

УДК 622.235

**ВЛИЯНИЕ МЕЖСКВАЖИННЫХ ЗАМЕДЛЕНИЙ
НА УРОВЕНЬ СЕЙСМОБЕЗОПАСНОСТИ С УЧЕТОМ ОТКЛОНЕНИЯ
ВРЕМЕНИ СРАБАТЫВАНИЯ ДЕТОНАТОРОВ**

**Ал. А. Галимьянов, А. В. Рассказова, И. В. Корнеев,
В. И. Мишнев, Е. Н. Казарина**

*Институт горного дела ДВО РАН,
E-mail: azot-1977@mail.ru, ул. Тургенева, 51, 680000, г. Хабаровск, Россия*

Исследовано влияние рациональных межскважинных интервалов замедлений на сейсмобезопасность производства взрывных работ на открытых горных работах. Проведены инструментальные измерения фактического времени замедления детонаторов неэлектрических систем инициирования с дальнейшей обработкой результатов при помощи компьютерного моделирования. Проанализированы отечественные и зарубежные источники информации по отклонению фактического времени замедления от номинального. Расчетами подтверждено повышение относительного коэффициента сейсмобезопасности при выполнении взрывных работ с увеличением межскважинных интервалов времени замедления. Показана необходимость проведения дополнительных инструментальных измерений сейсмических колебаний для апробации актуальных схем в полевых и лабораторных условиях и исследование качества дробления горной массы.

Интервал времени замедления, схема монтажа взрывной сети, измерения замедления, компьютерное моделирование схем взрывания, среднеквадратичное отклонение, сейсмобезопасность, качество взорванной горной массы

DOI: 10.15372/FTPRPI20240307
EDN: NYXWEF

Увеличение объемов горных работ в России и в мире при жесткой конкуренции между участниками рынка горнодобывающей отрасли, где буровзрывные работы играют одну из ведущих ролей в основных производственных процессах горного производства [1–5], требует нестандартных подходов к совершенствованию процесса подготовки горной массы к выемке.

Рассмотрено влияние межскважинных интервалов времени замедления на сейсмобезопасность при проведении буровзрывных работ на открытых горных выработках, с учетом отклонения времени замедления детонаторов неэлектрических систем инициирования (НСИ). Успешное применение короткозамедленного взрывания в значительной мере определяется технической возможностью создания замедлений точно заданной длительности [6].

Вопросы рациональных межскважинных интервалов замедлений обсуждаются среди ученых и горных инженеров более полувека, однако до сих пор не разработана общепризнанная теория обоснования интервалов времени замедления между зарядами взрывчатых веществ для соблюдения баланса качества взорванной горной массы и сейсмобезопасности. В [6–10] и многих других исследованиях приводятся аргументы в пользу условно коротких (до 100 мс) и больших (> 100 мс) интервалов замедлений. Под короткими подразумеваются интервалы времени замедления, обеспечивающие взрывание скважинных зарядов в режиме интерференции отраженной волны от условно первого заряда и прямой волны от следующего за ним заряда, т. е. когда очередной заряд работает в напряженном массиве. При больших интервалах последующие заряды взрываются в условиях максимально ослабленного поля напряжения и разупрочненного массива системами образованных микротрещин от ранее сдетонированных зарядов. При расчете интервала времени замедления учитываются горно-геологические особенности конкретного месторождения, а также параметры буровзрывных работ, в том числе характеристики скважинных зарядов взрывчатых веществ.

Сейсмоопасность сопутствует проведению взрывных работ на горных предприятиях, представляя реальную угрозу, связанную с негативным воздействием взрывных работ на открытые и подземные горные выработки, расположенные непосредственно под карьером, или на комплексную разработку одного и того же пластового угольного месторождения [11]. Для решения данной проблемы в ИПКОН РАН выполнены исследования поведения взрывоопасного массива на базе компьютерного моделирования методом сглаженных частиц SPH [12], положительно зарекомендовавшим себя при решении задач геотехнической механики. На основании [13] предложен способ ведения взрывных работ децентрализованными зарядами по нейтрализации влияния зон аномального состояния массива на горные выработки.

В [14–16] с учетом опыта замедленного взрывания при ведении подземных горных работ [17, 18] обосновано применение больших интервалов времени на открытых горных работах с апробацией на карьерах Дальнего Востока. Получен положительный эффект по увеличению выхода горной массы с 1 п. м, повышению устойчивости уступов карьера, снижению развала и разлета кусков взорванной горной массы. Большие интервалы времени замедления успешно применяются и в других регионах РФ, например на угольных разрезах Кузбасса УК “Кузбассразрезуголь” [19, 20].

Тем не менее большие интервалы замедления не получили широкого распространения, о чем свидетельствует низкий процент изготовления детонаторов НСИ с номинальным временем замедления 109 мс и более, не превышающий 10 % от общего количества выпущенных детонаторов НСИ для открытых горных работ в мире, в том числе в РФ. Согласно требованию ГОСТ Р 52892-2007 [21], самый опасный диапазон сейсмоз воздействий для зданий и сооружений 4–15 Гц (это частоты, близкие к частотам их собственных колебаний). Теоретически такие частоты могут быть вызваны применением межскважинных интервалов замедлений в диапазоне 67–250 мс. Известно, что частота колебаний вычисляется по формуле $\nu = 1/T$, тогда при межскважинном замедлении 109 мс $\nu = 9.2$ Гц, а при $T = 250$ мс, соответственно, $\nu = 4$ Гц. Качество дробления значительно улучшается при интервалах замедления $T = 1–17$ мс [8, 22].

В мировом масштабе еще недостаточно накоплен положительный опыт комплексного эффекта от применения больших интервалов замедлений относительно сейсмики и качества взрывного рыхления. Поэтому представляет особый интерес и актуальна задача обеспечения минимизации негативных геотехнологических рисков и явлений при открытой и комбинированной разработке твердых полезных ископаемых [23].

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Согласно [24], при взрывании групп зарядов с замедлением между взрывами в отдельно взрываемой группе менее 20 мс, каждую группу следует рассматривать как отдельный заряд с общей массой для группы при расчете сейсмобезопасных расстояний от взрыва. В этом случае проектное время взрыва блока делится на 20 мс интервалы, затем подсчитывается масса взрывчатых веществ в каждом таком интервале. Их максимальная масса в одном из интервалов, в соответствии с терминологией методики Новационной фирмы “КУЗБАСС-НИИОГР”, называется максимальной массой взрывчатых веществ в пределах любого скользящего 20 мс окна, причем это 20 мс окно (интервал) для получения максимальной массы взрывчатых веществ может скользить по всему времени взрыва блока [25]. В дополнение к такой методике выполнен анализ отечественной и зарубежной литературы на предмет исследований по отклонению времени замедления детонаторов разных систем инициирования зарядов взрывчатых веществ [3, 26–33], из которого выявлен диапазон отклонения замедления от номинала среди детонаторов неэлектрических систем инициирования — 2–20 %; электронных систем инициирования — 1–15 %.

Неравномерное распределение массы взрывчатых веществ по группам одновременно взрывающихся зарядов и на блоках приводит к появлению дополнительных низкочастотных составляющих в сейсмическом воздействии, усиливающих сейсмическую нагрузку на контурный массив горных пород [34]. При одновременном взрыве двух и более блоков в породах средней крепости, расположенных на одном или соседних горизонтах на одном борту карьера, наряду с колебаниями породы, создаваемыми взрывами зарядов, возникают низкочастотные колебания, связанные с их взаимодействием, ухудшающие сейсмобезопасность взрывных работ.

Для уточнения фактического времени отклонения детонаторов неэлектрических и электронных систем инициирования сотрудниками ИГД ДВО РАН проведены инструментальные измерения с помощью внесенных в Госреестр измерителя микросекундных интервалов времени ИВИ-4 ТУ 26.51.43-001-32567346-2021 и быстродействующего модуля CARD-E14-440 на нерабочих уступах карьеров Дальнего Востока. Второе средство измерения использовалось для чистоты эксперимента, где поступающие с модуля CARD-E14-440 цифровые сигналы записывались посредством программного обеспечения LGraph2 с дальнейшей обработкой полученных значений цифровых сигналов в программе PowerGraph. Методика соответствующих инструментальных измерений приведена в [8].

Результаты испытаний средств инициирования представлены в табл. 1. Видно, что отклонения (среднеквадратичное и абсолютное) времени замедления детонаторов как одной партии, так и разных партий частично выходят за границы номинальных значений. По результатам проведенных инструментальных измерений выявлена зависимость среднеквадратичного отклонения срабатывания детонаторов НСИ от температуры окружающей среды (рис. 1). На основании данных обзора и инструментальных измерений фактического времени срабатывания детонаторов средств инициирования составлено более 300 схем монтажа взрывной сети с разными интервалами замедления между магистральными и участковыми рядами, а также клиновыми и диагональными схемами. Варианты возможных интервалов замедлений смоделированы с помощью генератора случайных чисел “Рандомайзер” с учетом температурного фактора.

ТАБЛИЦА 1. Результаты испытаний средств инициирования

Устройство НСИ	Номинальное время замедления, мс	Дата измерения	Температура воздуха, С°	Номер измерения и фактическое замедление детонаторов, мс									Количество измерений	Среднее значение	Среднее отклонение замедления от номинала	
				1	2	3	4	5	6	7	8	9			АСО, мс	ОСО, %
Отечественные средства инициирования																
Скважинные № 1	500	01.09.23	+23	536	532	538	—	—	—	—	—	—	3	535	35.3	7.1
		21.10.23	+4	650	669	660	668	665	662	—	—	—	6	662	162.3	32.5
		24.10.23	+12	644	653	649	657	647	656	—	—	—	6	651	151.0	30.2
Скважинные № 2	1000	01.09.23	+23	1003	1002	1020	—	—	—	—	—	—	3	1008	8.3	0.8
		21.10.23	+4	1082	1039	1085	1143	1124	—	—	—	—	5	1095	94.6	9.5
		24.10.23	+12	1020	1020	1010	1039	982	1002	—	—	—	6	1012	12.2	1.2
		16.02.22	—14	1026	1052	—	—	—	—	—	—	—	2	1039	39.0	3.9
		16.02.22	—14	1040	1148	1162	—	—	—	—	—	—	3	1117	116.7	11.7
Поверхностные № 1, 2, 3	0	17.10.22	—19	0.089	0.089	0.087	0.094	0.091	0.087	0.083	0.094	0.088	10	0.090	0.1	9.0
	25	17.10.22	—19	25	24	22	22	24	24	24	25	26	10	24.10	0.9	3.6
	42	17.10.22	—19	44	45	43	44	45	46	45	45	45	10	44.50	19.5	78.0
Шпуровые	10000	17.10.22	—19	10836	10670	10959	10700	10705	10839	10608	10941	10732	9	10777	776.7	7.8
Зарубежные средства инициирования																
СЭЗ	750	17.02.22	+3	742	744	—	—	—	—	—	—	—	2	743	7.0	0.9
Скважинные № 1, 2, 3	5000	08.08.22	+19	5127	5144	5354	5353	—	—	—	—	—	4	5245	24.5	4.9
	750	17.02.22	+3	795	805	798	—	—	—	—	—	—	3	799	49.3	6.6
	500	17.02.22	+3	512	518	514	—	—	—	—	—	—	3	515	14.7	2.9
Поверхностные	200	08.08.22	+19	203	196	203	203	199	—	—	—	—	5	201	0.9	0.4

Примечание. СЭЗ — скважинные с электронным замедлением; АСО, ОСО — абсолютное и относительное среднее отклонение замедления от номинала.

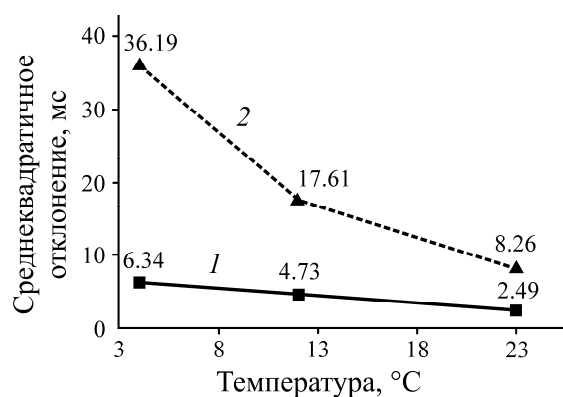


Рис. 1. Зависимость среднеквадратичного отклонения срабатывания детонаторов НСИ от температуры окружающей среды: 1 — НСИ Скв. 500 мс; 2 — НСИ Скв. 1000 мс

На рис. 2, 3 приведены схемы монтажа без учета и с учетом отклонения времени срабатывания детонаторов НСИ, на рис. 3 — для оценки сейсмобезопасности взрывов с учетом отклонения времени срабатывания детонаторов показаны: очередность взрывания скважинных зарядов (групп скважинных зарядов); группы с последовательно взрывающимися скважинами; группы с максимальным количеством скважинных зарядов в контексте эффекта “20 мс скользящего окна”. Сравнение схем монтажа А1 и Б1 по указанным параметрам показывает преимущество варианта А1 по отношению к Б1 по сейсмобезопасности.

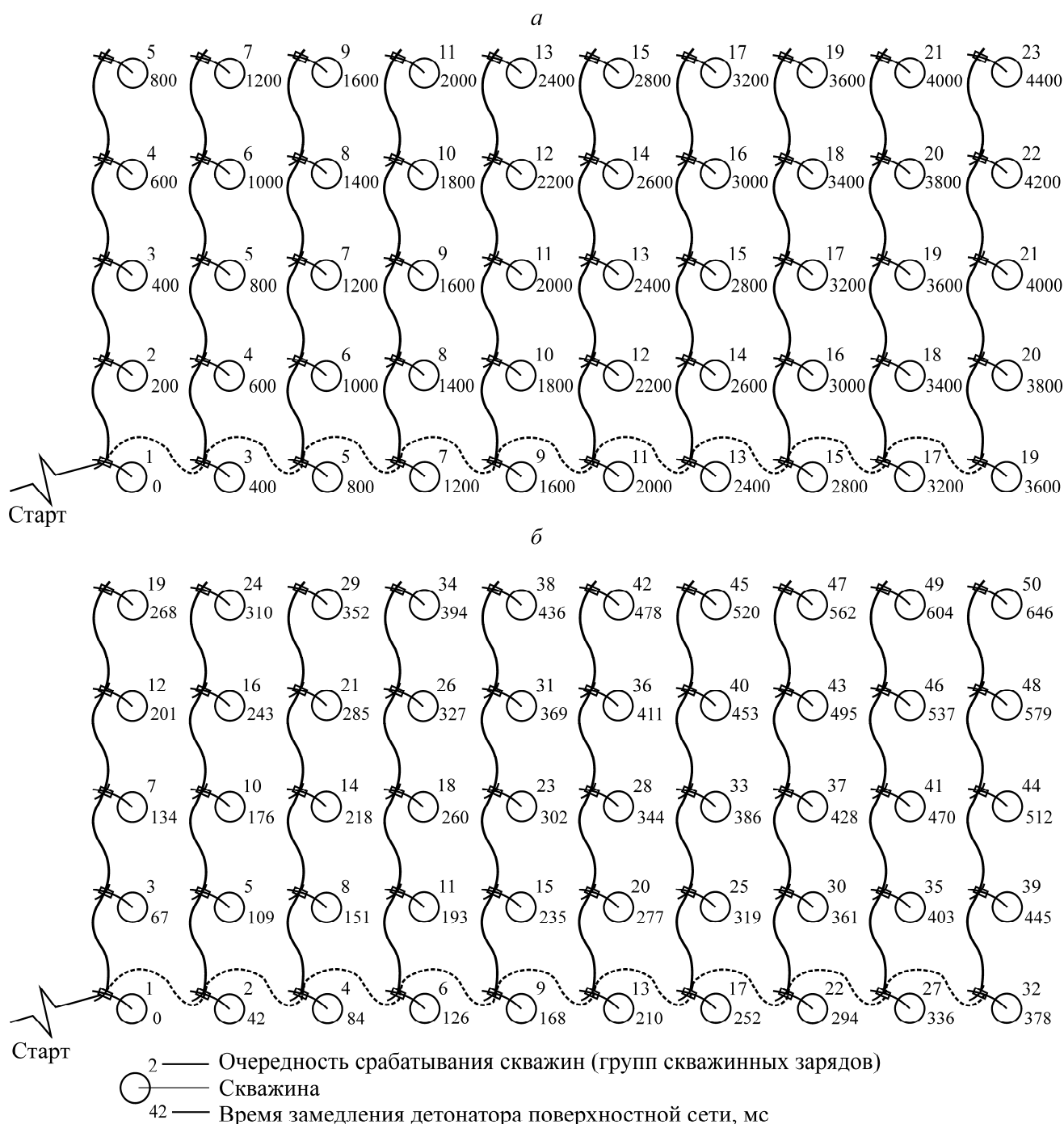


Рис. 2. Схема монтажа без учета отклонения времени задержек детонаторов: *a* — вариант А, взрывная сеть 200 × 400 мс; *б* — вариант Б, взрывная сеть 42 × 67 мс

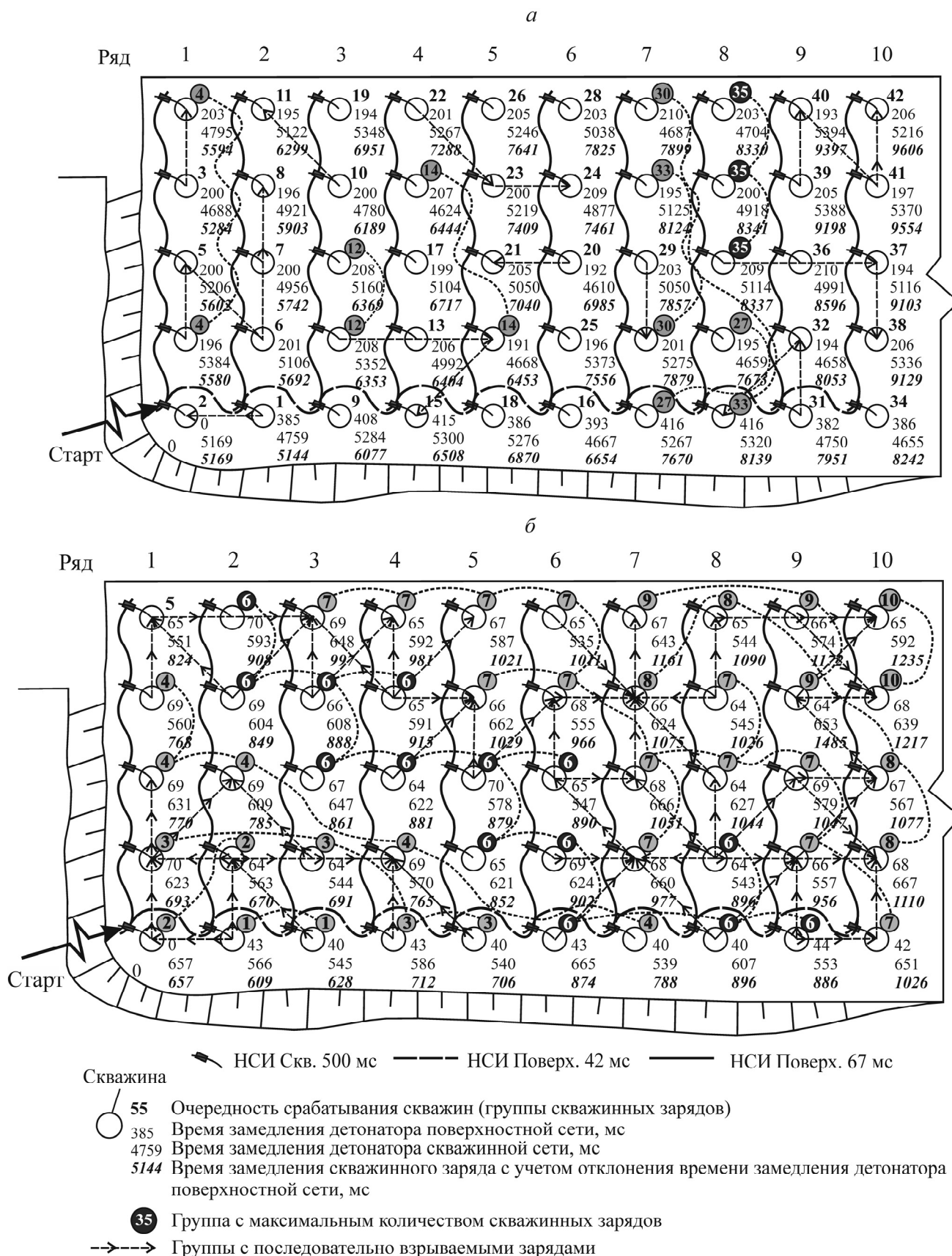


Рис. 3. Схема монтажа с учетом отклонения времени задержек детонаторов: *a* — вариант А1, взрывная сеть 200 × 400 мс; *б* — вариант Б1, взрывная сеть 42 × 67 мс

Для количественной оценки критерия относительной сейсмобезопасности применены критерии оценки монтажа взрывной сети (табл. 2). Критерий, приведенный в таблице третьим, не берется в расчет, но учитывается при оценке соответствующих схем.

ТАБЛИЦА 2. Критерии оценки монтажа взрывной сети по относительной сейсмобезопасности

Критерий	Описание	Значение / Баллы	Количество баллов равно
Дифференцирование срабатывания скважинных зарядов K_1	Процентное отношение количества взрывае- мых скважинных зарядов (групп зарядов) с условно принятым временем замедления к соответствующему количеству скважин- ных зарядов (групп зарядов) без учета отклонения времени замедления	80 % / 80	Количеству процентов от полученного значения
Масса одновременно взрываемого заряда K_2	Процентное отношение максимального количества скважинных зарядов в группе относительно общего количества скважин- ных зарядов взрывного блока	8 % / 92	Разности от 100 % и полученного значения
Удаление поверхностной сети от взрыва скважинного заряда	Минимальное расстояние от взрыва ска- жинного детонатора до взрыва крайнего детонатора поверхностной сети в диапазоне времени замедления скважинного детона- тора, выраженное в минимальном количестве сработавших детонаторов поверхностной сети по линии радиуса удаления от детона- тора скважинной сети, в проекции на гори- зонтальную плоскость	—	—
Последовательность взрывания скважинных зарядов K_3	Процентное отношение суммы последова- тельно взрывааемых скважинных зарядов всех групп к общему количеству скважин- ных зарядов взрывного блока	54 % / 54	Количеству процентов от полученного значения

Количество баллов по критериям K_1 , K_2 , K_3 рассчитывается по формулам:

$$N_{K_1} = \frac{N_{\text{общ}} - N_o}{N_{\text{общ}}} 100, \quad N_{K_2} = \frac{N_{\text{общ}} - N_{\text{max}}}{N_{\text{общ}}} 100, \quad N_{K_3} = \frac{N_{\text{спз}}}{N_{\text{общ}}},$$

где $N_{\text{общ}}$ — общее количество скважин в блоке; N_o — количество одновременно взрывааемых скважин (или групп скважин, если между ними замедление 20 мс и менее); N_{max} — наибольшее количество скважин в одновременно взрывааемых группах; $N_{\text{спз}}$ — сумма последовательно взрывааемых скважинных зарядов всех групп.

Количество баллов по критерию относительной сейсмобезопасности $K_{\text{отн}}$ равно

$$N_{K_{\text{отн}}} = N_{K_1} + N_{K_2} + N_{K_3},$$

а по усредненному значению $K_{\text{уср}}$ относительно схожих интервалов замедлений

$$N_{K_{\text{уср}}} = \frac{\sum N_{K_{\text{отн.сх}}}}{n_{\text{сх.ин}}}.$$

Здесь $N_{K_{отн.сх}}$ — среднее значение баллов по относительному критерию сейсмобезопасности среди схожих интервалов межскважинных замедлений, участвующих в разных вариациях типичных схем монтажа (табл. 3); $\sum N_{K_{отн.сх}}$ — количество соответствующих типичных схем монтажа; $n_{сх.ин}$ — сумма баллов по относительному критерию сейсмобезопасности среди соответствующих интервалов разных комбинаций схем монтажа. В табл. 3 приведен пример расчета оценки схем монтажа взрывной сети на основании представленных формул ($K_{уср}$ рассчитывался по четырем типичным схемам монтажа).

ТАБЛИЦА 3. Пример расчета оценки схем монтажа взрывной сети с применением внутрискважинных детонаторов НСИ с задержкой 5000 мс

Номер схемы мониторинга	Поверхностное замедление		Схема	Критерий оценки, в баллах				
	магистральный ряд	участковые ряды		K_1	K_2	K_3	$K_{отн}$	$K_{уср}$
1	17	25	Врубовая	25	81	57	163	163
2	25	17	>>	29	79	48	156	
3	17	25	Клиновая	26	78	58	162	
4	25	17	>>	29	82	60	171	
5	25	42	Врубовая	32	83	52	167	167
6	42	25	>>	32	79	51	162	
7	25	42	Клиновая	30	81	57	168	
8	42	25	>>	34	80	55	169	
9	42	67	Врубовая	33	82	60	175	179
10	67	42	>>	37	83	60	180	
11	42	67	Клиновая	35	83	62	180	
12	67	42	>>	41	85	56	182	
13	67	109	Врубовая	41	85	48	174	188
14	109	67	>>	50	90	64	204	
15	67	109	Клиновая	42	83	53	178	
16	109	67	>>	48	88	59	195	
17	109	176	Врубовая	49	88	57	194	207
18	176	109	>>	63	91	59	213	
19	109	176	Клиновая	52	90	60	202	
20	176	109	>>	62	92	66	220	
21	150	200	Врубовая	57	90	56	203	215
22	200	150	>>	62	92	66	220	
23	150	200	Клиновая	60	91	60	211	
24	200	150	>>	66	93	66	225	
25	200	400	Врубовая	66	93	50	209	235
26	400	200	>>	80	95	73	248	
27	200	400	Клиновая	75	93	61	229	
28	400	200	>>	81	95	76	252	
29	400	600	Врубовая	81	94	61	246	259
30	600	400	>>	88	96	72	263	
31	400	600	Клиновая	83	95	70	257	
32	600	400	>>	88/	96	80	270	

На основании расчетов построены зависимости критерия относительной сейсмобезопасности $K_{отн}$ от интервала межскважинного замедления, подтверждающие эффект повышения уровня сейсмобезопасности с увеличением интервалов времени замедления (рис. 4).

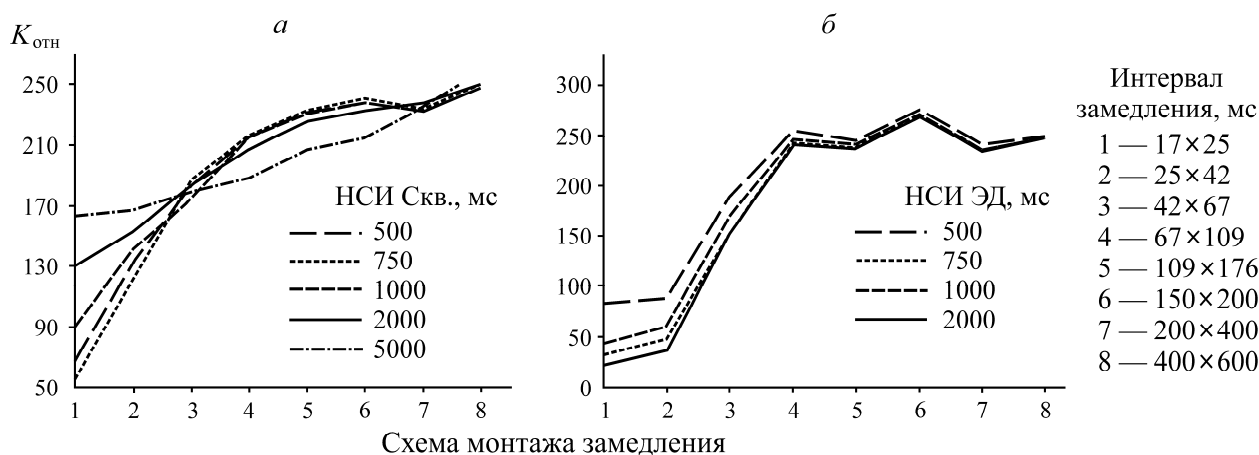


Рис. 4. Зависимость $K_{отн}$ от межскважинного интервала времени замедления при скважинных устройствах НСИ (а) и при устройствах скважинных НСИ с электронным детонатором (б)

В процессе исследований не зафиксировано опасных значений скорости смещения грунта и амплитуды колебаний при проведении инструментальных измерений сейсмических колебаний от взрывных работ с применением больших замедлений на открытых горных разработках Дальневосточного федерального округа, что подтверждается [35–37].

ВЫВОДЫ

Методом компьютерного моделирования выявлен эффект повышения сейсмобезопасности при увеличении интервала замедлений между скважинными зарядами взрывчатых веществ с учетом отклонения времени замедления детонаторов НСИ, что подтверждено инструментальными измерениями и данными обзора источников информации. Дальнейшая работа в этом направлении требует проведения исследований с целью влияния увеличения интервала времени замедления на качество взорванной горной массы. Необходима организация дополнительных измерений сейсмического воздействия от производства массовых взрывов при разных параметрах буровзрывных работ и горно-геологических условий. При этом важно осуществлять оценку качества взорванной горной массы с помощью современных методик, базирующихся на данных, полученных при отработке экспериментального блока, разделенного на части с одинаковыми параметрами буровзрывных работ, но с разными интервалами замедлений. Верифицированные и систематизированные результаты таких экспериментальных взрывов позволят выйти на более высокий уровень безопасности и качества взрывных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галимьянов А. А., Шевкун Е. Б., Кабиров А. Р., Казарина Е. Н. Фактор увеличения объема взрывного блока // Уголь. — 2023. — № 10 (1172). — С. 104–108.
2. Черских О. И., Галимьянов А. А., Гевало К. В. Совершенствование буровзрывных работ на Солнцевском угольном разрезе // Уголь. — 2022. — № 7 (1156). — С. 45–52.
3. Машуков И. В., Доманов В. П., Серг А. Г., Егоров Д. А. Расчет безопасных расстояний по сейсмическому воздействию массовых взрывов для зданий и сооружений с учетом схемы взрывания скважинных зарядов // Вестн. Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. — 2013. — № 1–2. — С. 16–22.

4. Шевкун Е. Б., Лещинский А. В., Добровольский А. И., Галимьянов А. А. Разработка сближенных наклонных пластов каменного угля в разнопрочных и мерзлых вмещающих породах. — М.: Горн. кн., 2019. — 256 с.
5. Галимьянов А. А., Рудницкий К. А., Гильденбрант К. В. и др. Влияние параметров промежуточного детонатора на скорость детонации смесевых взрывчатых веществ // Горн. пром-сть. — 2023. — № 3. — С. 130–133.
6. Кучерявый Ф. И., Друкованый М. Ф., Гаек Ю. В. Короткозамедленное взрывание на карьерах. — М.: Госгортехиздат, 1962. — 227 с.
7. Кутузов Б. Н. Методы ведения взрывных работ. Ч. 1. Разрушение горных пород взрывом. — М.: Горн. кн., 2007. — 471 с.
8. Барон В. Л., Кантор В. Х. Техника и технология взрывных работ в США. — М.: Недра, 1989. — 376 с.
9. Мосинец В. Н., Абрамов А. В. Разрушение трещиноватых и нарушенных горных пород. — М.: Недра, 1982. — 248 с.
10. Покровский Г. И. Взрыв. — М.: Недра, 1980. — 190 с.
11. Graya J. P. and Monaghan J. J. Numerical modelling of stress fields and fracture around magma chambers, J. Volcanology Geotherm. Res., 2004, Vol. 135. — P. 259–283.
12. Минеев С. П., Шиповский И. Е., Киселев В. В., Гулай А. А. Моделирование поведения выбросоопасного массива при взрывных работах в проводимой выработке // Геотех. механика. — 2015. — № 123. — С. 26–39.
13. Викторов С. Д., Закалинский В. М., Мингазов Р. Я., Шиповский И. Е. К методологии обеспечения минимизации негативных геотехнологических рисков и явлений при комплексном освоении недр // Проблемы недропользования. — 2021. — № 1 (28). — С. 21–27.
14. Лысак Ю. А., Плотников А. Ю., Шевкун Е. Б., Лещинский А. В. Взрывное рыхление горных пород на карьерах группы компаний “Петропавловск” // Горн. журн. — 2022. — № 2. — С. 45–50.
15. Шевкун Е. Б., Лещинский А. В., Лысак Ю. А., Плотников А. Ю. Особенности взрывного рыхления при увеличенных интервалах замедления // ГИАБ. — 2017. — № 4. — С. 272–282.
16. Шевкун Е. Б., Плотников А. Ю. Влияние схем взрывания на процессы в зоне предварительного разрушения // Маркшейдерия и недропользование. — 2020. — № 3 (107). — С. 23–34.
17. Инструкция по применению устройств, инициирующих с замедлением шпуровых Искра-Ш. — 2009.
18. Горная энциклопедия. Замедленное взрывание [Электронная версия]. URL: <http://www.mining-enc.ru/z/zamedlennoe-vzryvanie>.
19. Кокин С. В., Пархоменко Д. М., Бервин А. В. Опыт ООО “Кузбассразрезуголь-Взрывпром” по снижению воздействия массовых взрывов в Кузбассе на охраняемые объекты и окружающую среду // Горн. пром-сть. — 2019. — № 5 (147). — С. 72–75.
20. Фетоденко В. С., Матва С. В. Оптимизация интервалов замедлений при короткозамедленном взрывании вскрышных пород на разрезах Кузбасса // Устойчивое развитие горных территорий. — 2022. — Т. 14. — № 4. — С. 623–631.
21. ГОСТ Р 52892-2007. Измерение вибрации и оценка ее воздействия на конструкцию.
22. Камянский В. Н. Повышение эффективности скважинной отбойки на карьерах при одновременном взрывании скважинных зарядов: дис. ... канд. техн. наук. — М., 2018. — 123 с.
23. Трубецкой К. Н., Захаров В. Н., Викторов С. Д., Жариков И. Ф., Закалинский В. М. Взрывное разрушение горных пород при освоении недр // Проблемы недропользования. — 2014. — № 3. — С. 80–95.

24. Приказ Ростехнадзора от 03.12.2020 № 494 (ред. от 25.05.2022) “Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности “Правила безопасности при производстве, хранении и применении взрывчатых материалов промышленного назначения” [Электронная версия]. URL: <https://legalacts.ru/doc/prikaz-rostekhnadzora-ot-03122020-n-494-ob-utverzhdanii-federalnykh>.
25. Самусаев П. А., Новиньков А. Г., Протасов С. И., Завьялов А. Н. Сравнительная оценка сейсмического действия массовых взрывов при применении различных систем инициирования // Взрывное дело. — 2023. — № 141/98. — С. 107–130.
26. Басарнов А. И., Батраков Д. Н. Испытания устройств неэлектрической системы инициирования на время срабатывания в полигонных условиях // Вестн. Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. — 2023. — № 1. — С. 27–37.
27. Кондратьев С. А., Сысоев А. А., Катанов И. Б. Анализ результатов заводских испытаний устройств “Искра” для инициирования скважинных зарядов // Вестн. КузГТУ. — 2019. — № 6 (136). — С. 72–78.
28. Меньшиков П. В., Сеницын В. А., Шеменев В. Г. Методика определения фактических интервалов замедлений для рациональных параметров сетки скважин с использованием системы электронного взрывания “Daveytronic” // Успехи совр. естествознания. — 2016. — № 3. — С. 183–189.
29. Белин В. А., Горбонос М. Г., Мангуш С. К., Эквист Б. В. Новые технологии ведения взрывных работ // ГИАБ. — 2015. — № S1. — С. 87–102.
30. Тюпин В. Н., Хаустов В. В. Зависимость геомеханического состояния трещиноватого массива от интервала замедления в зоне сейсмического действия массовых взрывов // ГИАБ. — 2021. — № 2. — С. 45–54.
31. Silva J., Li L., and Gernand J. M. Reliability analysis for mine blast performance based on delay type and firing time, Int. J. Min. Sci. Technol., 2018, Vol. 28, No. 2. — P. 195–204.
32. Blair D. P. Limitations of electronic delays for the control of blast vibration and fragmentation, Proc. 9th Int. Symp. Rock Fragmentation by Blasting, 2010, Vol. 9. — P. 171–184.
33. Wu H. and Gong M. Calculation and application of hole by hole blasting vibration superposition based on measured delay times of detonators, Explosion and Shock Waves, 2019, Vol. 39, No. 2. — 025202.
34. Эквист Б. В. Обоснование и разработка методов повышения безопасности сейсмического проявления короткозамедленного взрывания на горных предприятиях: дис. ... д-ра техн. наук. — М., 2009. — 224 с.
35. Яковлев А. В., Шимкив Е. С., Переход Т. М. Основные направления и результаты исследований дробления трудно взрывааемых пород // Проблемы недропользования. — 2019. — № 3 (22). — С. 137–144.
36. Тюпин В. Н. Сейсмобезопасные интервалы замедления при взрывной отбойке пород сухого дока в стесненных условиях // Взрывное дело. — 2023. — № 141/98. — С. 151–167.
37. Wu H. and Gong M. Calculation and application of hole by hole blasting vibration superposition based on measured delay times of detonators, Explosion Shock Waves, 2019, Vol. 39, No. 2. — 025202.

Поступила в редакцию 18/I 2024
После доработки 20/III 2024
Принята к публикации 17/V 2024