

УДК 622.235.6

Катанов Игорь Борисович, профессор кафедры ОГР, д.т.н.
(КузГТУ, г. Кемерово)

Igor B. Katanov, professor, doctor of engineering sciences
(KuzSTU, Kemerovo)

Сысоев Андрей Александрович, профессор, д.т.н.
(КузГТУ, г. Кемерово)

Andrei A. Sysoev, professor, doctor of engineering sciences
(KuzSTU, Kemerovo)

Сысоев Иван Андреевич, студент
Ivan I. Sysoev, student
(KuzSTU, Kemerovo)

Выбор параметров замедлений при короткозамедленном взрывании на карьерах

Selection of deceleration parameters for short-lived blasting at quarries

В статье показаны недостатки выбора параметров замедлений для поверхностной взрывной сети, не учитывающие случайный характер срабатывания скважинного заряда, ввиду особенностей пиротехнических замедлителей. Представлен методический подход к расчету фактического времени инициирования системы скважинных зарядов при короткозамедленном взрывании, основанной на нормальном законе распределения времени срабатывания скважинных и поверхностных замедлителей. Показана возможность использования вероятностного метода для прогнозирования распределения общей массы ВВ на всем промежутке времени действия взрыва. В качестве примера, по разработанной программе ЭВМ, выполнен расчет количества зарядов, попадающих в группы инициирования во временном интервале от 0 до 20 мс с суммарной массой ВВ зарядов в этих группах и расстояние сейсмического действия взрыва при использовании комплекта пиротехнических поверхностных «ИСКРА-П» и внутрискважинных замедлителей «ИСКРА-С» или электронных замедлителей «ИСКРА-Т». Показано, что использование электронных скважинных замедлителей «ИСКРА-Т» позволяет снизить количество зарядов, инициирующихся в интервале замедления менее 20 мс и соответственно опасное расстояние по сейсмоэффекту взрыва.

The article shows the disadvantages of choosing the deceleration parameters for the surface explosive network, which do not take into account the random nature of the triggering of the borehole charge, due to the features of pyrotechnic retarders. A methodical approach to calculating the actual initiation time

of a system of borehole charges with short-delayed detonation based on the normal law of the distribution of the response time of borehole and surface retarders is presented. The possibility of using a probabilistic method to predict the distribution of the total mass of explosives over the entire duration of the explosion is shown. As an example, according to the developed computer program, the calculation of the number of charges falling into the initiation groups in the time interval from 0 to 20 ms with the total mass of explosive charges in these groups and the distance of the seismic action of the explosion using a set of pyrotechnic surface "ISKRA-P" and downhole retarders "ISKRA-S" or electronic retarders was performed "ISKRA-T". It is shown that the use of electronic borehole retarders "ISKRA-T" allows to reduce the number of charges initiated in the deceleration interval of less than 20 ms and, accordingly, the dangerous distance along the seismic effect of the explosion.

Короткозамедленное взрывание (КЗВ) позволяет снизить сейсмический эффект, действие ударной воздушной волны и расстояние разлета кусков породы. В общем случае расстояние, на котором сейсмический эффект взрыва превышает допустимые значения для охраняемых объектов, зависит от массы зарядов одновременно взрываемых в двадцати миллисекундном интервале [1]. Кроме того, при короткозамедленном взрывании обеспечивается более интенсивное и равномерное дробление породы. Интервал замедления и последовательность инициирования зарядов зависят от задач, которые необходимо решить в результате взрыва горной массы с определенными свойствами – дробление при минимизации сейсмического эффекта.

При монтаже взрывной сети с детонирующим шнуром значение интервала замедления между сериями ориентировочно можно определить по формуле [2–4]

$$\tau_1 = AW_{\text{спп}}, \quad (1)$$

где A – эмпирический коэффициент, зависящий от крепости пород (для легковзрываемых пород $A = 6$; для пород средней взрываемости $A = 5$; для трудновзрываемых пород $A = 3$), мс/м; $W_{\text{спп}}$ – линия сопротивления по подошве уступа (при наклонных скважинах $W_{\text{спп}}$ принимается равной расстоянию между рядами), м.

При использовании для монтажа поверхности взрывной сети замедлителей систем инициирования (СИ) на основе ударно-волновых трубок неэлектрических систем «Искра», «Эделин», «Коршун», «Эксель», «Нонель» и др., как правило, учитывают условие, что интервал замедления τ_1 взрывов зарядов смежных скважин в ряду (за ряд принимаются сква-

жины, располагающиеся вдоль блока) должен превышать время замедления τ_2 между инициированием зарядов смежных рядов. Выполнение этого условия позволяет обеспечить одинаковую форму открытой поверхности для каждого из скважинных зарядов последующих рядов.

Параметр τ_1 , определяющий интенсивность дробления, призван обеспечить развития трещин во взываемом массиве. Интервал замедления, необходимый для образования трещин, определяется с учетом скорости развития трещин и принимается из условия $C_{\text{тр}} \approx 0,2C$ [5]:

$$\tau_1 = \frac{20W}{C}, \quad (2)$$

где C – скорость продольной волны в массиве, м/с; W – линия наименьшего сопротивления (кратчайшее расстояние от середины заряда до открытой поверхности), м.

В работах [2–5] показано, что при недостаточном интервале замедления, порода, отбивааемая в первую очередь, не успевает переместиться до момента взрыва зарядов следующей ступени и отбойка производится в условиях зажима. Представленный метод расчета межскважинного замедления показывает, что для вскрышных пород разрезов Кузбасса качественное дробление обеспечивается при интервалах замедления не менее 40 мс.

На следующем шаге расчетные интервалы замедления τ_1 и τ_2 корректируются с учетом номиналов замедлений пиротехнических капсюль-детонаторов, выпускаемых промышленностью.

При проведении взрывных работ ставится также задача снижения сейсмического эффекта от массового взрыва. Для этого необходимо знать количество зарядов, которое может быть инициировано в 20 мс интервалах всего времени действия взрыва [1]. Поскольку пиротехнические замедлители срабатывают с погрешностью до 10 % от номинала [6], то следует учитывать их случайный характер инициирования во времени. При взрывании одного ряда заряды будут инициировать последовательно по одному с замедлением равным замедлению между скважинами в магистрали. Начиная с двухрядного взрывания блоков количество одновременно взываемых зарядов изменяется. В этом случае рациональные интервалы, как внутристкважинных замедлений, так и замедлений поверхностной сети следует выбирать с учетом вероятности их срабатывания.

Анализ натурных данных по применению детонаторов с различными номиналами замедлений при реализации поперечных схем взрывания на разрезе «Кедровский» [7] показал, что применение поверхностных замедлений в интервале от 67 до 200 мс в магистральном ряду, от 42 до 109 мс в поперечных рядах и скважинных замедлений 1000–2000 мс при изменении количества продольных рядов от пяти до четырнадцати приводит к тому,

что соотношение номиналов замедлителей существенно влияет на максимальное количество зарядов в группе одновременности их инициирования.

В общем случае любой схеме соединения зарядов можно поставить в соответствие прямоугольную таблицу, в ячейках которой будет представлено случайное время срабатывания капсюль-детонатора каждого отдельного заряда [8]. Время срабатывания применяемых замедлителей подчиняется нормальному закону распределения с известными параметрами: τ_1, τ_2, τ_3 – соответственно номинальные замедления между скважинами магистрального продольного ряда, между скважинами в дочерних (поперечных) рядах и внутрискважинное замедление, мс; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – соответствующие среднеквадратические отклонения, мс. Через s_1, s_2, s_3 обозначим соответствующие случайные отклонения от номиналов, мс. Время t_i срабатывания i -го заряда в каждой отдельной последовательности будет складываться из времени срабатывания предыдущего заряда данной последовательности t_{i-1} , случайного времени отклонения скважинного замедлителя s_3 от своего номинала и случайного времени срабатывания поверхностного замедлителя $\bar{\tau}_i + \bar{s}_i$, где $\bar{\tau}_i, \bar{s}_i$ в зависимости от положения заряда в схеме соединения могут принимать значения τ_1, s_1 или τ_2, s_2 . Поэтому случайное время срабатывания заряда будет определяться рекуррентной формулой

$$t_i = t_{i-1} + s_3 + (\bar{\tau}_i + \bar{s}_i) \text{ при } t_0 = s_3, \quad (3)$$

где i – индекс соответствия положения рассматриваемого скважинного заряда относительно предыдущих более ранних замедлителей по пути движения инициализирующего импульса в поверхностной схеме монтажа взрывной сети.

Комплект системы инициирования, в который входят поверхностные и скважинные замедлители для монтажа взрывной сети, проводят на основании расчета критериев n_{\max} и V_m при различных сочетаниях номиналов замедлений. В качестве критериев при сравнении вариантов приняты максимально возможное количество зарядов в группе, попадающих при взрыве в интервал 20 мс (n_{\max} , шт.) и коэффициент вариации массы ВВ в этих группах (V_m , %), который определяет относительный разброс случайной величины и показывает, какую долю среднего значения этой величины составляет её средний разброс.

Этот критерий используется на том основании, что в статистике существует приближенная эмпирическая оценка события. Если показатель вариации $V_m \leq 33\%$, то статистическая совокупность считается однород-

ной. В рассматриваемом нами случае это означает, что общая масса ВВ будет равномерно распределена по группам на всем протяжении взрыва.

Различные соотношения поверхностных и скважинных замедлений приводят к различному распределению суммарной массы скважинных зарядов по интервалам одновременности. Неравномерность их распределения влечет за собой неравномерность распределения локальных пиков скоростей смещений, что с точки зрения сейсмического воздействия массового взрыва является неблагоприятным. Очевидно, что при одинаковой глубине скважин и, соответственно, одинаковой массе заряда в скважинах коэффициент вариации массы будет равен коэффициенту вариации количества зарядов в группах.

Наиболее благоприятным с точки зрения сейсмического воздействия взрыва является случай равномерного распределения общей массы ВВ по группам. Такая ситуация возможна только при высокоточном полностью электронном инициировании, когда каждому скважинному заряду можно запрограммировать соответствующее время взрыва. Использование пиротехнических замедлений в поверхностной сети и, тем более, внутри скважин предопределяет случайный характер формирования групп. Поэтому коэффициент вариации такой случайной величины, как масса заряда в группе, будет $V_m > 0$. Чем больше коэффициент вариации, тем больше интенсивность сейсмического воздействия взрыва [8].

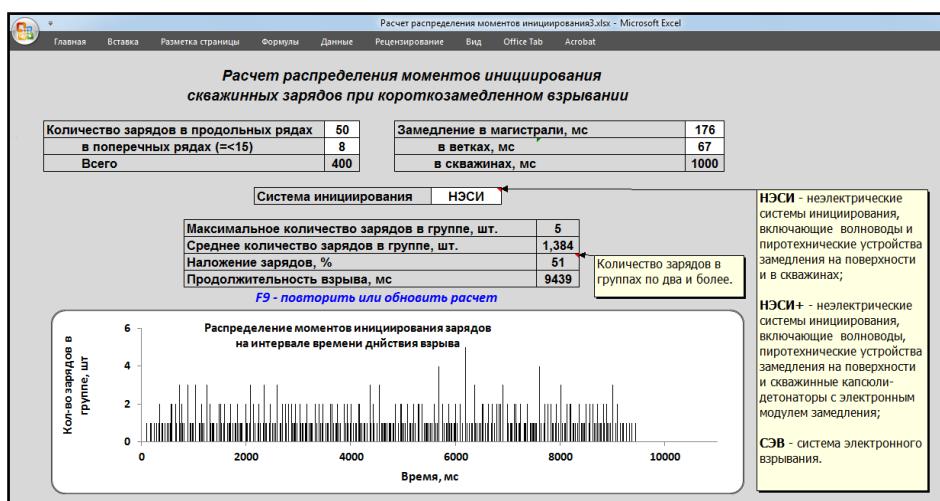
Управление сейсмическим воздействием взрывов на охраняемые объекты реализуется посредством параметров буровзрывных работ, определяемых, в частности, по методике, разработанной в работе [9]. Рекомендуется выбор замедлений поверхностной и скважинной сети проводить с учетом вариации параметров буровзрывных работ (количества групп замедлений в массовом взрыве, величины интервала замедления между группами зарядов и максимальной массы единовременно инициируемого взрывчатого вещества в группе одновременности).

Инструментом для выбора рационального соотношения параметров замедлителей служит программа для ЭВМ [10], разработанная на основе изложенных принципов и их опытно-промышленной проверки [11]. Программа позволяет выполнять расчет распределения моментов инициирования скважинных зарядов на полном интервале времени действия взрыва при различных системах инициирования, оценивать полученный результат по максимальному количеству зарядов, взрывающихся в интервале времени 20 мс и общему количеству зарядов в группах не менее двух, производить выбор системы инициирования и интервалов межскважинного замедления для конкретных горнотехнических условий с целью снижения сейсмического воздействия. При использовании пиротехнических устройств замедления учитывается фактор случайного отклонения момента инициирования от номинала.

Фрагменты интерфейса программы при использовании различных систем инициирования представлены на рис. 1. Здесь показаны результаты расче-

та для соотношения поверхностных замедлений 176– 67 мс при внутристекажинном замедлении 1000 мс с использованием пиротехнических устройств «Искра-С» и устройств с электронным модулем «Искра-Т».

а



б

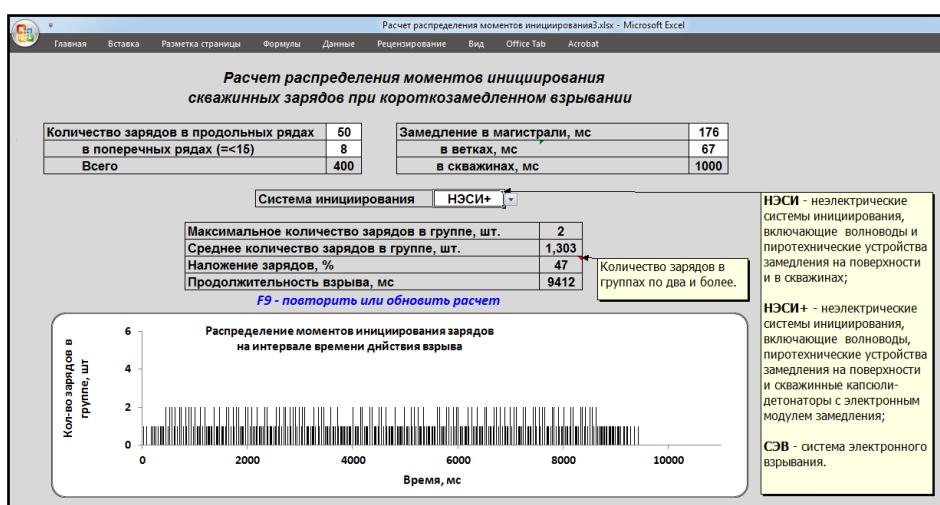


Рис. 1. Фрагменты программы по расчету параметров распределения моментов инициирования скважинных зарядов при использовании капсюлей-детонаторов «Искра-С» (а) и «Искра-Т» (б)

Сравнение этих частных вариантов комбинации средств замедления показывает, что использование капсюлей-детонаторов с электронным замедлением «Искра-Т» позволяет уменьшить количество зарядов в группе с 5 до 2 при одновременном уменьшении степени наложения зарядов и среднего количества зарядов в группе по сравнению с пиротехническими детонаторами «Искра-С». Очевидно, что это будет способствовать снижению сейсмических показателей действия взрыва. Последующий расчет радиуса опасной зоны по

максимальной массе группы одновременно взрываемых зарядов показывает возможность его уменьшения на 50 – 80 м.

Предлагаемый метод и соответствующая компьютерная программа позволяют выполнять расчеты для любых практически используемых номиналах замедлений и систем инициирования и выбирать такие из них, которые наиболее безопасны с точки зрения сейсмического воздействия взрыва.

Список литературы

1. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при взрывных работах». Сер. 13. Вып. 14 – Москва : ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2014. – 332 с. (изменениями от 30 ноября 2017 г. № 518).
2. Кутузов, Б. Н. Справочник взрывника: в 2 ч. Ч. II. Техника, технология и безопасность взрывных работ / Б. Н. Кутузов. – Москва : Издательство «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2014. – 304 с. – (Библиотека горного инженера. Т. 10 «Взрывное дело». Кн. 1).
3. Белин, В. А. Технология и безопасность взрывных работ / В. А. Белин, Б. Н. Кутузов, И. Б. Строгий, М. И. Ганопольский, М. Н. Овчеренко. – Москва : Издательство «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2016. – 426 с. : табл., ил. – (Библиотека горного инженера. Т 10 «Взрывное дело». Кн. 2).
4. Репин, Н. Я. Технологические процессы при открытой добыче угля / Н. Я. Репин, В. Б. Артемьев, Л. Н. Репин, П. И. Опанасенко. – Москва : Издательство «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2015. – 560 с. : ил., табл., – (Библиотека горного инженера. Т. 4 «Открытые горные работы». Кн. 6).
5. Мосинец, В.Н. Дробящее и сейсмическое действие взрыва в горных породах. – М.: Недра, 1976. – 271 с.
6. Сысоев, А. А. Анализ систем инициирования скважинных зарядов на карьерах // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2016. – № 4. С. 60-67.
7. Кокин, С. В. Управление параметрами массового взрыва / С. В. Кокин, Д. М. Пархоменко, А. В. Бервин // Взрывное дело. –2019. № 125/8. – С. 39–52.
8. Сысоев, А. А. Сравнительная оценка пиротехнических и электронных капсюлей-детонаторов на основе вероятностной модели инициирования системы скважинных зарядов / А. А. Сысоев, С. А. Кондратьев, И. Б. Катанов // Взрывное дело. –2020. № 126/83. – С.85–99.
9. Патент на изобретение RU № 2734651C1. Способ многорядного короткозамедленного взрывания / И. Б. Катанов, А. А. Сысоев, С. А. Кондратьев // опубликовано 22.10.2020. Бюл. № 30.

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021616191. Программа расчета параметров распределения моментов инициирования скважинных зарядов, оценки и оптимизации интервалов замедления при массовых взрывах на карьерах / А. А. Сысоев, И. Б. Катанов, С. А. Сысоев И. А. // дата регистрации в реестре 19 апреля 2021.
11. Сысоев, А. А. Опытно-промышленная проверка вероятностной модели короткозамедленного инициирования системы скважинных зарядов А. А. Сысоев, И. Б. Катанов, С. А. Кондратьев. // Взрывное дело. –2019. № 125/8. – С. 5–16.