

## ОБ ЭФФЕКТЕ КУМУЛЯЦИИ ПРИ РАЗРУШЕНИИ ГОРНЫХ ПОРОД ДЕКОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ЗАРЯДАМИ

Дано теоретическое обоснование возможностей и перспектив использования принципов работы кумулятивных зарядов для технологического разрушения горных пород при освоении недр.

In article the theoretical substantiation of opportunities and prospects of use of principles of work of cumulative charges for technological destruction of rocks is given at development of bowels.

Современный этап развития геотехнологии характеризуется резким замедлением темпов качественного развития, что, в свою очередь, связано с опережающим замедлением процессов совершенствования буровзрывного комплекса как основы большинства применяемых горных технологий. Традиционная отбойка руд и пород шпуровыми или скважинными зарядами в значительной степени исчерпала свои возможности. Поиски путей повышения эффективности буровзрывных работ ведутся, главным образом, в направлении совершенствования, автоматизации и роботизации процессов бурения, т.е. способов создания зарядных камер. Что же касается конструкции скважинных и шпуровых зарядов, то здесь уже давно нет принципиальных изменений. Практически во всех случаях отбойка ведется монозарядами с использованием модели расширяющегося взрыва, когда значительная часть концентрически расходящейся во все стороны от заряда энергии взрыва уносится вглубь массива. Поэтому от 50 до 70 % (по разным оценкам) общей энергии заряда расходуется на технологически ненужное, а чаще всего – вредное, изменение состояния массива горных пород вне отбиваемого объема. Такое положение вещей является результатом действия двух внутренних противоречий сложившейся системы, не преодолимых в рамках данной модели действия взрыва.

Первое из них – противоречие между энергетической целесообразностью увеличения диаметра (а значит, и массы) единичных зарядов и техническими ограничениями в области создания средств бурения скважин все возрастающего диаметра [10]. Второе – противоречие между технологически необходимой асимметрией распределения энергии взрыва в обуренном массиве и вытекающей из самой сущности явления детонации ВВ абсолютной симметрией процесса передачи в этот массив энергии каждого единичного заряда.

Возможности преодоления первого противоречия связаны с реализацией идеи управления взрывом путем деконцентрации зарядов, когда единичный заряд большого диаметра заменяется группой эквивалентных по общей энергии и одновременно взрываемых зарядов малого диаметра. В этом случае, при соблюдении определенных условий, простым увеличением числа зарядов в группе можно обеспечить формирование заряда, эквивалентного единичному заряду практически любого диаметра без увеличения мощности буровых установок.

Преодоление второго противоречия требует целенаправленного и кардинального вмешательства в процессы переноса энергии в обуренном объеме. Частично такие возможности также появляются при реализации идеи деконцентрации зарядов.

Замена единичного заряда большого диаметра и мощности на группу эквивалентных по общей энергии зарядов меньших размеров открывает совершенно новые возможности по управлению процессами передачи и распределения в разрушаемом массиве энергии взрыва путем изменения параметров и пространственного положения каждого единичного заряда в группе [10].

При этом сохраняется общепринятая модель расходящегося взрыва, в рамках которой путем целенаправленного изменения формы интегрального фронта волны разрушения изменяется уровень диссипативных потерь энергии по различным направлениям [2]. За счет этого создаются дополнительные возможности повышения показателей взрывной отбойки, но в силу общей симметрии развития процессов передачи энергии в массив сохраняется явление бесполезного расхода энергии вглубь массива за пределами проектных контуров разрушаемых блоков.

Большие и весьма интересные геотехнологические перспективы могут появиться при создании способов разрушения пород с резкой асимметрией распределения энергии взрыва в пространстве и максимальной ее концентрацией в направлении обнаженных плоскостей разрушаемого массива. Возможность реализации этой идеи связана с использованием давно известного принципа кумуляции энергии взрыва за счет формы заряда [5]. Один из вариантов трансформации этой идеи в технологию отбойки руд и пород на подземных горных работах рассмотрен в работе В.А.Горбунова [3], где достаточно детально обоснованы принципы построения технологии минной отбойки на основе использования энергии сходящегося взрыва.

Анализируя теорию и практику создания и применения явления кумуляции при разрушении различных материалов, можно выделить два способа создания кумулятивной струи: 1) пустотный; 2) имплозионный. Первый из них характеризуется наличием облицованной металлом (или необлицованной) выемки определенной формы в теле заряда ВВ со стороны, противоположной детонатору. По оси этой выемки происходит уплотнение и рост давления продуктов детонации и

формируется кумулятивная струя с очень высокой концентрацией энергии (рис.1). Часть заряда, прилежащая к выемке, называется активной, так как она формирует кумулятивную струю из продуктов детонации остальной части заряда, именуемой пассивной. Пассивная часть заряда располагается снаружи активной и взрывается первой [5].

Второй из обозначенных выше способов реализации кумулятивного эффекта отличается тем, что пассивный и активный заряды образуются из взрывчатых веществ с различными свойствами. При этом пассивный заряд располагается в геометрическом центре кумулятивной выемки активного заряда (рис.2). При детонации пассивного заряда полусферическая детонационная волна возбуждает детонацию одновременно по всей поверхности активного заряда. В результате продукты детонации обоих зарядов образуют кумулятивную струю (фаза имплозии) с экстремальными значениями температуры и давления [3].

Рассмотрим более подробно возможности создания и особенности работы кумулятивных деконцентрированных зарядов обоих указанных типов. Заряды первого типа с пустотным механизмом создания кумулятивной струи можно сформировать путем сочетания заряженных и незаряженных параллельно-сближенных скважин в группе. Общий принцип построения такого заряда виден из рис.3. Заряженные скважины активной и пассивной частей заряда инициируются одновременно. Минимальное количество скважин  $n_{\min}$ , создающих кумулятивную выемку, определяется из условия размещения в ней раздробленной горной массы (рис.3)

$$n_{\min} = \frac{(K_p - 1) A^2 \operatorname{ctg} \alpha}{K_p \pi d_i^2},$$

где  $K_p$  – коэффициент разрыхления породы;  $A$  – ширина основания кумулятивной выемки;  $\alpha$  – угол раствора сторон кумулятивной выемки;  $d_i$  – диаметр скважин, формирующих кумулятивную выемку; число ( $n$ ) и диаметр ( $d$ ) скважин в границах кумулятивной выемки могут быть любыми при соблюдении условия  $n > n_{\min}$ .

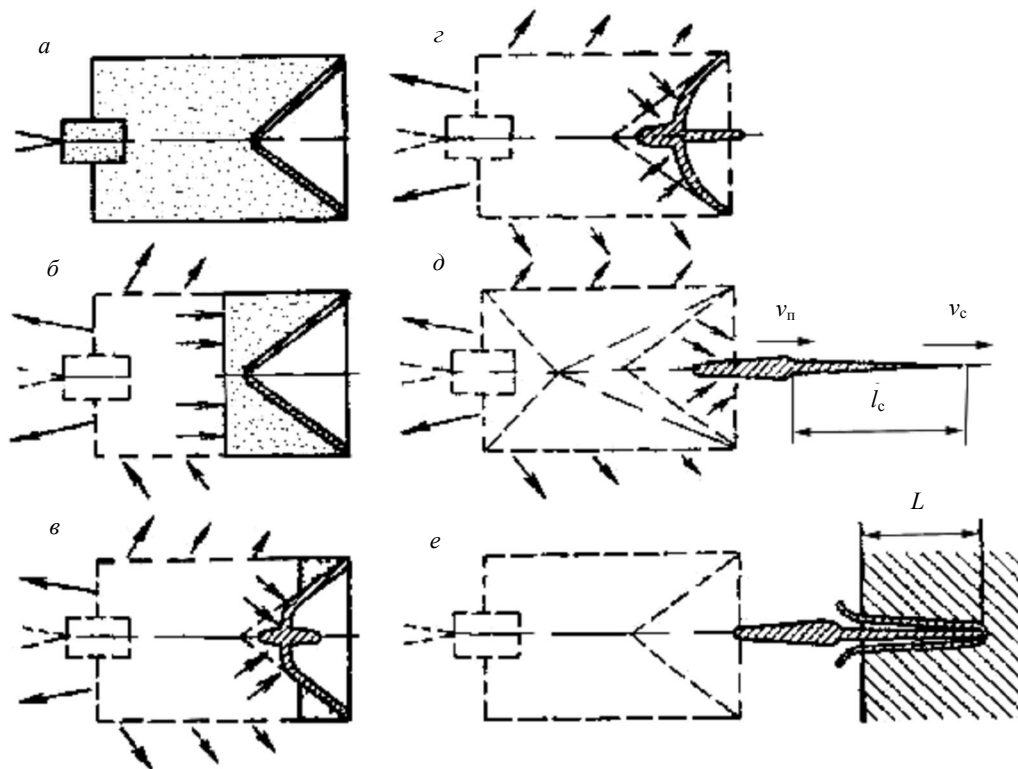


Рис.1. Фазы образования кумулятивной струи при взрыве заряда с конической облицовкой (по Е.М.Вицени) [3]: *a* – заряд до взрыва; *б* – фронт волны детонации подходит к вершине выемки; *в* – фронт волны детонации продвинулся до середины глубины выемки; облицовка выемки за фронтом волны детонации деформируется, начали образовываться кумулятивная струя и пест; *г* – взрывчатое разложение заряда закончилось, облицовка под действием газов взрыва продолжает деформироваться с образованием струи и песта; *д* – образование струи и песта закончилось, но струя продолжает растягиваться в полете; *е* – проникновение струи в преграду  $v_n$  – скорость песта;  $v_c$  – скорость струи;  $l_c$  – длина струи;  $L$  – глубина проникновения струи в преграду

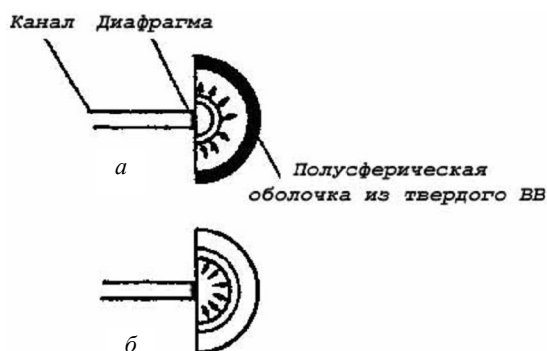


Рис.2. Схематическая диаграмма, показывающая принцип имплозионного механизма образования кумулятивной струи [4]: *a* – фаза детонации пассивного заряда; *б* – фаза имплозии

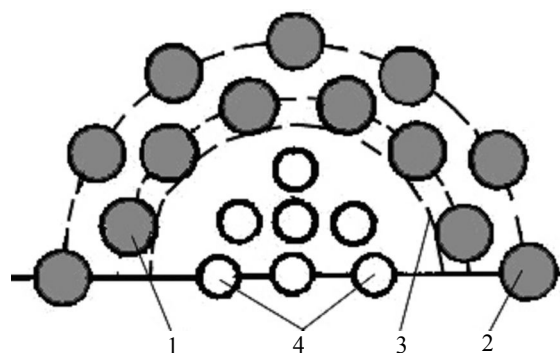


Рис.3. Принципиальная схема формирования кумулятивного децентрализованного заряда пустотного типа

1 – активный заряд; 2 – заряжаемые скважины (пассивный заряд); 3 – условная граница кумулятивной выемки; 4 – незаряжаемые скважины

Опираясь на классические работы академика М.А.Лаврентьева [5], а также на исследования Ф.А.Баума, К.П.Станюковича и Б.И.Шехтера [1], попробуем интерпретировать эти представления в области разрушения пород кумулятивными деконцентрированными зарядами. Для создания каких-либо расчетных схем необходимы простые, понятные и непротиворечивые предпосылки. В качестве таковых могут быть приняты следующие гипотезы:

- детонация зарядов происходит мгновенно, а действие на контуре кумулятивной полости сводится к импульсу, перпендикулярному ее поверхности [5];

- материал в зоне действия взрыва принимаем за идеальную несжимаемую жидкость [5];

- невыбуренная порода ( $V_{об}$ ) внутри контура кумулятивной полости представляется в виде инертной оболочки толщиной  $h_{ia} = V_{ia} / S_i$  на поверхности ( $S_n$ ) этой полости.

Эти предпосылки дают возможность представить себе следующую качественную картину явления. В начальный момент детонации основного заряда все элементы материала внутри кумулятивной полости приобретают скорость в направлении оси этой выемки. В результате инерционного обжатия образовавшейся газопородной массы формируется струя, скорость которой будет тем выше, чем меньше угол  $\alpha$  (рис.3). Эта струя и производит разрушение горной породы до обнаженной поверхности. Характерно, что по мере развития процесса длина струи уменьшается, а механизм разрушения при этом не зависит от скорости [5].

Согласно представлениям академика М.А.Лаврентьева [5], расчетная схема механизма формирования кумулятивного действия может быть принята как установившееся движение идеальной жидкости в среде с постоянным давлением, когда происходит лобовое столкновение двух соосных струй диаметром  $2R$  и  $2r$  (рис.4).

Поток имеет свободные поверхности  $L_1$  и  $L_2$  и поверхность раздела  $\gamma$ . Из условия установившегося движения по формуле Бернулли

$$\delta = C - \frac{\rho}{2} v^2,$$

где  $\rho$  – плотность потока;  $C$  – постоянная равная давлению при  $v = 0$ , т.е. в нашем случае в точке оси  $x = 0$  на поверхности раздела;  $v$  – скорость потока.

Решение этой задачи дано в работе [5], где показано, что для плоского случая форма свободных струй и распределение скоростей в потоке могут быть определены по уравнению Жуковского, а для случая с осевой симметрией задача редуцируется к некоей нелинейной краевой задаче для системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \psi}{\partial x} &= -y \frac{\partial \phi}{\partial y}; \\ \frac{\partial \psi}{\partial y} &= y \frac{\partial \phi}{\partial x}. \end{aligned} \right\}$$

Из условия постоянства давления в среде вдоль поверхности  $L_1$  имеем  $v = v_1$ . При этом на поверхности раздела  $\gamma$  скорости потоков должны быть связаны соотношением:  $\rho_1 v_+^2 = \rho_2 v_-^2$ . Отсюда следует, что вдоль поверхности  $L_2$  скорость  $v = \sqrt{\rho_1 / \rho_2} v_1$ . Этим самым определяется и скорость встречного потока:  $v_2 = v_1 \sqrt{\rho_1 / \rho_2}$ .

В рамках гидродинамической модели развития процесса проникновения кумулятивной газопородной струи в преграду, можно представить этот процесс в виде соударения двух струй различного диаметра в

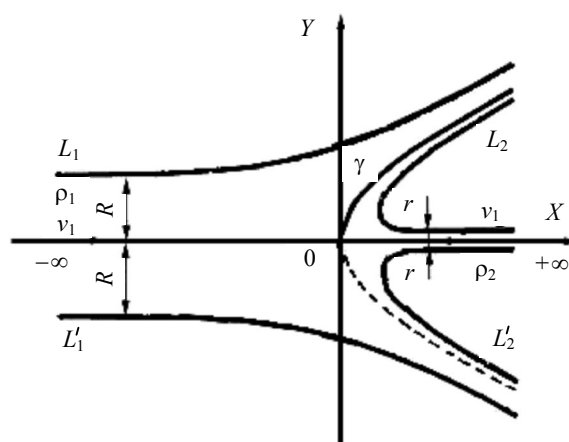


Рис.4. Схема движения встречных струй диаметром  $2R$  и  $2r$  до и после соударения

подвижной системе координат, относительно которой струя большего диаметра неподвижна. В этом случае скорость более тонкой подвижной струи [5]

$$W = v_1 + v_2 = (1 + \lambda)v_2,$$

где  $\lambda = \sqrt{\rho_2 / \rho_1}$ .

Тогда скорость места соударения струй, которая, по сути, является скоростью проникновения струи диаметром  $2r$ ,

$$W_c = \frac{\lambda}{1 + \lambda} W.$$

Из этого выражения видно, что скорость проникновения всегда ниже скорости струи, а при  $\rho_1 = \rho_2$ , когда плотность кумулятивной струи равна плотности разрушаемой породы, скорость проникновения составит половину скорости струи.

Отсюда следует еще один важный факт: если струя некоторого конечного сечения продвинется на длину  $l$ , точка проникновения ее в породу продвинется на величину  $L_1 = l(W_n / W)$ . При этом сама струя укоротится на  $\Delta l$ :

$$\Delta l = l - L_1 = l \left( 1 - \frac{W_n}{W} \right) = l \left( 1 - \frac{\lambda}{1 + \lambda} \right).$$

Следовательно, отношение израсходованной части струи ( $\Delta l$ ) к глубине проникновения ее в преграду ( $L_n$ )

$$\frac{\Delta l}{L_1} = \frac{l - L_1}{L_1} = \frac{1}{\lambda},$$

Откуда

$$L_1 = \sqrt{\rho_2 / \rho_1} \Delta l.$$

Результаты аналогичных исследований применительно к особенностям разрушения горных пород кумулятивными зарядами приведены в работах [1, 6]. Было установлено, что пробивная способность кумулятивной струи тем выше, чем больше поверхность кумулятивной выемки, т.е. чем больше размер ее основания ( $A$ ) и длина образующей ( $L_0$ ). Значительное влияние оказывают также соотношения свойств разрушаемого материала и материала облицовки. В математическом виде эти соотношения описываются выражением [8]

$$L_1 = L_0 \psi \sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_1} \frac{\delta_2}{\delta_1}},$$

где  $\psi$  – коэффициент, зависящий от материала облицовки и угла раствора выемки;  $\delta_1$  и  $\delta_2$  – временное сопротивление сжатию материала соответственно облицовки и горной породы.

В любом практическом случае струя всегда имеет конечную длину ( $L_0$ ), определяемую общей энергией заряда и равную длине образующей кумулятивной выемки, а следовательно, в период времени, близкий к моменту начального соударения струи с преградой, будет иметь место резко выраженный неустановившийся процесс. Однако, как показано в работах [5, 8], процессы, происходящие в голове струи, будут заметно влиять только на расстоянии 2-3 ее диаметра. Поэтому, с учетом первоначальных предпосылок, вполне можно принять дополнительную гипотезу о том, что процесс пробивания преграды из горной породы кумулятивной газопородной струей, когда  $\delta_1 = \delta_2$ , протекает по законам установившегося проникания жидкой струи в жидкость. Тогда последняя формула примет вид [5]

$$L_1 = \sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_1}} L_0,$$

где  $L_0$  – длина струи;  $\rho_2$  – ее плотность;  $\rho_1$  – плотность разрушаемой преграды.

Применительно к условиям геотехнологии, величина  $L_n$  есть не что иное, как значение ЛНС, преодолеваемое кумулятивным зарядом. С учетом принятых ранее предпосылок, технологический кумулятивный децентрированный заряд (см. рис.3) может быть представлен в виде функциональной схемы, приведенной на рис.5.

Горная порода, оставшаяся внутри объема кумулятивной выемки после бурения в ней  $n$  ( $n > n_{\min}$ ) скважин диаметром  $d_i$ , выполняет функцию облицовки, толщина которой

$$\delta_{ia} = \frac{A^2 \cos 0,5\alpha - n\pi d_i^2 \sin 0,5\alpha}{4A}.$$

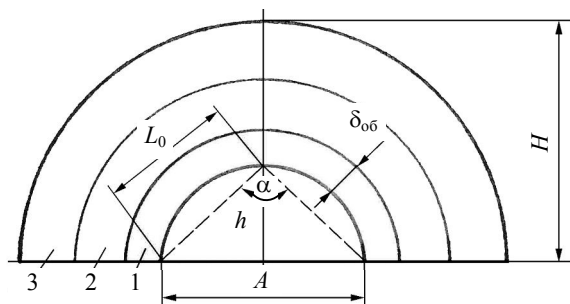


Рис. 5. Функциональная схема технологического кумулятивного децентрализованного заряда  
1 – облицовка заряда; 2 – активная часть заряда;  
3 – пассивная часть заряда

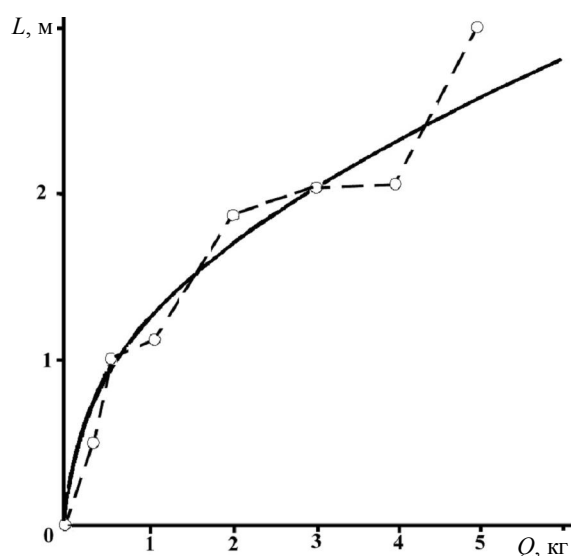


Рис. 6. Эмпирическая зависимость, характеризующая взаимосвязь глубины разрушения горной породы с массой кумулятивного заряда из литого тротила

Физико-механические свойства материала облицовки идентичны свойствам разрушаемого массива. Пользуясь результатами экспериментальных и теоретических исследований авторов работы [6], можно в первом приближении определить и параметры активной и пассивной (инициируемой) частей заряда.

Предельное значение высоты кумулятивного заряда ( $H$ ) рекомендуется принимать равным сумме ширины основания ( $A$ ) и глубины ( $h$ ) сферической кумулятивной выемки [6]:

$$H = A + h = A \left( 1 + \frac{1}{2 \operatorname{tg} 0,5\alpha} \right).$$

Тогда в рассматриваемом плоском сечении объем инициируемого заряда

$$\dot{O}_{ia} = \frac{\pi}{8} (H^2 - h^2).$$

При формировании децентрализованного заряда общее количество ( $N$ ) и диаметр ( $d$ ) заряжаемых скважин в каждом конкретном случае определится из соотношения

$\dot{O}_{ia} = \sum_{i=1}^N T_i$ , где  $T$  – площадь поперечного сечения одной скважины. Отсюда имеем

$$N = \frac{4\dot{O}_{ia}}{\pi d^2} = \frac{H^2 - h^2}{d^2}.$$

Значение диаметра единичной скважины выбирается через диаметр эквивалентного заряда ( $D$ ) по известному соотношению [9]  $d = D / \sqrt{N}$ .

Толщина слоя породы, пробиваемая кумулятивным децентрализованным зарядом ( $L_n$ ), по сравнению с зарядом обычной конструкции, возрастает на величину, кратную степени асимметрии распределения энергии в разрушаемом массиве. Рассматривая проведенную выше формулу для определения  $L_n$  [8], можно видеть, что при использовании газопородного потока вместо металлической струи отношение  $\delta_2 / \delta_1 = 1$ . Тогда факторами, определяющими объем разрушения становится поверхность кумулятивной выемки, т.е. диаметр ее основания ( $A$ ) и длина образующей ( $L_0$ ), а также соотношение плотностей потока и преграды. При этом экспериментально определяемый коэффициент  $\psi$  становится функционально зависимым от угла раствора кумулятивной выемки. Промышленные испытания накладных кумулятивных зарядов, а также результаты их внедрения на горных предприятиях, приведенные в работе [6], дают возможность оценить разрушающую способность кумулятивных децентрализованных зарядов большего масштаба. Обработка результатов натурных наблюдений позволила получить эмпирическую взаимосвязь толщины разрушаемого негабарита с массой кумулятивного заряда из литого тротила (рис. 6).

Экстраполируя это выражение в область реальных деконцентрированных зарядов, применяемых в геотехнологии, и введя коэффициенты, учитывающие особенности строения технологических зарядов, можно получить, что в породах с коэффициентом прочности  $f = 10 \div 12$  и  $f = 12 \div 15$  значение  $L_{\pi}$  может составить соответственно 25 и 20 м.

Приближенная оценка размеров зоны разрушения горной породы кумулятивным зарядом, расположенным в специальной горной выработке, дана в работе В.А.Горбунова [3] на основе гипотезы о сопоставимости механизмов удара газопородного сгустка и метеоритного удара. Не повторяя рассуждений автора, отметим следующие принципиально важные положения, вытекающие из этих исследований:

- в сгустке газа, производящем направленное разрушение горной породы, сосредоточено не менее 70 % полной энергии кумулятивного заряда;

- при ударе кумулятивной струи с различной энергией отношение радиусов воронок выброса ( $R_i$ ;  $R_j$ ) пропорционально отношению энергий ( $E_i$ ;  $E_j$ ) в степени 0,38 [4];

- радиус воронки выброса при ударе примерно в 3-5 раз меньше радиуса зоны разрушения породы под воронкой [7];

- при удельной концентрации энергии кумулятивного заряда, равной  $3 \cdot 10^9$  Дж/м, расчетный радиус воронки выброса (для пород с  $f = 8 \div 12$ ) составляет 6 м, а возможное значение преодолеваемой линии наименьшего сопротивления 20-30 м [3].

Из всего сказанного следует, что наиболее простая конструкция кумулятивного деконцентрированного заряда представляет собой несколько концентрических рядов заряженных и одновременно взрывааемых скважин диаметром  $d$ , огибающих группу незаряженных скважин того же диаметра (рис.7).

Количество заряженных скважин

$$N = D^2 / d^2,$$

где  $D$  – диаметр эквивалентного заряда [9].

Расстояние между скважинами в ряду ( $a$ ) и между рядами ( $b$ ) определяется по условиям отбойки сближенными зарядами [9],

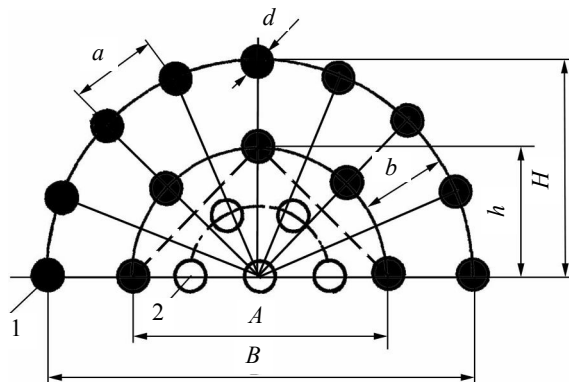


Рис. 7. Схема формирования кумулятивного деконцентрированного заряда из скважин одинакового диаметра

1 – заряжаемые скважины; 2 – незаряжаемые скважины

принимается  $a = b = (3 \div 4)d$ . Тогда число заряженных скважин в ряду

$$N_i = \frac{\pi[B - 2a(i-1)]}{a} = \frac{\pi B}{a} - 2(i-1),$$

где  $i$  – порядковый номер концентрического ряда скважин;  $B$  – ширина кумулятивного деконцентрированного заряда.

Число рядов  $m$  может быть найдено из уравнения

$$N = \sum_{i=1}^{i=m} \left[ \frac{\pi B}{a} - 2(i-1) \right].$$

Формирование кумулятивной выемки производится за счет бурения незаряжаемых скважин (рис.7). Общий объем этой выемки определяется из условия компенсации коэффициента разрыхления горных пород при их дроблении. Тогда количество незаряжаемых скважин ( $N_1$ ), необходимых для формирования кумулятивной полости, определится из уравнения

$$(1 - k_p) \left[ \frac{\pi B^2}{8} - \frac{\pi d^2}{4} N - \frac{\pi d^2}{4} N_1 \right] = \frac{\pi d^2}{4} N_1.$$

Подставив все численные значения и произведя преобразования, получим

$$N_1 = 0,12 \frac{B^2}{d^2} - 0,23 N.$$

Использование имплозионного механизма кумуляции энергии взрыва имеет потенциальную технологическую перспективу только при использовании крупных монозарядов. Возникающие при этом варианты достаточно подробно рассмотрены в работе [3]. Однако предложенные технические пути реализации этой интересной концепции нельзя назвать оптимальными. Для проходки горизонтальных выработок рекомендуемого по условиям взрыва сечения сегодня нет эффективных технологий и оборудования. Кроме того, даже если такие выработки будут как-то пройдены, формирование в них зарядов предлагаемой конструкции будет почти неразрешимой технологической проблемой в рамках действующих правил технической эксплуатации и правил техники безопасности для подземных предприятий. Преодолеть эти трудности за счет применения деконцентрированных зарядов не представляется возможным из-за крайне низких значений расстояния передачи детонации в горных породах.

Таким образом, выполненные теоретические исследования показывают, что использование эффекта кумуляции при отбойке руд и пород крупномасштабными деконцентрированными зарядами открывает совершенно новые пути для возможного повышения эффективности буровзрывного комплекса в рамках традиционных геотехнологий. Среди них достаточно просто просматриваются:

- отбойка на открытых горных работах без перебура;
- формирование дополнительных плоскостей обнажения в процессе отбойки больших блоков на карьерах;
- взрывная подготовка отрезных щелей при отработке крупных камер;

– снижение законтурного действия взрыва при слоевой выемке рудных тел малой и средней мощности.

Вместе с тем появляется возможность создать принципиально новые геотехнологии, в которых необходимое по условиям дробления распределение энергии в отбиваемом массиве осуществляется не за счет создания в нем зарядных камер, заполненных ВВ, под воздействием управляемой асимметрии потоков энергии от зарядов, расположенных вне разрушаемого объема.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Баум Ф.А. Физика взрыва / Ф.А.Баум, К.П.Станюкович, Б.И.Шехтер. М.: Физматгиз, 1959. 290 с.
2. Галченко Ю.П. Отбойка сближенными зарядами – новые идеи и перспективы / Ю.П.Галченко, В.М.Закалинский // Горный вестник. 1996. № 4. С.22-27.
3. Горбунов В.А. Методы математической физики в задачах горного производства. М.: Изд-во МГУ, 2002. 406 с.
4. Динес Дж.К. Влияние масштаба на прочность защитных материалов // Механика образования воронок при ударе и взрыве. М.: Мир, 1977. Вып.12. С.80-85.
5. Лаврентьев М.А. Кумулятивный заряд и принцип его работы // Успехи математических наук. 1957. Т.12. Вып.4. С.12-16.
6. Медведев И.Ф. Ликвидация завесаний и вторичное дробление руды / И.Ф.Медведев, А.В.Абрамов, А.П.Нефедов. М.: Недра, 1975. 197 с.
7. Механизмы и модели кратерообразования в природных средах / Д.Керрен, Д.Шоки, Л.Симен, М.Остин // Удар, взрыв и разрушение. М.: Мир, 1981. Вып.26. С.81-130.
8. Слезкин Н.А. Об ударе плоской газовой струи в безграничную стенку // Прикладная математика и механика. 1952. Т.16. Вып.2. С.22-26.
9. Совершенствование скважинной отбойки / А.В.Будько, В.М.Закалинский, С.К.Рубцов, А.А.Блинов. М.: Недра, 1981. 199 с.
10. Трубецкой К.Н. О новом направлении в развитии буровзрывного комплекса на открытых горных работах / К.Н.Трубецкой, Ю.П.Галченко, В.М.Закалинский // Перспективы освоения недр – комплексное решение актуальных проблем: Научные чтения им. акад. Н.В.Мельникова. / Под ред. акад. К.Н.Трубецкого. М., 2002. С.84-91.