или объемная) [1]. Классификации позволяют определять удельный расход ВВ и ожидаемую производительность применяемого бурового станка. Однако на деле принятые технологические параметры приходится часто корректировать [2–4], так как в существующих классификациях, во-первых, категории признаков вклю-

Методика измерения детонационных характеристик эмульсионных ВВ и экспресс-определения прочностных свойств горных пород

В.Л. Яковлев, e-mail: yakovlev@igduran.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5860-9626>
С.Н. Жариков, e-mail: 333vista@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0322-9973>
А.С. Реготунов, e-mail: pochta8400@inbox.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5503-9397>
В.А. Кутуев, e-mail: 9634447996@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8423-0246>

Аннотация: В статье представлена методика измерения детонационных характеристик эмульсионных взрывчатых веществ и экспресс-определения прочностных свойств горных пород для комплексной адаптации параметров буровзрывных работ к изменяющимся горно-геологическим условиям разработки сложноструктурных месторождений полезных ископаемых открытым способом. Разработанная методика позволяет: установить параметры регистрируемых сигналов при шарошечном бурении скважин, характеризующих нарушения в местах контактов горных пород с различными физико-механическими свойствами; определить в рамках опытно-промышленных испытаний закономерности развития детонации в гильзовых и скважинных зарядах ВВ разного диаметра, а также при использовании промежуточных детонаторов с различной массой; установить места рационального расположения промежуточных детонаторов при встречном инициировании скважинных зарядов ВВ. Получение данных процесса шарошечного бурения скважин на локальном выемочном блоке производится при помощи устанавливаемого на буровой станок опытного устройства, разработанного специалистами ИГД УрО РАН. Измерения скорости детонации в промышленных условиях на специальном полигоне или в карьере осуществляются аппаратурой отечественного и зарубежного производства. По измеренным данным путем построения устанавливаются регрессионные уравнения. Полученные уравнения позволяют определить значения скорости детонации заряда ЭВВ при известной плотности заряжения, что дает возможность путем регулирования плотности при смешении компонентов ВВ обеспечить нужное детонационное давление для качественного разрушения конкретного массива горных пород.

Ключевые слова: разрушение горных пород, определение прочностных свойств горных пород, скорость детонации ЭВВ, методика измерения, детонационные характеристики ВВ, адаптация параметров БВР, измерительная аппаратура, цифровые модели

The method of measuring the detonation characteristics of emulsion explosives and express determination of the strength properties of rocks

V.L. Yakovlev, S.N. Zharikov, A.S. Regotunov, V.A. Kutuev

Abstract: The article presents a method for measuring the detonation characteristics of emulsion explosives and express determination of the strength properties of rocks for the complex adaptation of drilling and blasting parameters to the changing mining and geological conditions of the development of complex-structured mineral deposits by an open method. The developed technique allows: to set the parameters of the recorded signals during the spherical drilling of wells, characterizing violations in the places of contact of rocks with various physical and mechanical properties; to determine, within the framework of pilot tests, the patterns of detonation development in sleeve and borehole explosive charges of different diameters, as well as when using intermediate detonators with different weights; to establish the locations of the rational location of intermediate detonators during the counter initiation of borehole explosive charges. Data on the process of spherical drilling of wells at a local excavation unit is obtained using an experimental device installed on a drilling rig, developed by specialists of IM UB RAS. Measurements of the detonation rate in industrial conditions at a special landfill or in a quarry are carried out with equipment of domestic and foreign production. Based on the measured data, regression equations are established by construction. The obtained equations make it possible to determine the value of the detonation rate of the charge of an emulsion explosive at a known charging density, which makes it possible, by adjusting the density when mixing explosive components, to provide the necessary detonation pressure for the qualitative destruction of a specific rock mass.

Keywords: destruction of rocks, determination of the strength properties of rocks, the detonation rate of explosives, measurement methods, detonation characteristics of explosives, adaptation of drilling and blasting parameters, measuring equipment, digital models

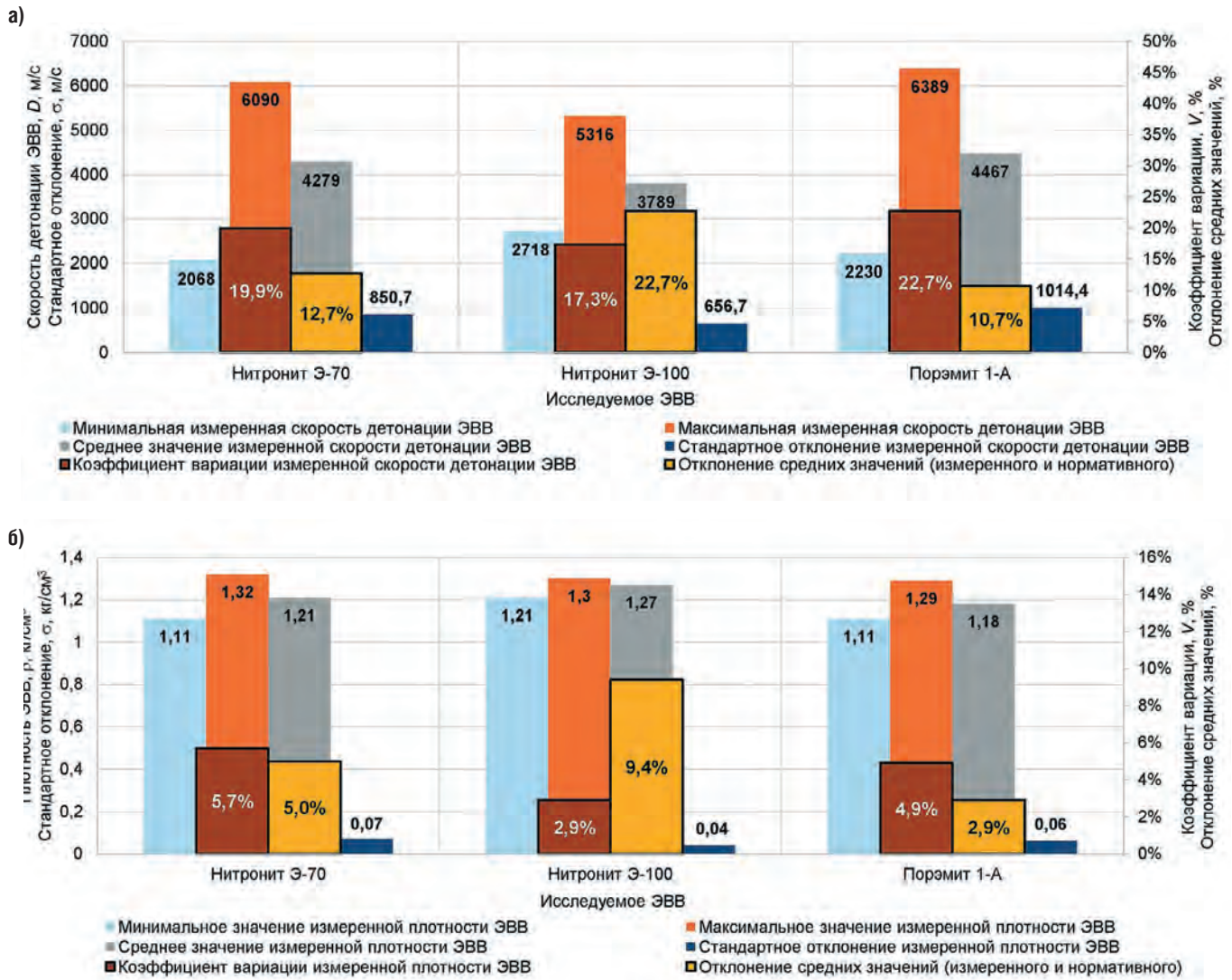


Рис. 1 Отклонения измеренных данных скорости детонации (а) и плотности (б) ЭВВ от средних и нормативных значений

чают достаточно широкий спектр горных пород по прочностным свойствам, из-за чего горная порода одного наименования меньшей прочности относится к той же категории, что и порода такого же наименования, но с большей прочностью [5, 6], а во-вторых, при оценке категории взрываемости массива горных пород рассматривают расстояние между трещинами основных систем, но не учитывают другие их параметры.

Анализ методик [7–14] расчета скорости детонации ($D_{ВВ}$) ВВ показал, что результаты оказываются завышенными либо существенно заниженными по отношению к экспериментально измеренным значениям по отдельным видам эмульсионных взрывчатых веществ (ЭВВ) [15]. Кроме того, исследования показали, что паспортные значения скорости детонации и плотности ЭВВ в промышленных условиях могут существенно отличаться от фактических значений, измеренных в скважинах на взрывном блоке и в гильзах на специализированном полигоне (рис. 1).

Таким образом, для повышения точности и достоверности горно-геологической информации о массиве горных пород, который подготавливается к буровзрывному разрушению, требуется специальная методика измерения. Она должна обеспечивать установление взаимосвязей между характеристиками процесса бурения скважин и параметрами, характеризующими технологические и геологические особенности строения массива

горных пород. Это позволит создавать модели выемочных блоков с указанием распределения прочностных свойств горных пород в плане, продольных и поперечных разрезах. Указанные модели будут применяться в дальнейшем для уточнения параметров скважинных зарядов ВВ. Кроме того, необходимо разработать подход к уточнению расчета паспортной скорости детонации на основе корреляционных зависимостей, полученных экспериментально непосредственно во время производства взрывных работ в карьере.

Порядок выполнения измерений детонационных характеристик промышленных ЭВВ

Измерения $D_{ВВ}$ в заряде ВВ осуществляют методами короткого замыкания [16] и импульсной рефлектометрии [17–24] с использованием специализированных регистраторов отечественного [25] и зарубежного [26, 27] производства. Комплект оборудования для измерения скорости детонации ВВ включает: измерительные кабель или датчики, коаксиальный радиочастотный кабель типа РК, блок регистрирующей аппаратуры. На рис. 2–4 представлен порядок выполнения измерений $D_{ВВ}$ ЭВВ в условиях специального полигона в гильзовом заряде или «рукаве», а также на взрывном блоке в одной или нескольких скважинах. На рис. 5 указаны наглядные схемы измерения

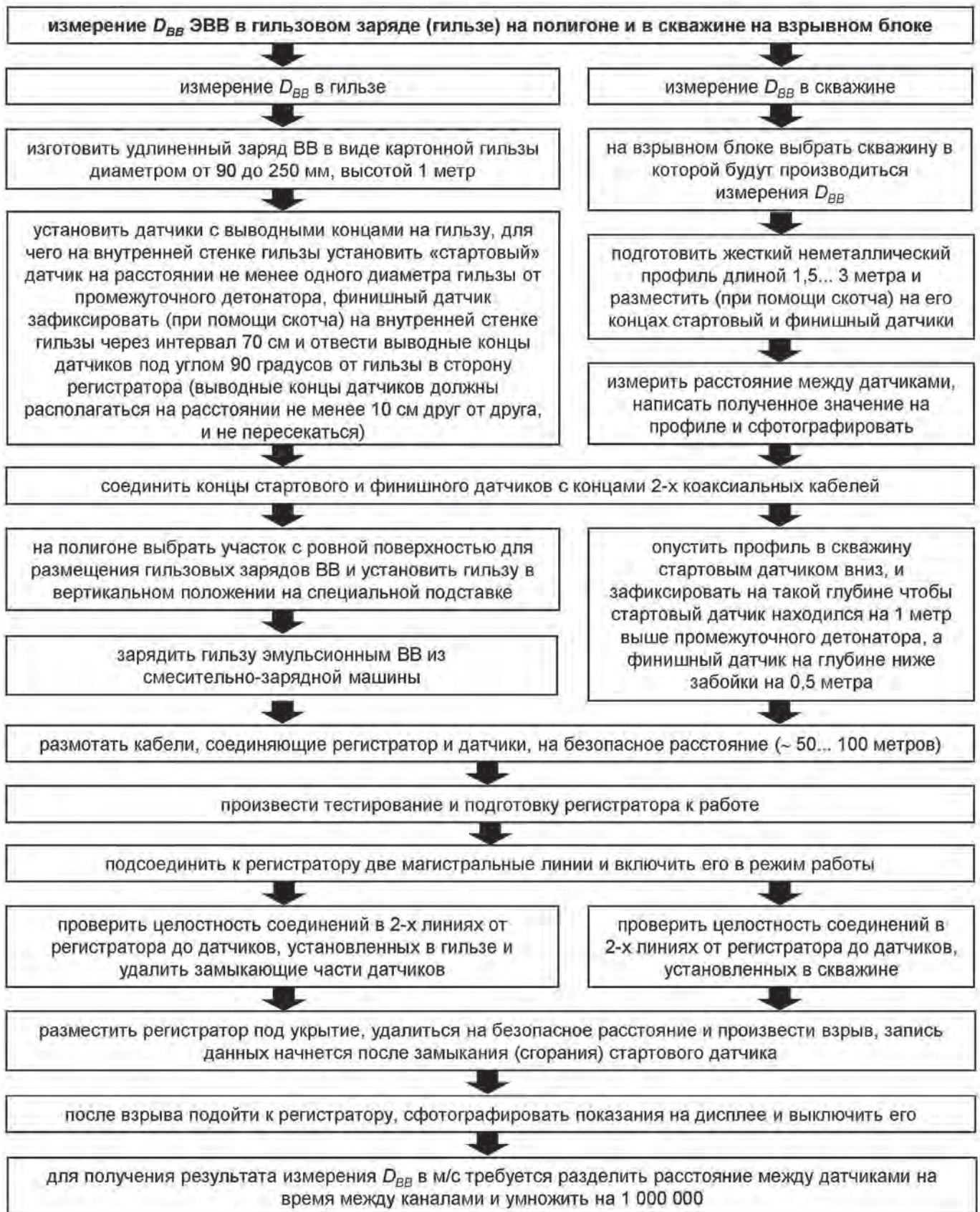


Рис. 2 Порядок выполнения измерений D_{BB} ВВ в условиях карьера и полигона с использованием отечественной аппаратуры



Рис. 3 Порядок выполнения измерений DBB ВВ в условиях полигона с использованием зарубежной аппаратуры

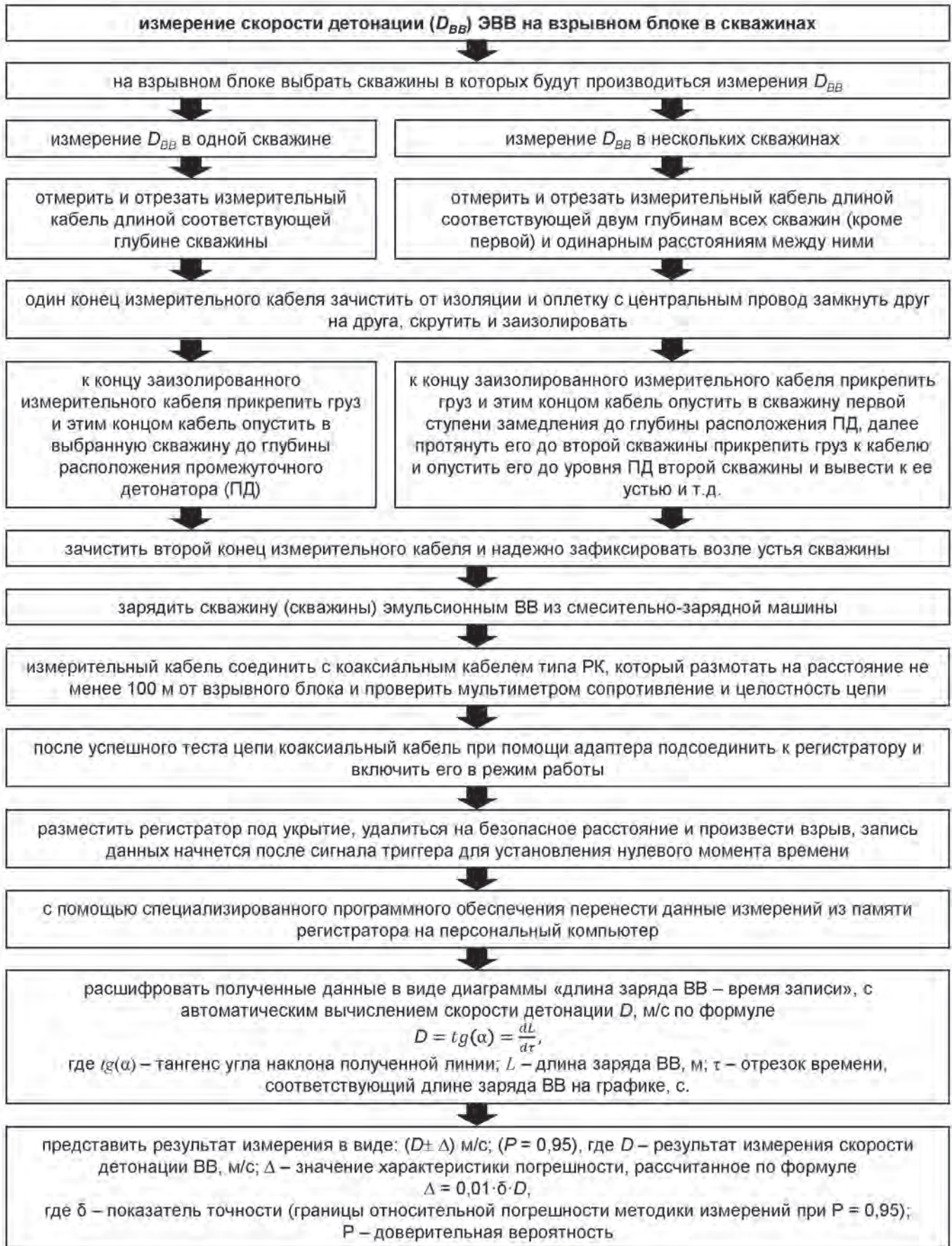


Рис. 4 Порядок выполнения измерений DBB ВВ в условиях карьера с использованием зарубежной аппаратуры

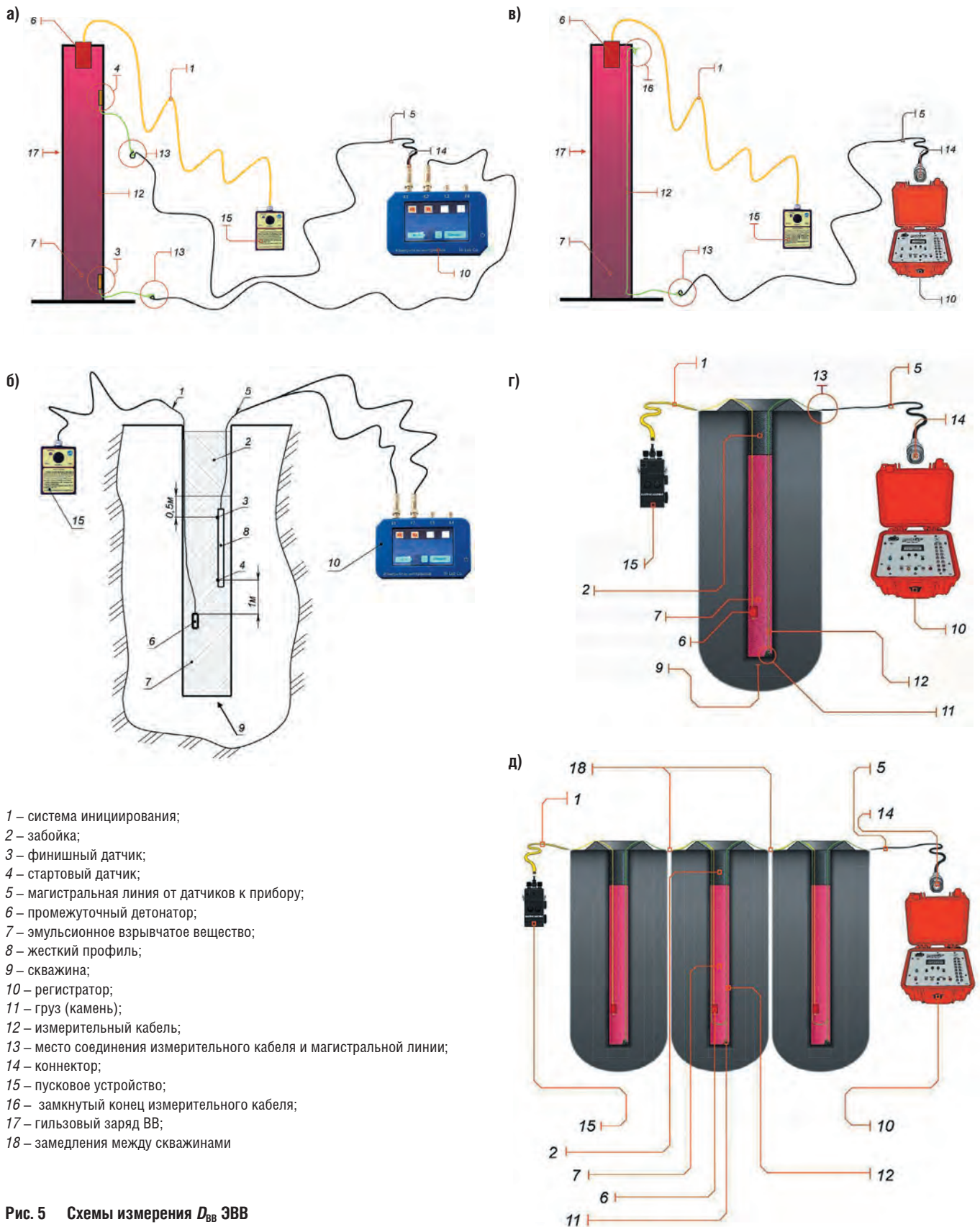


Рис. 5 Схемы измерения $D_{ВВ}$ ЭВВ отечественным регистратором в гильзовом заряде (а) и скважине (б), а также зарубежным регистратором в гильзовом заряде (в), одной скважине (г) и нескольких скважинах (д)

скорости детонации ЭВВ отечественным регистратором в гильзовом заряде (а) и скважине (б), а также зарубежным регистратором в гильзовом заряде (в), одной скважине (г) и нескольких скважинах (д).

В результате измерений строятся зависимости скорости детонации от плотности ЭВВ для конкретного диаметра заряда и устанавливаются регрессионные уравнения (рис. 6). Полученные уравнения позволяют определить значение скорости детонации заряда ЭВВ при известной плотности заряжания, что дает

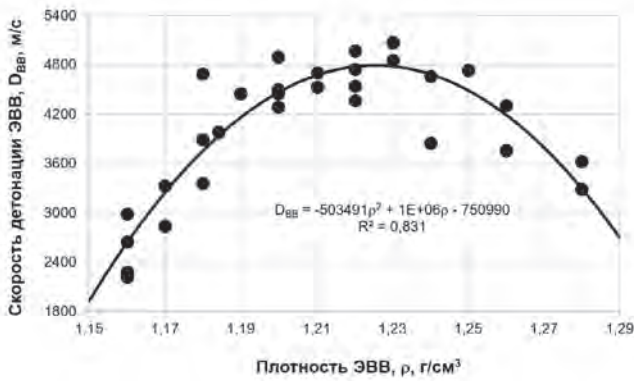


Рис. 6 Пример зависимости $D_{ВВ}$ от плотности ЭВВ Порэмит 1А для зарядов $\varnothing 100$ мм [17]

возможность путем регулирования плотности при смешении компонентов обеспечить нужное детонационное давление для качественного разрушения конкретного массива горных пород.

Порядок экспресс-определения прочностных свойств горных пород в процессе шарошечного бурения взрывных скважин

Вначале определяются рациональные параметры технологии бурения и бурового инструмента. Далее шарошечный буровой станок производит бурение скважин по проекту БВР. В процессе бурения скважин шарошечное долото проходит различные по прочности и строению горные породы. Одновременно специальное устройство измеряет электрические параметры двигателей бурового станка и регистрирует время и глубину бурения каждой скважины.

Получение первичных данных (дата и время измерения; напряжение якоря двигателя вращателя; ток якоря двигателя вращателя; ток статора двигателя вращателя; давление в гидроцилиндрах; глубина бурения) осуществляется через сервер электронной почты. Для этого через Web-интерфейс или любую почтовую программу подключаются к серверу и загружают файлы данных в формате MS Excel на компьютер.

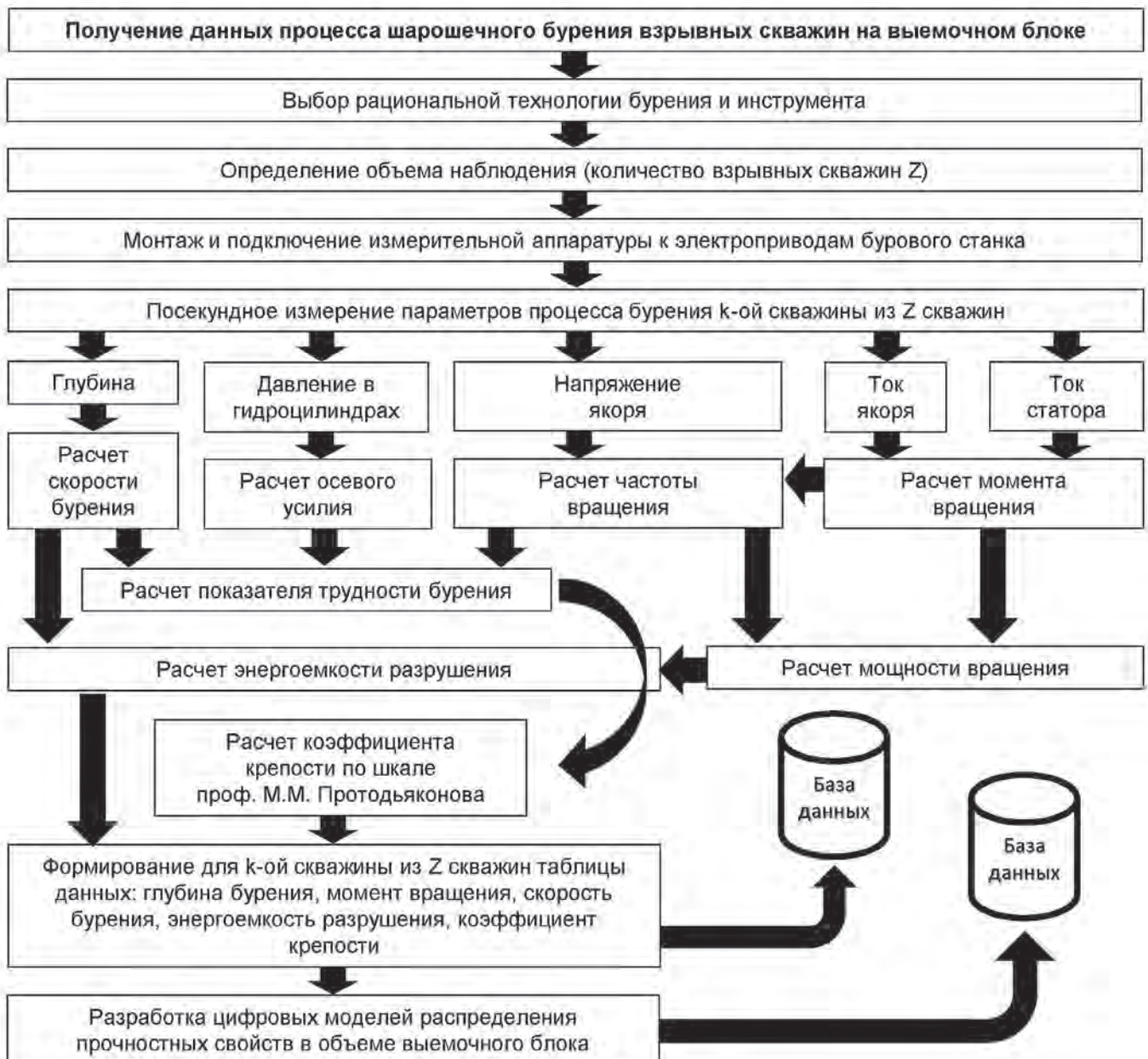


Рис. 7 Порядок получения данных процесса бурения скважин на блоке

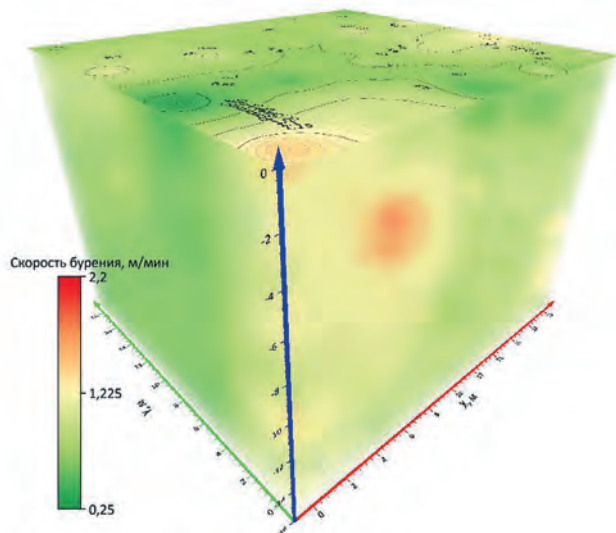


Рис. 8 Объемная модель, характеризующая распределение прочностных свойств горных пород в выемочном блоке

Первичные данные используются для последующего расчета параметров процесса шарошечного бурения взрывных скважин согласно порядку, представленному на рис. 7. Результаты расчета в дальнейшем являются основой для анализа процесса шарошечного бурения и построения цифровых объемных моделей расположения горных пород с различными прочностными свойствами в границах локального выемочного блока карьера (рис. 8).

Заключение

Разработана методика измерения детонационных характеристик эмульсионных ВВ и экспресс-определения прочностных свойств горных пород для комплексной адаптации параметров БВР к изменяющимся горно-геологическим условиям. Методика измерения позволяет: установить параметры записываемых сигналов при бурении, характеризующих нарушения в местах контактов горных пород с различными физико-механическими свойствами; определить в рамках испытаний закономерности развития детонации в гильзовых и скважинных зарядах ВВ разного диаметра, а также при использовании промежуточных детонаторов с различной массой; установить закономерности протекания детонации при встречном инициировании скважинных зарядов ВВ. Методика обеспечивает получение информации, необходимой для начала процесса адаптации параметров БВР к изменяющимся условиям.

Благодарность

Авторы выражают благодарность сотрудникам лаборатории разрушения горных пород ИГД УрО РАН П.В. Меньшикову, А.С. Флягину за сбор и предоставление экспериментальных данных, Д.А. Граценко за построение цифровой модели.

Исследования выполнены в рамках Государственного задания №075-00412-22 ПР, темы 1 (2022–2024): Методологические основы стратегии комплексного освоения запасов месторождений твердых полезных ископаемых в динамике развития горнотехнических систем (FUWE-2022–0005), рег. №1021062010531-8-1.5.1, а также при дополнительном привлечении хозяйственных средств.

Список литературы / References

1. Трубецкой К.Н., Потанов М.Г., Виницкий К.Е., Мельников Н.Н. Открытые горные работы: Справочник. М.: Горное бюро; 1994. 590 с.
2. Ишейский В.А., Рядинский Д.Э., Магомедов Г.С. Повышение качества дробления горных пород взрывом за счет учета структурных особенностей взрываемого массива. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023;(9-1):79-95. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_91_0_79
3. Bakhtavar E., Abdollahisharif J., Mohammadi D. Analysis and improvement of blasting operation in porphyry, diorite dyke, and trachyte Sungun zones: In-situ investigations. International Journal of Mining and Geo-Engineering. 2022;56(1):19-24. <https://doi.org/10.22059/IJMG.2021.272288.594772>.
4. Rahimdel M.J., Aryafar A., Tavakkoli E. Selection of the most proper drilling and blasting pattern by using MADM methods (A case study: Sangam Iron Ore Mine, Iran). The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin. 2020;35(3):97-108. <https://doi.org/10.17794/rgn.2020.3.10>.
5. Танаинов А.С. Сопоставление икал классификаций горных пород по буримости. Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2006;3(54):34-38.
6. Карпов В.Н., Тимонин В.В. О важности заблаговременной коррекции параметров главных рабочих органов ударно-вращательного бурения к условиям породного массива месторождений полезных ископаемых. Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. 2017;4(1):15-22.
7. Андреев С.Г. и др. Физика взрыва. М.: Физматлит; 2002. Т.1. 823 с.; Т.2. 644 с.
8. Горбонос М.Г. Методические указания по практическим занятиям и выполнению самостоятельных работ по дисциплине «Технология и безопасность взрывных работ». Петрозаводск: Петрозаводский государственный университет; 2011. 51 с.
9. Кривченко А.Л., Кривченко Д.А., Чуркин О.Ю. О принципах расчета параметров детонации в конденсированных и газовых системах. Наука и современность. 2010;(1-2):166-171.
10. Дремин А.Н., Савров С.Д., Трофимов В.С., Шведов К.К. Детонационные волны в конденсированных средах. М.: Наука; 1970. 164 с.
11. Кривченко А.Л. Метод расчета параметров детонации конденсированных взрывчатых веществ. Физика горения и взрыва. 1984;(3):83-86.
12. Юхансон К., Персон П. Детонация взрывчатых веществ. М.: Мир; 1973. 352 с.
13. Вопросы теории взрывчатых веществ: сб. статей. Москва; Ленинград: Изд-во Академия наук СССР; 1947. 188 с.
14. Кутузов Б.Н. Разрушение горных пород взрывом: учебник для вузов. М.: Изд-во МГИ; 1992. 516 с.
15. Меньшиков П.В., Кутуев В.А., Жариков С.Н. Анализ результатов исследований методик расчета скорости детонации взрывчатых веществ. Проблемы недропользования. 2022;3(34):91-103. <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2022.03.091>.
16. Методика обеспечения качества заряда наливного эмульсионного взрывчатого вещества в обводненных скважинах / Ал.А. Галимьянов, О.И. Черских, А.В. Рассказова и др. Уголь. 2024;(1):100-108. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2024-1-100-108>.
17. Меньшиков П.В., Жариков С.Н., Кутуев В.А. Определение ширины зоны химической реакции промышленного эмульсионного взрывчатого вещества порамит 1А на основе принципа неопределенности в квантовой механике. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2021;(5-2):121-134. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_52_0_121.
18. Кутуев В.А., Флягин А.С., Жариков С.Н. Исследование детонационных характеристик ПЭВВ НПГМ с различными исходными компонентами эмульсии при инициировании зарядов разными промежуточными детонаторами. Известия Тульского государственного университета. Наука о Земле. 2021;(3):175-187. <https://doi.org/10.46689/2218-5194-2021-3-1-169-181>.
19. Маслов И.Ю., Пупков В.В., Кампель Ф.П. и др. Метод непрерывного измерения скорости детонации зарядов промышленных ВВ. Взрывное дело. 2006;(96/53):101-113.
20. Иляхин С.В., Маслов И.Ю., Брагин П.А. Элементарная теория измерительного кабеля при резистивном методе измерения скорости детонации взрывчатых веществ. Известия Уральского государственного горного университета. 2019;4(56):104-108.
21. Маслов И.Ю., Пупков В.В., Кампель Ф.П. и др. Определение фактической скорости детонации и работоспособности новых эмульсионных ВВ с целью выбора рациональной плотности заряжания при взрывоподготовке железных руд. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2003;(5):56-60.
22. Feng X.J., Zhao J., Tian X. Experimental Study of the Deflagration to Detonation Transition for Four Kinds of Typical Explosives. Huozhayaao Xuebao. Chinese Journal of Explosives and Propellants. 2018;(41):72-76. <https://doi.org/10.14077/j.issn.1007-7812.2018.01.014>.
23. Pooley J., Price E., Ferguson J., Ibsen M. Detonation Velocity Measurements Using Rare-Earth Doped Fibres. Sensors. 2019;(19):1697. <https://doi.org/10.3390/s19071697>.
24. Мишинев В.И., Плотников А.Ю., Галимьянов Ал.А., Казарина Е.Н., Галимьянов Ан.А., Гевало К.В. Влияние эмульсионных взрывчатых веществ на скорость детонации скважинного заряда. Горная промышленность. 2022;(6):69-73. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-6-69-73>.
25. Измеритель микросекундных интервалов времени ИВИ-4. Руководство по эксплуатации. Россия, Новосибирск: ООО КТБ «Интервал»; 2021. 13 с.
26. DataTrap II DATA/VOD Recorder. Operator Manual. Canada: MREL Group of Companies Limited. Edition 3.0; 2013. P. 102.
27. SHOTTRACK VOD-305. URL: https://www.shottrack.com.au/wp-content/uploads/2020/10/2020_VoD305_Info.pdf (дата обращения: 24.06.2024).