

УДК 622.235

Жариков Сергей Николаевич

кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник,
заведующий лабораторией,
Институт горного дела УрО РАН,
620075, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58
e-mail: 333vista@mail.ru

Реготунов Андрей Сергеевич

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: pochta8400@inbox.ru

Кутуев Вячеслав Александрович

научный сотрудник,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: 9634447996@mail.ru

**СОВРЕМЕННЫЕ НАУЧНЫЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ ЛАБОРАТОРИИ
РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ИГД УрО РАН
И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ РАЗВИТИЯ****Аннотация:*

В направлении совершенствования методов учета переходных процессов в буровзрывных работах установлена зависимость скорости сейсмических колебаний от приведенного расстояния для условий Карагайского карьера (ПАО «Комбинат Магнезит»). В результате анализа многолетних данных фактических измерений сейсмичности взрывов, полученных лабораторией разрушения горных пород ИГД УрО РАН на различных месторождениях Урала, Сибири и ближнего зарубежья установлены и приводятся средние отклонения фактических колебаний от расчетных значений при различных коэффициентах грунтовых условий. Разработана и представлена номограмма, которая позволяет при известной скорости продольной волны в массиве и предполагаемом коэффициенте структурного ослабления определить допустимую скорость сейсмических колебаний массива горных пород в естественном залегании. Обозначены подходы для перехода к технологии отработки сложноструктурных пластовых месторождений, обеспечивающие требуемую кусковатость. Приведены результаты изучения детонационных характеристик промышленного эмульсионного взрывчатого вещества (ПЭВВ) порэмит 1А и ПЭВВ НПГМ и влияния на них средств иницирования различных производителей. Представлены основные факторы, влияющие на износостойкость опор шарошечных долот. Предложены направления развития дальнейших исследований лаборатории разрушения горных пород в рамках Государственного задания 2022 – 2024 гг.

Ключевые слова: разрушение горных пород, переходные процессы, буровзрывные работы, открытые горные работы, параметры БВР, детонационные характеристики ПЭВВ, волновые процессы в горных породах.

DOI: 10.25635/2313-1586.2022.03.073

Zharikov Sergey N.

Candidate of Technical Sciences,
Leading Researcher, Head of laboratory,
Institute of Mining UB RAS,
620075 Ekaterinburg,
58 Mamina-Sibiryaka Str.,
e-mail: 333vista@mail.ru

Regotunov Andrey S.

Candidate of Technical Sciences,
Senior Researcher,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS
e-mail: pochta8400@inbox.ru

Kutuev Vyacheslav A.

Researcher,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS
e-mail: 9634447996@mail.ru

**MODERN SCIENTIFIC RESEARCH
OF THE LABORATORY OF ROCK
DESTRUCTION OF IM UB RAS
AND PROSPECTS FOR THEIR DEVELOPMENT***Abstract:*

In the direction of improving the methods of accounting for transients in drilling and blasting, the dependence of the speed of seismic vibrations on the reduced distance for the conditions of the Karagai quarry («Magnezit Combine») has been established. As a result of the analysis of long-term data of actual measurements of seismic explosions obtained by the rock destruction laboratory of the Institute of Mining at various deposits of the Urals, Siberia and neighboring countries, the average deviations of actual fluctuations from the calculated values for various coefficients of ground conditions are established and given in this paper. A nomogram has been developed and presented, which allows, at a known longitudinal wave velocity in the array and the assumed structural attenuation coefficient, to determine the permissible rate of seismic vibrations of the rock mass in the natural occurrence. The approaches for the transition to the technology of mining complex-structured reservoir deposits, providing the required lumpiness, are indicated. The results of the study of the detonation characteristics of the industrial emulsion explosives Poremit 1A and NPGM and the effect on them of the means of initiation of various manufacturers are presented. The main factors affecting the wear resistance of the supports of the ball bits are presented. The directions of development of further research of the laboratory of rock destruction according to the State task 2022 – 2024 are proposed.

Key words: destruction of rocks, transients processes, drilling and blasting operations, open-pit mining operations, parameters of drilling and blasting operations, detonation characteristics of industrial emulsion explosives, wave processes in rocks.

* Обобщены ранее проведенные исследования, финансируемые в рамках Госзадания №075-00581-19-00, темы № 0405-2019-0005 (2019 – 2021), с дополнительным привлечением хозяйственных средств и исследования, выполненные в рамках Госзадания №075-00412-22 ПР, темы 1 (2022 – 2024 (FUWE-2022-0005), рег. №1021062010531-8-1.5.1.

Исследования выполнены при участии к.т.н. Г.П. Берсенева, к.т.н. Р.И. Сухова, П.В. Меньшикова, А.С. Флягина, Д.Ю. Князева, С.С. Таранжина.

Введение

С 2019 по 2021 г. сотрудники лаборатории разрушения горных пород проводили исследования по Государственному заданию Минобрнауки №075-00581-19-00, темы № 0405-2019-0005 (2019 – 2021) «Методы учета переходных процессов технологического развития при освоении глубокозалегающих сложноструктурных месторождений полезных ископаемых» (далее – Госзадание). Объектом исследований для лаборатории разрушения горных пород являлось технологическое развитие буровзрывных работ (БВР) горнодобывающих предприятий с открытым способом добычи полезных ископаемых. Основная цель – исследование особенностей переходных процессов для системного решения задач развития буровзрывного комплекса при разработке глубокозалегающих сложноструктурных месторождений открытым способом.

На первом этапе исследований применение нового методологического подхода [1 – 3], предложенного руководителем темы по Госзаданию, чл.-корр. РАН, проф., д.т.н. В.Л. Яковлевым, позволило выявить переходные процессы, дать их определение по существу и выполнить их исследования для БВР. Под переходными процессами в БВР понимаются этапы реализации технических решений, распределенные во времени с учетом технологических изменений для адаптации производственной системы БВР к соответствующим наступившим или заданным условиям, а именно уровню текущих расходов, изменению горно-геологических условий, требованиям промышленной безопасности и др. К тому же установлены и систематизированы основные факторы, управляющие процессами адаптации параметров БВР, предложены технологические приемы реализации переходных процессов на горных предприятиях, предотвращающие негативное влияние изменяющихся условий и повышающие эффективность принятия нововведений в технологии БВР.

На втором этапе НИР по Государственному заданию установлено, что управляемость переходных процессов зависит от качества и времени получения данных о прочностных свойствах массива горных пород, а также о степени и характере влияния взрывного разрушения. Для планирования порядка протекания и реализации переходного процесса необходима разработка алгоритма экспрессного получения информации о факторах, влияющих на качество буровзрывной подготовки, и их системной и параметрической взаимосвязи со смежными технологическими процессами, а также о методах обработки и использования данных, полученных в ходе подготовки массива горных пород к выемке.

На завершающем этапе выполнения НИР по Государственному заданию в 2021 г. усовершенствованы методы учета переходных процессов в современных условиях ведения горных работ, а именно при обеспечении сохранности промышленной и гражданской инфраструктуры вблизи ведения взрывных работ; обосновании безопасных параметров взрывных работ для обеспечения устойчивости бортов карьера; достижении стабильной устойчивости детонационных процессов эмульсионных взрывчатых веществ; при реализации технологии отработки сложноструктурных пластовых месторождений, обеспечивающих требуемую кусковатость; повышении надежности шарошечных долот.

Далее в статье раскрывается суть научных результатов, полученных в 2021 г. лабораторией разрушения горных пород ИГД УрО РАН.

Изучение сейсмического эффекта в различных горных породах и построение номограммы для определения сейсмостойчивости охраняемого объекта [4]

Анализ значительного количества измерений сейсмического действия взрывов [5 – 10] показал, что получаемые данные в большинстве случаев меньше допустимых,

что свидетельствует о правильной организации взрывных работ на большинстве предприятий, где проводились замеры. В мировой практике это также отмечено в работах [11 – 19]. Однако превышение допустимых значений на других предприятиях заставило разбираться в этом. И в ряде случаев выяснилось, что ограничения параметров в принципе предполагали некий запас и щадящее воздействие, а фактически наблюдались превышения сейсмических колебаний. Рассмотрение геологических материалов по месторождениям и анализ технологических приемов производства позволили установить, что могут быть значительные отклонения сейсмических колебаний от расчетных величин, связанные со структурным залеганием горных пород.

В соответствии с методикой [20] для различных значений групп коэффициента грунтовых условий и различных месторождений Урала, Сибири и ближнего зарубежья были установлены следующие средние отклонения фактической от расчетной скорости сейсмических колебаний (табл. 1).

Таблица 1

Отклонения фактической от расчетной скорости сейсмических колебаний
в различных грунтовых условиях

Грунтовые условия, ед.	Среднее отклонение, %
К = 600	8,5
К = 450	11
К = 300	16
К = 250	19,5
К = 200	24,5

Дальнейшее изучение причин отклонений привело к оценке структурных особенностей залегания горных пород и позволило выразить связь допустимой скорости колебаний в зависимости от прочностных характеристик массива при различном коэффициенте структурного ослабления. Прочностные характеристики массива горных пород оценивались в виде следующего соотношения [10]:

$$\text{прочностные характеристики} = \frac{\sigma_{\text{доп}}}{\gamma C},$$

где $\sigma_{\text{доп}}$ – допустимая величина напряжений в массиве горных пород, МПа;

γ – плотность горных пород, т/м³; C – скорость звука в горной породе, м/с.

На основе данных о физико-механических свойствах горных пород при различном структурном ослаблении ($\lambda = 0,05 - 0,5$) и установленных уточняющих зависимостях для расчета допустимых скоростей распространения сейсмических колебаний в горном массиве построена номограмма (рис. 1).

Номограмма при известной скорости продольной волны в массиве горных пород позволяет предварительно без проведения трудоемких сейсмометрических измерений в экспрессном режиме определить:

- допустимую скорость сейсмических колебаний массива горных пород в естественном залегании, характеризующую сейсмоустойчивость основания охраняемого объекта (красная пунктирная линия на рис. 1);

- безопасную массу VB в ступени замедления в зависимости от грунтовых условий ($K=200 - 650$) и удаления охраняемого объекта от эпицентра взрыва (голубая пунктирная линия на рис. 1);

- размеры зоны сдвиговых деформаций и упругой зоны, за которой исключены остаточные деформации (зеленая и коричневая пунктирные линии на рис. 1, соответственно);
- размеры зоны трещинообразования в массиве в зависимости от массы ВВ в ступени замедления (лиловая пунктирная линия на рис. 1).

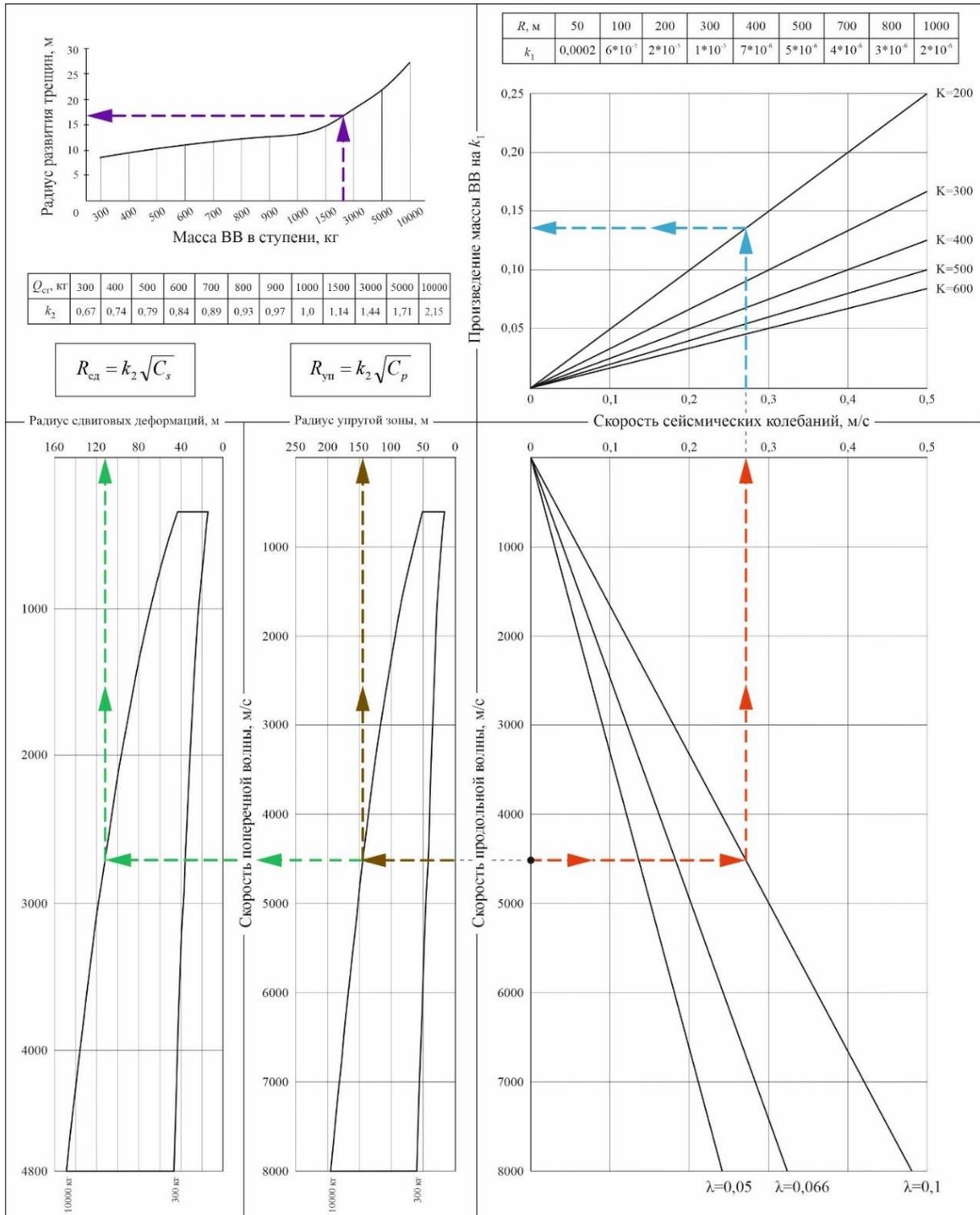


Рис. 1. Номограмма для определения допустимого сейсмического воздействия в породах с различными прочностными свойствами и допустимой массы ВВ в ступени замедления при известном расстоянии до охраняемого объекта [4]

Исследование сейсмического действия взрыва и влияния ударной волны на охраняемые объекты при ведении горных работ в стесненных условиях [5]

Анализ инструментальных замеров фактической максимальной скорости сейсмических колебаний грунта возле охраняемых объектов во время проведения массовых взрывов на Карагайском карьере, выполненных с 2004 по 2008 г. и с 2017 по 2021 г. в связи с необходимостью внедрения новых параметров системы разработки, параметров взрывных работ, очередности и условий инициирования зарядов (порядно-диагональное и поскважинное под искусственными укрытиями) для минимизации вредного воздействия сейсмической и ударно-воздушной волны (УВВ) на жилые и промышленные здания г. Сатки вблизи мест ведения взрывных работ на Карагайском карьере ПАО «Комбинат Магнезит».

Установлена динамика изменения параметров БВР на Карагайском карьере ПАО «Комбинат Магнезит» за многолетний период с прогнозом на будущее (табл. 2).

Таблица 2

Динамика переходных процессов в части изменения параметров БВР при изменении высоты уступа на Карагайском карьере

Наименование параметра	до 2004 г.	2004 – 2008 гг.	2017 – 2020 гг.	2021 г.	Прогноз на 2022 – 2023 гг.
Высота уступа, м	12,0	12,0 и 6,0		6,0	4,0
Взрываемые горные породы	доломит, магнезит, диабаз				
Диаметр скважин, мм	220; 250; 260; 275	250	180; 250	250	170; 180; 250
Количество скважин, шт	10 – 118		6 – 90	10 – 68	5 – 50
Количество рядов скважин, шт	1 – 5		1 – 23	1 – 4	1 – 5
Количество скважин в ряду, шт	5 – 24		3 – 23	5 – 17	5 – 10
Глубина скважин, м	14,0 – 15,0		3,0 – 15,0	7,0	5,0
Длина забойки, м	5,8 – 9,4	9,0 – 9,5	2,5 – 9,5	5,0 – 5,6	3,9 – 4,1
Длина заряда, м	5,8 – 8,2	5,0 – 5,5	0,5 – 5,5	1,4 – 2,0	0,9 – 1,1
Длина перебура, м	2,0 – 3,0	2,5 – 3,0	0,5 – 3,5	1,0	
Сетка скважин, м	5×5; 6×6; 7×7	4×4; 5×5; 6×6	2×2; 2,5×2,5; 3×3; 3,5×3,5; 4×4; 4,5×4,5; 5×5	2,5×2,5; 4×4	3×3; 3,5×3,5; 4×4
Взрывчатое вещество (ВВ)	гранулотол; граммонит 79/21; граммонит 30/70; гранулит; диабазит; граммотол Т-18, 5, 10, 15; гранипор ФМ, БП1, БП2, БП3		граномон; эмуласт АС-25П; ПНП-90; гранулит М; нитронит Э-70; эмуласт АС-30		
Общая масса ВВ на взрыв, кг	240 – 8500	384 – 43120	105 – 12000	400 – 4896	100 – 2800
Промежуточный детонатор (ПД)	Т-400Г; аммонит 6ЖВ; аммонал патронированный; ЗКВГ 45, 60, 75 ЖВ	Т-400Г; ТГФ-850Э	Т-400Г; ТГФ-850Э; ТС-500Л		Т-400Г; ТС-500Л
Общая масса ПД на взрыв, кг	8 – 100		7,35 – 72	4 – 57,8	2 – 25
Масса заряда ВВ в скважинах, кг	240 – 340	80 – 280	2 – 350	40 – 84	20 – 56
Максимальная масса одновременно взрываемого заряда ВВ, кг	240 – 1700	48 – 3200	10 – 1050	72 – 84	
Интервалы замедлений, мс	17, 25, 42, 67		17, 25, 42, 67, 109	25, 109	
Количество ступеней, шт	5	4 – 97	3 – 90	10 – 50	5 – 50
Удельный расход ВВ, г/см ³	0,47 – 1,0	0,4 – 1,0	0,8 – 1,2		1,0 – 1,2

Методика сейсмобезопасной технологии ведения взрывных работ, разработанная группой ученых ИГД МЧМ СССР [21], была принята основополагающей для оценки сейсмической безопасности для условий Карагайского карьера. Экспериментальные замеры сейсмических колебаний выполнялись методом многоканальной регистрации механических колебаний с записью на цифровые сейсморегистраторы MiniMate Plus и УРАН. Давление на фронте ударной воздушной волны (УВВ) измерялось также сейсморегистратором MiniMate Plus с использованием линейного микрофона, устанавливаемого на штативе высотой 1 м возле охраняемого объекта и ориентируемого по направлению массового взрыва.

В результате анализа инструментальных замеров скорости сейсмических колебаний грунта и давления на фронте УВВ возле охраняемых объектов при проведении массовых взрывов на Карагайском карьере за многолетний период 2004 – 2021 гг. установлены величины фактической максимальной результирующей скорости сейсмических колебаний грунта, зарегистрированные возле охраняемых объектов.

Зарегистрированные максимальные значения результирующей скорости сейсмических колебаний грунта и максимальные величины давления на фронте УВВ возле охраняемых объектов не превысили допустимой величины, согласно [22, 23].

В целях повышения надежности расчета предлагаемых технологических изменений получена зависимость допустимой скорости колебаний от прочностных свойств горных пород $V = f(\bar{R})$ в массиве и в основании защищаемых объектов. Для этого были проанализированы результаты более двухсот проведенных натурных замеров скорости сейсмических колебаний за 2004 – 2021 гг.

Таким образом, для условий Карагайского карьера уточнена величина коэффициента сейсмичности, которая составляет $K = 229,41$. Методика получения и обработки данных с учетом зависимости позволяет с высокой достоверностью определить

- расчетные максимальные величины скорости сейсмических колебаний грунта возле охраняемых объектов, а также в любой точке на основании фактических данных о максимальной одновременно взрывающейся массе заряда ВВ и расстояний от охраняемых объектов до эпицентра взрыва (т.к. уже определены реальные грунтовые условия за счет того, что известен точный коэффициент сейсмичности, соответственно, не нужно его выбирать из таблицы);
- допустимые сейсмобезопасные массы одновременно взрывающегося заряда ВВ (в степени замедления), зная измеренные фактические максимальные амплитуды сейсмических колебаний грунта и минимальные расстояния от охраняемых объектов до эпицентра взрыва;
- сейсмобезопасные расстояния до охраняемых объектов, зная максимальную массу одновременно взрывающегося заряда ВВ (в степени замедления) и измеренные фактические максимальные амплитуды сейсмических колебаний грунта.

Исследования детонационных характеристик промышленных эмульсионных взрывчатых веществ и влияния на них средств инициирования различных производителей (на примере порэмита 1А и НППМ) [24]

В ходе исследования влияния исходного компонента эмульсии двух производителей на детонационные характеристики ПЭВВ НППМ (НАО «НИПИГОРМАШ») установлено, что при условии должного входного контроля исходный компонент эмульсии от разных производителей не оказывает существенного воздействия на скорость детонации заряда ВВ.

Перед производством БВР рекомендуется осуществлять качественный входной контроль путем проведения промышленных полигонных испытаний промежуточных детонаторов различных производителей. Эффективность инициирования зарядов ВВ в наибольшей степени зависит от выбора средств инициирования (промежуточного детонатора).

Экспериментально установлена (рис. 2) величина оптимальной плотности для промышленных эмульсионных взрывчатых веществ типа НППМ в интервале значений $\rho = 1,16 - 1,18 \text{ г/см}^3$, которая позволяет достигать значений скорости детонации, заявленной в ТУ.

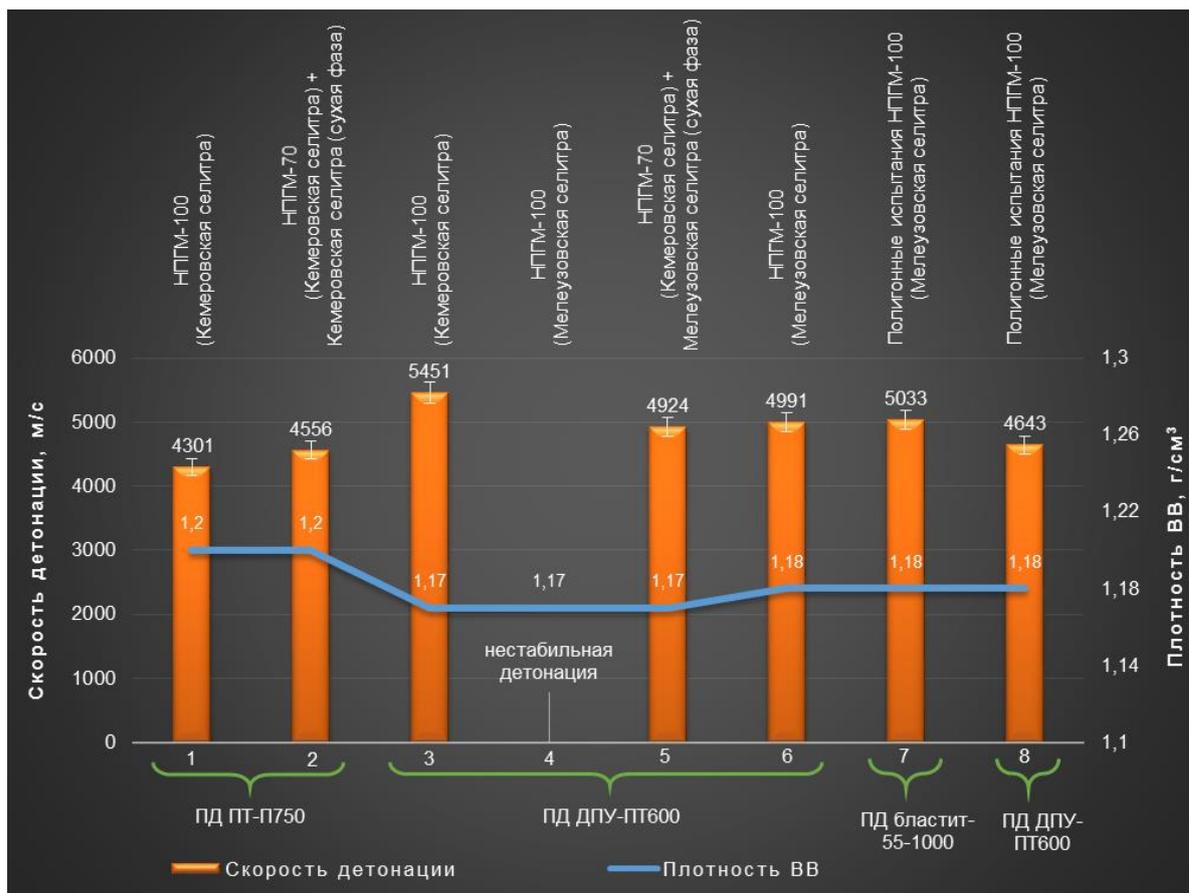


Рис. 2. Влияние средств инициирования и плотности ПЭВВ НППМ на детонационные характеристики заряда ВВ [24]

Выявление экспериментальной зависимости скорости детонации и ширины зоны химической реакции от плотности ПЭВВ (на примере порэмит 1А) [25]

За многолетний период (2004 – 2020 гг.) сотрудниками лаборатории разрушения горных пород ИГД УрО РАН получены экспериментальные данные измерений детонационных характеристик промышленного эмульсионного взрывчатого вещества (ПЭВВ) порэмит 1А. Измерения скорости детонации проводились непрерывным (резистивным) методом в соответствии с методиками ИГД УрО РАН [26, 27] с использованием аппаратуры DATATRAP II DATA/VOD Recorder («MREL Group of Companies Limited», Канада) и VOD Mate («Instantel», Канада) в полигонных условиях. Экспериментальные данные и расчетные детонационные характеристики ПЭВВ порэмит 1А представлены в табл. 3.

Таблица 3

**Исходные параметры зарядов и детонационные характеристики
ПЭВВ порэмит 1А**

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 , м/с.	Время протекания химической реакции τ , 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		1,28	1,15	11,6	3294	824	2471	9,63	23,79
	5				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		

В результате анализа установленной экспериментальной зависимости скорости детонации от плотности и расчетных зависимостей ширины зоны химической реакции от скорости детонации и плотности ПЭВВ порэмит 1А (рис. 3) получены эмпирические и расчетные корреляционные уравнения, позволяющие с определенной достоверностью определять скорость детонации и ширину детонационной зоны ПЭВВ порэмит 1А в зависимости от плотности:

$$a = 2599,4\rho^2 - 6333,8\rho + 3871,9, \text{ мм} \quad (R^2 = 0,7948; R = 0,8915), \quad (1)$$

$$D = -514519\rho^2 + 1E + 06\rho - 767933, \text{ м/с} \quad (R^2 = 0,8331; R = 0,9127). \quad (2)$$

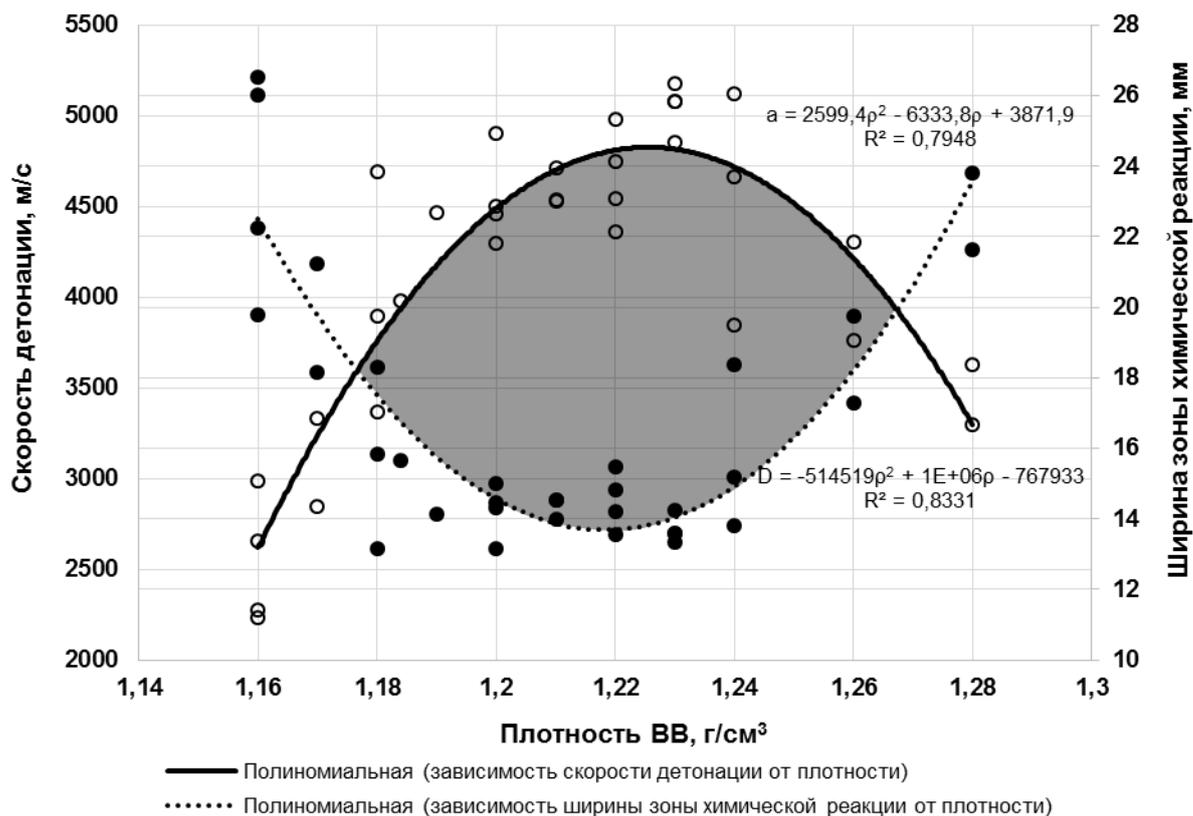


Рис. 3. Зависимость скорости детонации и ширины зоны химической реакции от плотности ПЭВВ порезит 1А при гильзовом заряде $\varnothing 100$ мм [25]

Согласно графику (см. рис. 3) определены диапазоны изменения параметров детонационной волны – переходных процессов распространения детонации:

- времени протекания химической реакции $\tau = 3 - 16$ мкс;
- ширины зоны химической реакции $a = 13 - 27$ мм.

Это позволяет определить с достаточной точностью ширину зоны химической реакции детонационной волны для любого типа ЭВВ.

Исследования параметров БВР в сложеноструктурном угольном массиве [28]

Для обеспечения требуемой кусковатости за счет изменения в выемочных блоках пространственного размещения зарядов ВВ в соответствии со структурными особенностями Шубаркольского месторождения углей (рис. 4) на «Центральном» и «Западном» участках, разрабатываемых открытым способом, установлено, что при расположении заряда ВВ ниже прослоя при идентичном удельном расходе ВВ ($0,02$ кг/м³), что и при расположении заряда в прослое энергии взрыва недостаточно для встряхивания угольного массива, находящегося выше породного прослоя, вследствие чего наблюдается переизмельчение угля при его экскавации, также при этом наблюдается чрезмерное дробление угольного массива ниже прослоя в непосредственной близости от заряда. При расположении заряда ВВ выше породного прослоя зона интенсивного дробления находится непосредственно в разрабатываемом угольном массиве, что приводит к потере кусковатости и недостаточной проработке породного прослоя. Оптимальное расположение заряда в породном прослое позволяет увеличить выход фракций угля более 50 мм до 8 % и в достаточной степени проработать более крепкий породный прослой для последующей экскавации.

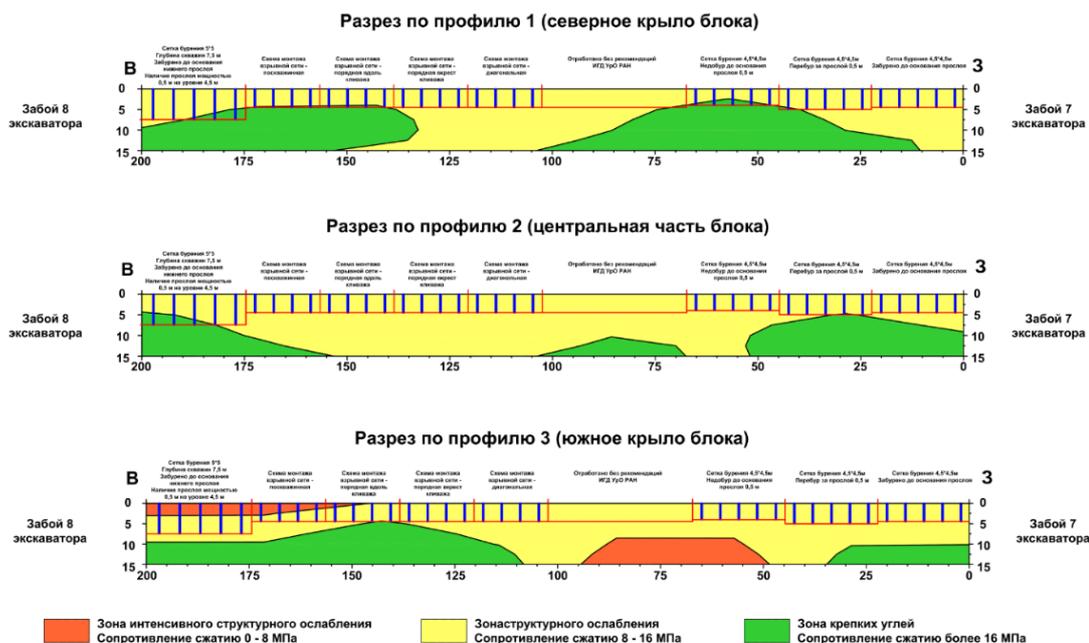


Рис. 4. Строение и структура угольного массива Шубаркольского месторождения в разрезах по трем профилям [28]

При расположении заряда ВВ выше породного прослоя зона интенсивного дробления находится непосредственно в разрабатываемом угольном массиве, что приводит к потере кусковатости и недостаточной проработке породного прослоя. Оптимальное расположение заряда в породном прослое позволяет увеличить выход фракций угля более 50 мм до 8 % и в достаточной степени проработать более крепкий породный прослой для последующей экскавации.

Исследование основных факторов, влияющих на износостойкость опор шарошечных долот при бурении взрывных скважин [29, 30]

На блоке карьера ПАО «Ураласбест», намеченного к выемке, проведено опытно-бурение скважин в сложноструктурном массиве горных пород. Целью являлось выявление с помощью аппаратуры ИГД-1 основных факторов, влияющих на устойчивость процесса получения взрывных скважин. В качестве индикатора устойчивости процесса бурения взрывных скважин принят показатель механической скорости. На рис. 5 и 6 представлены результаты исследования факторов на примере изучения процесса бурения одной из скважин на блоке.

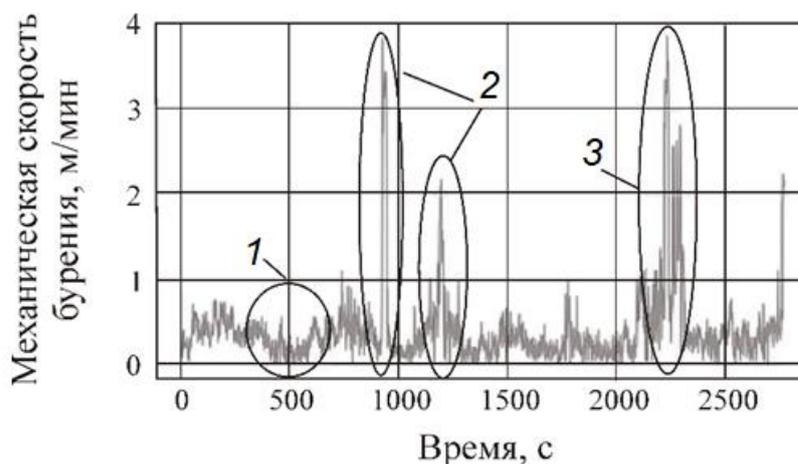


Рис. 5. Изменение во времени механической скорости бурения [29, 30]

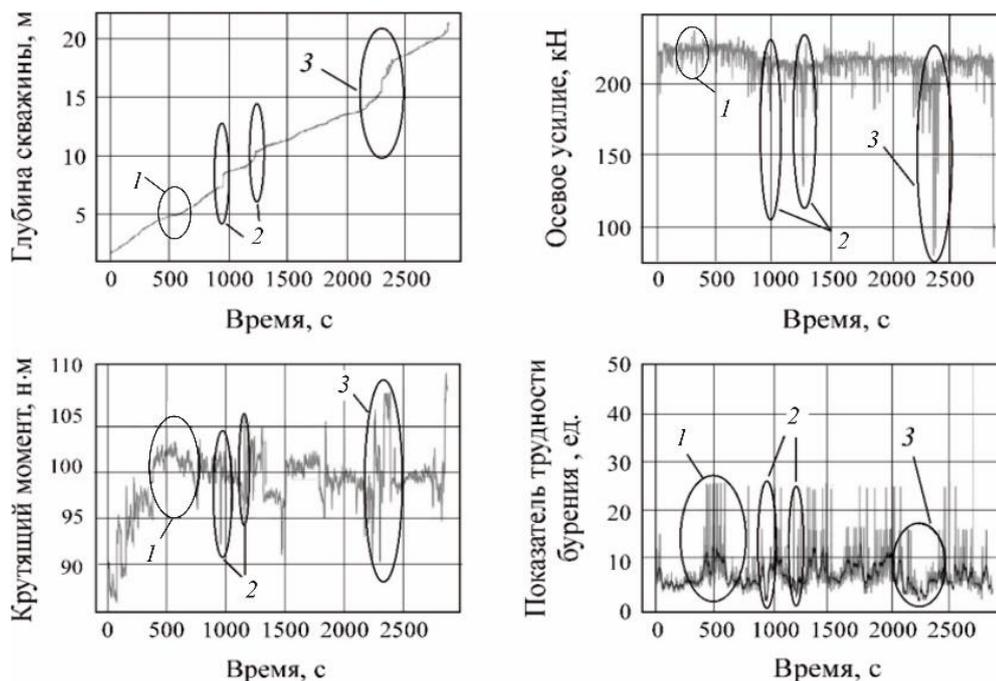


Рис. 6. Исследование факторов, влияющих на механическую скорость бурения скважины, во времени [29, 30]:

- 1 – влияние прочностных свойств горных пород;
- 2 и 3 – влияние вспомогательных операций по наращиванию буровых штанг и возобновлению процесса шарошечного бурения

В результате анализа данных, полученных с экспериментальной аппаратуры, установлено, что возникновение моментов неустойчивого состояния процесса бурения взрывной скважины в сложноструктурном массиве обусловлено природными факторами – относительно плавными и продолжительными изменениями прочностных свойств горных пород по глубине блока, а также кратковременным выполнением вспомогательных операций по наращиванию буровых штанг и возобновлению процесса бурения. В указанных случаях опоры шарошечного долота испытывают интенсивные динамические нагрузки, что значительно снижает надежность всей конструкции шарошечного бурового инструмента. Поэтому в качестве компенсирующего решения, переводящего процесс проходки скважин в устойчивое состояние, может быть рекомендовано применение наддолотного амортизатора, уменьшающего нежелательные динамические нагрузки на элементы опоры шарошечного долота.

Направления дальнейших исследований

В целом полученные фундаментальные и прикладные результаты исследований по Государственному заданию 2019 – 2021 гг. и опыт решения задач по совершенствованию буровых и взрывных работ позволили определить дальнейшее развитие исследований лаборатории разрушения горных пород, которые следует направить на разработку методики, обеспечивающей всесторонний и комплексный учет основных факторов с учетом поступления дополнительной информации о состоянии горных пород в естественном залегании. Применение в перспективе указанной методики обеспечит организацию рациональной и ресурсосберегающей селективной выемки и многокомпонентного извлечения ценных компонентов из руд. Концепция комплексной методики представлена на рис. 7.

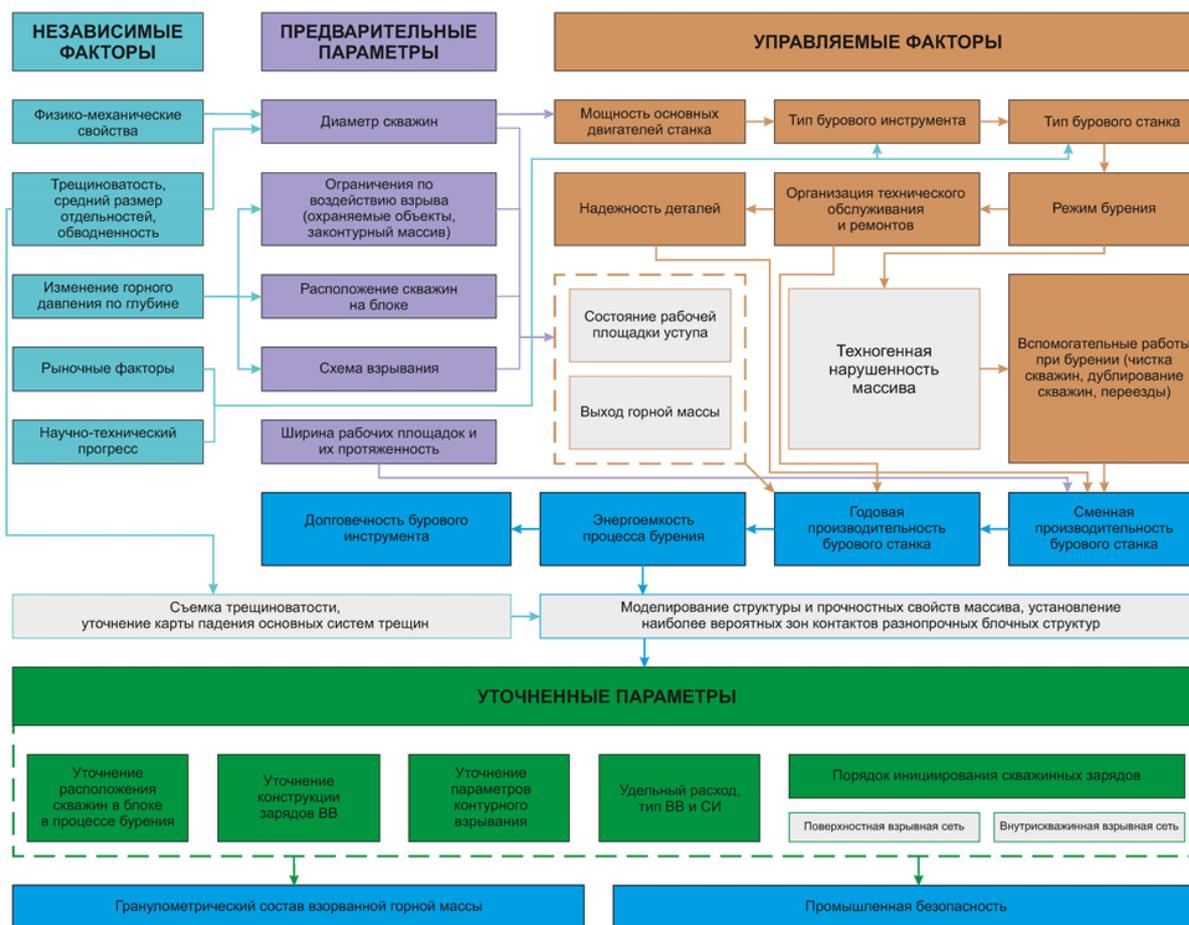


Рис. 7. Концепция комплексной методики ресурсосберегающей селективной выемки и многокомпонентного извлечения ценных компонентов из руд

Выводы

В результате обобщения обозначены основные подходы к методике адаптации БВР в изменяющихся условиях разработки месторождений. Установлены и систематизированы факторы, влияющие на особенности развития переходных процессов в БВР. При изучении особенностей планирования технологических изменений:

- проанализированы результаты экспериментальных исследований детонационных характеристик промышленных эмульсионных ВВ, согласно теории процесса детонации, определены диапазоны изменения параметров переходного процесса распространения детонации: время протекания химической реакции ($\tau = 3 - 16$ мкс) и ширина зоны химической реакции ($a = 13 - 27$ мм);
- проанализированы результаты экспериментальных исследований и установлены уточняющие зависимости для расчета допустимых скоростей распространения сейсмических колебаний в массиве на основе данных о физико-механических свойствах горных пород при различном структурном ослаблении ($\lambda = 0,05 - 0,5$), на их базе разработана методика и построена номограмма для определения сейсмостойчивости объекта;
- проанализированы результаты экспериментальных исследований и установлена рациональная величина плотности промышленных эмульсионных ВВ типа НПГМ ($\rho = 1,16 - 1,18$ г/см³), обеспечивающая достижение скорости детонации, заявленной в Технических условиях производителя;
- проанализированы результаты изучения влияния пространственного размещения зарядов ВВ при взрыве на встряхивание, обеспечивающего требуемую кусковатость угля;

- проанализированы факторы, влияющие на износ опор шарошечных долот, позволяющие рекомендовать применение наддолотного амортизатора, снижающего динамические нагрузки в процессе бурения и возобновлении работ после наращивания бурового става;
- определены основные направления исследований в части решения задач по эффективной адаптации предполагаемых технологических изменений в меняющихся условиях работы горнодобывающих предприятий.

Проведенные ранее исследования по изучению возможностей эффективной организации буровзрывного комплекса на горных предприятиях, а также подробное изучение переходных процессов позволили наметить основные подходы к разработке комплексной методики адаптации параметров БВР в изменяющихся условиях разработки сложноструктурных месторождений твердых полезных ископаемых. Выявление и систематизация факторов, влияющих на особенности развития переходных процессов в БВР позволили при экспериментальных исследованиях установить уточняющие зависимости и разработать соответствующие методические положения.

Список литературы

1. Яковлев В.Л., 2017. Исследование переходных процессов – новый методологический подход к разработке и развитию инновационных технологий добычи и рудо-подготовки минерального сырья при освоении глубокозалегающих сложноструктурных месторождений. *Проблемы недропользования*, № 2, С. 5 - 14. DOI: 10.18454/2313-1586.2017.02.005
2. Яковлев В.Л., 2019. *Исследование переходных процессов – новое направление в развитии методологии комплексного освоения георесурсов*. Екатеринбург: УрО РАН, 284 с.
3. Яковлев В.Л., 2020. О методологии комплексного освоения запасов месторождений твердых полезных ископаемых для разработки стратегии развития минерально-сырьевой базы России. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*, № 7, С. 5 - 20. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2020-7-5-20>.
4. Жариков С.Н., Кутуев В.А., 2020. Анализ сейсмического эффекта в различных породах и грунтовых условиях. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 12, С. 44 - 53. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-12-0-44-53>.
5. Меньшиков П.В., Таранжин С.С., Флягин А.С., 2020. Исследование сейсмического воздействия на здания и сооружения города Сатки при ведении взрывных работ на Карагайском карьере в стесненных условиях. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 3 - 1: *Проблемы недропользования-1*, С. 383 - 398. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-31-0-383-398>.
6. Жариков С.Н., Берсенёв Г.П., Кутуев В.А., Флягин А.С., 2019. Научные исследования сейсмического действия взрыва на подземный газопровод высокого давления. *Проблемы недропользования*, № 3, С. 145 - 154. DOI: 10.25635/2313-1586.2019.03.145.
7. Kutuev V.A., Zharikov S.N., 2019. Restrictions on seismic impact of blast in the open-pit border zone at the open-pit and combined mining. *E3S Web of conferences*, vol. 129, pp. 01001. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20191290>.
8. Zharikov S., Kutuev V., 2019. About Order of Comprehensive Solving the Seismic and Pre-Splitting Issues for Drill-and-Blasting Open-Pits. *Trigger Effects in Geosystems. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences*, Springer, Cham, pp. 437 - 445. https://doi.org/10.1007/978-3-030-31970-0_46.
9. Kutuev V., Menshikov P., Zharikov S., 2020. Analysis of blasting seismic impact on underground mining workings under the conditions of the Magnezitovaya mine. *E3S Web of Conferences*, Khabarovsk, vol. 192, pp. 01029. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202019201029>.

10. Kutuev V. A., 2020. Investigating the seismic impact made by the underground large-scale blast on the secure facilities of Kyshtym GOK when caving the floor pillar. *News of the Higher Institutions. Mining Journal*, vol. 2, pp. 25-36. <https://doi.org/10.21440/05361028-2020-2-25-36>.
11. Tripathy G.R., Shirke R.R., Kudale M.D., 2016. Safety of engineered structures against blast vibrations: A case study. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 8, no 2, pp. 248-255. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2015.10.007>.
12. Ak H., Konuk A., 2008. The effect of discontinuity frequency on ground vibrations produced from bench blasting: a case study. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 28, no 9, pp. 686-694. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2007.11.006>.
13. Ak H., Iphar M., Yavuz M., Konuk A., 2009. Evaluation of ground vibration effect of blasting operations in a magnesite mine. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 29, no 4, pp. 669-676. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2008.07.003>.
14. Kumar R., Choudhury D., Bhargava K., 2016. Determination of blast-induced ground vibration equations for rocks using mechanical and geological properties. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 8, no 3, pp. 341 - 349. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2015.10.009>.
15. Zeng, J., Mohammed, A. S., Mirzaei, F., Moosavi, S. M. H., Armaghani, D. J., Samui, P., 2022. A parametric study of ground vibration induced by quarry blasting: an application of group method of data handling. *Environmental Earth Sciences*, vol. 81 (4), art. no. 127, <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10239-6>.
16. Armaghani, D.J., Momeni, E., Asteris, P., 2020. Application of group method of data handling technique in assessing deformation of rock mass. *Metaheuristic Comput Appl*, vol. 1 (1), pp. 1 - 18. <https://doi.org/10.12989/mca.2020.1.1.001>.
17. Amiri M., Hasanipanah M., Bakhshandeh A.H., 2020. Predicting ground vibration induced by rock blasting using a novel hybrid of neural network and itemset mining. *Neural Computing and Applications*, vol. 32, pp. 14681-14699. <https://doi.org/10.1007/s00521-020-04822-w>.
18. Armaghani D.J., Mahdiyar A., Hasanipanah M., Faradonbeh R.S., Khandelwal M., Amnieh H. B., 2016. Risk Assessment and Prediction of Flyrock Distance by Combined Multiple Regression Analysis and Monte Carlo Simulation of Quarry Blasting. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol. 49 (9), pp. 3631 - 3641. <https://doi.org/10.1007/s00603-016-1015-z>.
19. Jahed Armaghani D., Kumar D., Samui P., Hasanipanah M., Roy B., 2021. A novel approach for forecasting of ground vibrations resulting from blasting: modified particle swarm optimization coupled extreme learning machine. *Engineering with Computers*, vol. 37 (4), pp. 3221 - 3235. <https://doi.org/10.1007/s00366-020-00997-x>.
20. Котяшев А.А., Маторин А.С., Шеменев В.Г., 2010. Опыт применения эмульсионных взрывчатых веществ на карьерах Урала. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*, № 8, С. 278 - 282.
21. Картузов М.И., Паздников Н.В. и др., 1984. *Методика обеспечения сейсмобезопасной технологии ведения взрывных работ*. Свердловск: ИГД МЧМ СССР, 12 с.
22. Вибрация и удар. Вибрация зданий. Измерение вибрации и оценка ее воздействия на конструкцию. ГОСТ Р 52892-2007: утверждено Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 27 декабря 2007 № 586-ст: введено в действие 01 октября 2008. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200064161> (дата обращения: 04.05.2022).
23. *Правила безопасности при производстве, хранении и применении взрывчатых материалов промышленного назначения: в редакции Приказа Ростехнадзора от 03.12.2020 № 494. (Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности)*. URL: <http://docs.cntd.ru/document/573219717> (дата обращения: 01.04.2022).

24. Кутуев В.А., Флягин А.С., Жариков С.Н., 2021. Исследование детонационных характеристик ПЭВВ НППМ с различными исходными компонентами эмульсии при инициировании зарядов разными промежуточными детонаторами. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*, № 3, С. 175 - 187. <https://doi.org/10.46689/2218-5194-2021-3-1-169-181>.

25. Меньшиков П. В., Жариков С. Н., Кутуев В. А., 2021. Определение ширины зоны химической реакции промышленного эмульсионного взрывчатого вещества порэммит 1А на основе принципа неопределенности в квантовой механике. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 5 - 2: *Проблемы недропользования-2*, С. 121 - 134. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_52_0_121.

26. *Методика измерений скорости детонации взрывчатых веществ реостатным методом с использованием измерителя скорости детонации VODMate («Instantel», Канада)*. Екатеринбург : ИГД УрО РАН, 2011, 17 с.

27. *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*. Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2019, 28 с.

28. Берсенев Г.П., Князев Д.Ю., 2021. Влияние породных прослоев на технологию отработки сложноструктурных угольных пластов. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*, № 5 - 2: *Проблемы недропользования-2*, С. 42 - 52. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_52_0_42.

29. Реготунов А.С., Сухов Р.И., Гращенко Д.А., 2020. Выявление факторов, влияющих на необходимость реализации переходных процессов при бурении взрывных скважин в сложноструктурных массивах горных пород. *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*, Т. 7, № 2, С. 31 - 35. <https://doi.org/10.15372/FPVGN2020070205>.

30. Regotunov A.S. Sukhov R.I., Grashchenko D.A., 2022. Identifying factors which induce transitive processes in blasthole drilling in structurally complex rock masses. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : Challenges and Solutions*, Novosibirsk, Virtual, P. 012001. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/991/1/012001>.

References

1. Yakovlev V.L., 2017. Issledovanie perekhodnykh protsessov – novyi metodologicheskii podkhod k razrabotke i razvitiyu innovatsionnykh tekhnologii dobychi i rudopodgotovki mineral'nogo syr'ya pri osvoenii glubokozalegayushchikh slozhnostrukturnykh mestorozhdenii [Study of transients as a new methodological approach to the development and improving of innovative technologies for the extraction and preparation of mineral raw materials in the exploration of deep-lying complex-structural deposits]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 2, P. 5 - 14. DOI: 10.18454/2313-1586.2017.02.005

2. Yakovlev V.L., 2019. Issledovanie perekhodnykh protsessov – novoe napravlenie v razvitiu metodologii kompleksnogo osvoeniya georesursov [Study of transients as a new direction in the elaboration of the methodology of integrated development of georesources]. *Ekaterinburg: UrO RAN*, 284 p.

3. Yakovlev V.L., 2020. O metodologii kompleksnogo osvoeniya zapasov mestorozhdenii tverdykh poleznykh iskopaemykh dlya razrabotki strategii razvitiya mineral'no-syr'evoi bazy Rossii [On the methodology of complex exploration of reserves of solid mineral deposits for the improving of the strategy for the development of the mineral resource base of Russia]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*, № 7, P. 5 - 20. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2020-7-5-20>.

4. Zharikov S.N., Kutuev V.A., 2020. Analiz seismicheskogo effekta v razlichnykh porodakh i gruntovykh usloviyakh [Analysis of the seismic effect in various rocks and ground

conditions]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 12, P. 44 - 53. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-12-0-44-53>.

5. Men'shikov P.V., Taranzhin S.S., Flyagin A.S., 2020. Issledovanie seismicheskogo vozdeistviya na zdaniya i sooruzheniya goroda Satki pri vedenii vzryvnykh rabot na Karagaiskom kar'ere v stesnennykh usloviyakh [Study of the seismic impact on the buildings and structures of the city of Satka during blasting operations at the Karagai quarry in cramped conditions]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 3 - 1: Problemy nedropol'zovaniya-1, S. 383 - 398. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-31-0-383-398>.

6. Zharikov S.N., Bersenev G.P., Kutuev V.A., Flyagin A.S., 2019. Nauchnye issledovaniya seismicheskogo deistviya vzryva na podzemnyi gazoprovod vysokogo davleniya [Scientific studies of the seismic effect of an explosion on the underground high-pressure gas pipeline]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 3, P. 145 - 154. DOI: 10.25635/2313-1586.2019.03.145.

7. Kutuev V.A., Zharikov S.N., 2019. Reatrictions on seismic impact of blest in the open-pit border zone at the oprn-pit and combined mining. *E3S Web of conferences*, vol. 129, pp. 01001. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20191290>.

8. Zharikov S., Kutuev V., 2019. About Order of Comprehensive Solving the Seismic and Pre-Splitting Issues for Drill-and-Blasting Open-Pits. *Trigger Effects in Geosystems. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences*, Springer, Cham, pp. 437 - 445. https://doi.org/10.1007/978-3-030-31970-0_46.

9. Kutuev V., Menshikov P., Zharikov S., 2020. Analysis of blasting seismic impact on underground mining workings under the conditions of the Magnezitovaya mine. *E3S Web of Conferences*, Khabarovsk, vol. 192, pp. 01029. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202019201029>.

10. Kutuev V. A., 2020. Investigating the seismic impact made by the underground large-scale blast on the secure facilities of Kyshtym GOK when caving the floor pillar. *News of the Higher Institutions. Mining Journal*, vol. 2, pp. 25-36. <https://doi.org/10.21440/05361028-2020-2-25-36>.

11. Tripathy G.R., Shirke R.R., Kudale M.D., 2016. Safety of engineered structures against blast vibrations: A case study. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 8, no 2, pp. 248-255. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2015.10.007>.

12. Ak H., Konuk A., 2008. The effect of discontinuity frequency on ground vibrations produced from bench blasting: a case study. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 28, no 9, pp. 686-694. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2007.11.006>.

13. Ak H., Iphar M., Yavuz M., Konuk A., 2009. Evaluation of ground vibration effect of blasting operations in a magnesite mine. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 29, no 4, pp. 669-676. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2008.07.003>.

14. Kumar R., Choudhury D., Bhargava K., 2016. Determination of blast-induced ground vibration equations for rocks using mechanical and geological properties. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 8, no 3, pp. 341 - 349. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2015.10.009>.

15. Zeng, J., Mohammed, A. S., Mirzaei, F., Moosavi, S. M. H., Armaghani, D. J., Samui, P., 2022. A parametric study of ground vibration induced by quarry blasting: an application of group method of data handling. *Environmental Earth Sciences*, vol. 81 (4), art. no. 127, <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10239-6>.

16. Armaghani, D.J., Momeni, E., Asteris, P., 2020. Application of group method of data handling technique in assessing deformation of rock mass. *Metaheuristic Comput Appl*, vol. 1 (1), pp. 1 - 18. <https://doi.org/10.12989/mca.2020.1.1.001>.

17. Amiri M., Hasanipanah M., Bakhshandeh A.H., 2020. Predicting ground vibration induced by rock blasting using a novel hybrid of neural network and itemset mining. *Neural Computing and Applications*, vol. 32, pp. 14681-14699. <https://doi.org/10.1007/s00521-020-04822-w>.

18. Armaghani D.J., Mahdiyar A., Hasanipanah M., Faradonbeh R.S., Khandelwal M., Amnieh H. B., 2016. Risk Assessment and Prediction of Flyrock Distance by Combined Multiple Regression Analysis and Monte Carlo Simulation of Quarry Blasting. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol. 49 (9), pp. 3631 - 3641. <https://doi.org/10.1007/s00603-016-1015-z>.
19. Jahed Armaghani D., Kumar D., Samui P., Hasanipanah M., Roy B., 2021. A novel approach for forecasting of ground vibrations resulting from blasting: modified particle swarm optimization coupled extreme learning machine. *Engineering with Computers*, vol. 37 (4), pp. 3221 - 3235. <https://doi.org/10.1007/s00366-020-00997-x>.
20. Kotyashov A.A., Matorin A.S., Shemenov V.G., 2010. Opyt primeneniya emul'sionnykh vzryvchatykh veshchestv na kar'erakh Urala . [Experience in the use of emulsion explosives in the quarries of the Urals]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauch-no-tehnicheskii zhurnal)*, № 8, P. 278 - 282.
21. Kartuzov M.I., Pazdnikov N.V. i dr., 1984. Metodika obespecheniya seismobezopasnoi tekhnologii vedeniya vzryvnykh robot . [Methodology for ensuring safe technology of blasting operations]. Sverdlovsk: IGD MChM SSSR, 12 p.
22. Vibratsiya i udar. Vibratsiya zdaniy. Izmerenie vibratsii i otsenka ee vozdeistviya na konstruktsiyu. GOST R 52892-2007: utverzhdeno Prikazom Federal'nogo agentstva po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii ot 27 dekabrya 2007 № 586-st: vvedeno v deistvie 01 oktyabrya 2008 . [Vibration and shock. Vibration of buildings. Measurement of vibration and assessment of its impact on the structure. GOST R 52892-2007: approved by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated December 27, 2007 No. 586-st: put into effect on October 01, 2008]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200064161> (data obrashcheniya: 04.05.2022).
23. Pravila bezopasnosti pri proizvodstve, khraneni i primenenii vzryvchatykh materialov promyshlennogo naznacheniya: v redaktsii Prikaza Rostekhnadzora ot 03.12.2020 № 494. (Federal'nye normy i pravila v oblasti promyshlennoi bezopasnosti) [Safety rules for the production, storage and use of explosive materials for industrial purposes: as amended by Rostec Supervision Order No. 494 dated 03.12.2020. (Federal Norms and Rules in the field of industrial safety)]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/573219717> (data obrashcheniya: 01.04.2022).
24. Kutuev V.A., Flyagin A.S., Zharikov S.N., 2021. Issledovanie detonatsionnykh kharakteristik PEVV NPGM s razlichnymi iskhodnymi komponentami emul'sii pri initsirovani zaryadov raznymi promezhutochnymi detonatorami [Study of detonation characteristics of NPGM explosive with different initial components of the emulsion when initiating charges with different intermediate detonators]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*, № 3, S. 175 - 187. <https://doi.org/10.46689/2218-5194-2021-3-1-169-181>.
25. Men'shikov P. V., Zharikov S. N., Kutuev V. A., 2021. Opredelenie shiriny zony khimicheskoi reaktsii promyshlennogo emul'sionnogo vzryvchatogo veshchestva poremit 1A na osnove printsipa neopredelennosti v kvantovoi mekhanike [Determination of the width of the chemical reaction zone of the industrial emulsion explosive Poremit 1A based on the uncertainty principle in quantum mechanics]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 5 - 2: Problemy nedropol'zovaniya-2, P. 121 - 134. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_52_0_121.
26. Metodika izmerenii skorosti detonatsii vzryvchatykh veshchestv reostatnym metodom s ispol'zovaniem izmeritelya skorosti detonatsii VODMate ("InstanTEL", Kanada) [Method of measuring the detonation velocity of explosives by rheostatic method using the VODMate detonation velocity meter ("InstanTEL", Canada)]. Ekaterinburg : IGD UrO RAN, 2011, 17 p.
27. Metodika izmerenii skorosti detonatsii vzryvchatykh veshchestv reostatnym metodom, intervalov zamedleniya mezhdv vzryvami skvazhinnykh zaryadov, uskoreniya seismicheskikh kolebaniy i davleniya na fronte udarnoi vozduшной volny s ispol'zovaniem

izmeritelya skorosti detonatsii DATATRAP II DATA/VOD RECORDER [Method of measuring the detonation velocity of explosives by the rheostatic method, the deceleration intervals between explosions of borehole charges, acceleration of seismic vibrations and pressure at the front of the shock air wave using the detonation velocity meter DATATRAP II DATA / VOD RECORDER]. Ekaterinburg: IGD UrO RAN, 2019, 28 p.

28. Bersenev G.P., Knyazev D.Yu., 2021. Vliyanie porodnykh prosloev na tekhnologiyu otrabotki slozhnostrukturnykh ugol'nykh plastov [The influence of rock interlayers on the technology of mining complex-structured coal seams]. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal), № 5 - 2: Problemy nedropol'zovaniya-2, P. 42 - 52. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_52_0_42.

29. Regotunov A.S., Sukhov R.I., Grashchenko D.A., 2020. Vyyavlenie faktorov, vliyayushchikh na neobkhodimost' realizatsii perekhodnykh protsessov pri burenii vzryvnykh skvazhin v slozhnostrukturnykh massivakh gornykh porod [Identification of factors influencing the need to implement transients when drilling blast wells in complex-structured rock massifs]. Fundamental'nye i prikladnye voprosy gornykh nauk, T. 7, № 2, S. 31 - 35. <https://doi.org/10.15372/FPVGN2020070205>.

30. Regotunov A.S. Sukhov R.I., Grashchenko D.A., 2022. Identifying factors which induce transitive processes in blasthole drilling in structurally complex rock masses. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : Challenges and Solutions*, Novosibirsk, Virtual, P. 012001. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/991/1/012001>.