



МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОЗДАНИЯ ВЫСОКОГО ВНУТРЕННЕГО ДАВЛЕНИЯ В ШПУРАХ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ НЕВЗРЫВЧАТОЙ РАЗРУШАЮЩЕЙ СМЕСИ

Заиров Шерзод Шарипович, профессор кафедры «Горное дело» Навоийского государственного горного института, доктор технических наук, профессор. 210100, Республика Узбекистан, г. Навои, ул. Южная, 27а. **Равшанова Мухаббат Хусниддиновна**, старший преподаватель кафедры «Горное дело» Навоийского государственного горного института. 210100, Республика Узбекистан, г. Навои, ул. Южная, 27а. **Худайбердиев Ойбек Жумаевич**, старший преподаватель кафедры «Высшая математика и информационные технологии» Навоийского государственного горного института. 210100, Республика Узбекистан, г. Навои, ул. Южная, 27а.

Аннотация. В статье разработана математическая модель создания высокого внутреннего давления в шпурах при использовании невзрывчатой разрушающей смеси (НРС), позволяющая получить ровный отрыв горных пород в массиве. Рассмотрена задача получения сплошной прямой линии трещин при использовании НРС в горных породах. Обоснован и получен интервальный вариант математической модели и алгоритм решения этой задачи, а также доказана теорема и показана интервальная полоса с ограниченной шириной, где должны располагаться центры шпуров. Разработана формула определения эффективного расстояния между контурными шпурами при использовании НРС, позволяющая обеспечить ровный отрыв массива горных пород.

Ключевые слова: Без взрывное разрушение горных пород, невзрывчатая разрушающая смесь, шпур, математическое моделирование, высокое внутреннее давление, новый состав НРС, лабораторные исследования, компоненты из местного сырья, способ отделения монолитов от массива.

Аннотация. Мақолада портловчи бўлмаган майдаловчи аралашмаларни қўллашда шпур ичида юқори босимни ҳосил бўлишида математик моделлаштириш ишлаб чиқилган, бу тоғ жинслари массивида тўғри чизикли ёриқ ҳосил бўлиши имконини беради. Портловчи бўлмаган майдаловчи аралашмаларни тоғ жинсларида қўллашда ёриқларни тўғри чизик бўйлаб узлуксиз ҳосил бўлиши вазифалари кўриб чиқилган. Ушбу масалани ечиш алгоритми ва математик моделининг интервалли варианты ҳисоблаб чиқилган ва асосланган, шунингдек теорема исботланган ва шпурларнинг марказида жойлашиши лозим бўлган чекланган кенглиги бўлган интервалли чизик кўрсатилган. Портловчи бўлмаган майдаловчи аралашмаларни қўллашда контурли шпурлар орасидаги самарали масофани аниқлаш формуласи ишлаб чиқилди, бу тоғ жинслари массивида узлуксиз тўғри чизикли ёриқ ҳосил бўлишини таъминлаш имконини беради.

Калит сўзлар: Тоғ жинсларини портлатишсиз майдалаш, портловчи бўлмаган майдаловчи аралашма, шпур, математик моделлаштириш, шпур ичидаги юқори босим, портловчи бўлмаган майдаловчи аралашмани янги таркиби, лаборатория тадқиқоти, маҳаллий хом ашёлардан ташкил топган компонентлар, массивдан монолитларни ажратиб олиш усули.

Annotation. The article develops a mathematical model for creating high internal pressure in boreholes using a non-

explosive destructive mixture (NDM), which allows to obtain a smooth separation of rocks in the massif. The problem of obtaining a continuous straight line of cracks when using NDM in rocks is considered. An interval version of the mathematical model and an algorithm for solving this problem are proved and obtained, as well as a theorem is proved and an interval band with a limited width is shown, where the centers of the holes should be located. A formula has been developed for determining the effective distance between contour holes when using NDM, which makes it possible to ensure a smooth separation of the rock mass.

Keywords: Non-explosive destruction of rocks, non-explosive destructive mixture, borehole, borehole, mathematical modeling, high internal pressure, new composition of NDM, laboratory research, components from local raw materials, method of separating monoliths from the massif.

В настоящее время известно множество способов невзрывного разрушения горных пород, в частности, механические методы (клиновой, гидроклиновой, алмазно-канатное пиление, камнерезные буровые установки и комбайны), методы, основанные на энергии жидкости (гидродинамический, физико-химический импульсный разрыв, гидроудар, гидрорезание, флюидоразрыв), тепловые (терморезка), электрические и электромагнитные (взрывание электрических проводников, электрической пробой, тепловой пробой, токами высокой частоты, плавлением, лазерным излучением, электромагнитным излучением), комбинированные методы и др. Большинство этих методов находятся на стадии научно-исследовательских и проектных разработок. Их промышленное использование сдерживается отсутствием оборудования, малой надежностью, высокой энергоемкостью, опасным воздействием на человека, высокой стоимостью. Все эти недостатки вынуждают искать пути создания дешевых и перспективных способов разрушения прочных горных пород.

Одним из возможных направлений решения этой проблемы является применение статических методов разрушения горных пород путем использования невзрывчатых разрушающих составов (НРС).



На сегодняшний день в мире разработано более 100 различных композиций НРС [1-6]. Основными их недостатками являются длительное время разрушения (8-24 ч) и ограниченный температурный режим работы. При отрицательных температурах эффективность разрушения резко снижается за счет замедления скорости гидратации, а при высоких положительных температурах наблюдается непроизвольное выбрасывание смеси НРС из шпуров и скважин, вызванное резким повышением скорости гидратации. Причиной выбрасывания смеси НРС из шпуров является рост внутришпурового парагазового давления, резко повышающегося при переходе химически несвязанной воды в пар при превышении температуры НРС в процессе гидратации.

В Навоийском государственном горном институте ведется научно-исследовательская работа, направленная на создание новых видов НРС с использованием компонентов из местного сырья. Основной задачей исследований является сокращение времени разрушения и одновременно исключение явления самопроизвольного выброса НРС из шпура.

Для решения этой задачи проведены комплексные исследования кинетики саморасширения НРС и проведено математическое моделирование создания высокого внутреннего давления в шпурах при использовании НРС.

Проведем моделирование создания высокого внутреннего давления в шпурах при использовании НРС. Согласно моделированию требуется решить следующую задачу: при каком расположении шпуров получающиеся трещины после использования НРС образуют сплошную линию? Более развернуто эту задачу можно изложить следующим образом.

В горной породе требуется расколоть некоторую часть этой породы. С этой целью по проекту нужно пробурить несколько шпуров. После чего в этих шпурах заливаются НРС, которая, входя в реакцию, расширяется и вследствие этого вокруг шпуров начинают образовываться трещины. Причем эти трещины могут появляться в любых направлениях. Целью поставленной задачи является то, как получить трещины, которые, соединяясь с соседними трещинами, образовавшихся из других шпуров, образовывали бы сплошную линию.

Создадим математическую модель данной задачи: при каких условиях точки $M_1(x_1; y_1), M_2(x_2; y_2), \dots, M_n(x_n; y_n)$ лежат на одной прямой? Решением этой задачи является следующая теорема.

Теорема. Если выполнено следующее условие: расстояния между точками осей координат x_1, x_2, \dots, x_n и y_1, y_2, \dots, y_n должны быть равными, т.е.

$$x_2 - x_1 = x_3 - x_2 = \dots = x_n - x_{n-1} = a, \quad y_2 - y_1 = y_3 - y_2 = \dots = y_n - y_{n-1} = b,$$

то точки $M_1(x_1; y_1), M_2(x_2; y_2), \dots, M_n(x_n; y_n)$ лежат на одной прямой, заданной уравнением

$$y - y_1 = \frac{b}{a}(x - x_1). \quad (1)$$

Доказательство. Для доказательства этой теоремы используем известное из курса

аналитической геометрии, уравнение прямой, проходящей через данные две точки

$$\frac{x - x_1}{x_2 - x_1} = \frac{y - y_1}{y_2 - y_1}.$$

Так, как все точки должны лежать на одной прямой, то они должны удовлетворять этому уравнению, т.е.

$$\frac{x - x_1}{x_2 - x_1} = \frac{y - y_1}{y_2 - y_1}, \quad \frac{x - x_1}{x_3 - x_1} = \frac{y - y_1}{y_3 - y_1}, \quad \dots, \quad \frac{x - x_1}{x_n - x_1} = \frac{y - y_1}{y_n - y_1}.$$

Сложив обе части этих равенств, получим

$$\frac{x - x_1}{x_2 - x_1} + \frac{x - x_1}{x_3 - x_1} + \dots + \frac{x - x_1}{x_n - x_1} = \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} + \frac{y - y_1}{y_3 - y_1} + \dots + \frac{y - y_1}{y_n - y_1}.$$

Учитывая то, что $x_2 - x_1 = a, x_3 - x_1 = 2a, \dots, x_n - x_1 = (n - 1)a$, а также $y_2 - y_1 = b, y_3 - y_1 = 2b, \dots, y_n - y_1 = (n - 1)b$ подставляя в знаменатель обеих частей последнего равенства, получим

$$\frac{x - x_1}{a} + \frac{x - x_1}{2a} + \dots + \frac{x - x_1}{(n-1)a} = \frac{y - y_1}{b} + \frac{y - y_1}{2b} + \dots + \frac{y - y_1}{(n-1)b}.$$

Выносим общий множитель из обеих частей этого равенства, тогда имеем

$$\frac{x - x_1}{a} \left(1 + \frac{1}{2} + \dots + \frac{1}{n-1} \right) = \frac{y - y_1}{b} \left(1 + \frac{1}{2} + \dots + \frac{1}{n-1} \right).$$

Сокращая в обеих частях равенства выражения, стоящие в скобках, и произведя несложное преобразование, получим:

$$y - y_1 = \frac{b}{a}(x - x_1)$$

или

$$y - y_1 = \frac{y_k - y_{k-1}}{x_k - x_{k-1}}(x - x_1). \quad (2)$$

требуемое уравнение. **Теорема доказана.**

Если обозначить через k угловой коэффициент, т.е. $k = tg\varphi = \frac{b}{a}$, то получим, известное из курса аналитической геометрии уравнение прямой, проходящей через данную точку, в данном направлении

$$y - y_1 = k(x - x_1). \quad (3)$$

Следствие.

а) Если все точки ординат равны одному и тому же числу, т.е.

$$y_1 = y_2 = y_3 = \dots = y_n = c,$$

то последнее уравнение получит вид

$$y = c.$$

В этом случае прямая будет параллельна оси Ox .

б) Если все точки абсциссы равны одному и тому же числу, т.е.

$$x_1 = x_2 = x_3 = \dots = x_n = c,$$

то последнее уравнение получит вид

$$x = c.$$

В этом случае прямая будет параллельна оси Oy .

Для проверки достоверности полученного результата, рассмотрим примеры.

Пример 1. Для простоты рассмотрим три точки.

Пусть точки $M_1(x_1; y_1), M_2(x_2; y_2), M_3(x_3; y_3)$ удовлетворяют условиям теоремы, т.е. $M_1(1; 3), M_2(3; 6), M_3(5; 9)$.



Разность между точек абсциссы $x_2-x_1=x_3-x_2=1-3=5-3=2$, разность между точками ординаты $y_2-y_1=y_3-y_2=6-3=9-6=3$.

Тогда, подставляя их в уравнение (2), получим:

$$9 - 3 = \frac{3}{2}(5 - 1), 6 = 3 \cdot 2, 6 = 6.$$

Получили тождество, значит полученное уравнение верное.

Пример 2. В этом случае также рассмотрим три точки.

Пусть точки $M_1(x_1; y_1)$, $M_2(x_2; y_2)$, $M_3(x_3; y_3)$ не удовлетворяют условиям теоремы, т.е. $M_1(1; 3)$, $M_2(3; 4)$, $M_3(5; 10)$.

Разность между точками абсциссы $x_2-x_1=x_3-x_2=1-3=5-3=2$, разность между точками ординаты $y_2-y_1=4-3=1$, $y_3-y_2=10-4=6$, т.е. они не равны. Тогда

$$10-3=\frac{1}{2}(5-1).$$

Отсюда получим $7 \neq 2$, в силу неравенства разностей точек ординаты, эти три точки не лежат на одной прямой, что подтверждает результат теоремы.

При использовании НРС для получения сплошной прямой линии трещин в разрушаемых горных породах очень важно определить расположение шпуров. Их расположение и получение трещин по прямой зависит от структуры, прочности и степени растяжимости разрабатываемых горных пород. После применения НРС в горных породах появляются трещины. Эти трещины образуются в результате химико-физических реакций применяемого состава НРС. Трещины могут образовываться в произвольном месте шпура и развиваться в любом направлении. В результате полученный материал может быть непригодным или некоторую её часть приходится браковать. По этой причине специалисты в этом направлении ведут исследования. Проще говоря, образование этих трещин зависит от множества факторов, например, состава применяемой смеси, типа горной породы, диаметра и глубины шпуров, расстояния между шпурами, прочности, дробимости породы и т.п. В этом случае решение задачи о получении сплошной линии в результате появляющихся трещин при использовании НРС становится задачей трудно решаемой.

Если использовать те или иные методы, то можно дать направление этим трещинам, чтобы в конечном результате получить соединенные трещины, которые в итоге образуют сплошную линию трещин между шпурами. В процессе решения этой задачи математически моделируется и доказывается теорема, где утверждается, что центры шпуров располагаются по прямой, если координаты этих центров удовлетворяют некоторому условию.

Теорема. Если выполнено следующее условие: расстояние между точками осей координат x_1, x_2, \dots, x_n и y_1, y_2, \dots, y_n должны быть равными, т.е.

$$x_2-x_1=x_3-x_2=\dots=x_n-x_{n-1}=a,$$

$$y_2-y_1=y_3-y_2=\dots=y_n-y_{n-1}=b,$$

то точки $M_1(x_1; y_1)$, $M_2(x_2; y_2)$, ..., $M_n(x_n; y_n)$, являющимися центрами шпуров, лежат на одной прямой, заданной уравнением

$$y - y_1 = \frac{b}{a}(x - x_1).$$

Результат этой теоремы подтверждается примерами, а также проведенными экспериментальными данными. Эта теорема является вещественным вариантом решения этой задачи.

Ниже будет приведена математическая модель в интервальном варианте, где решается задача о взаиморасположении шпуров по проектной разработке для откалывания части горной породы от основной массы, не причиняя при этом ущерб непроектной, т.е. не разрабатываемой части породы. Решение этой задачи в интервальном варианте, а точнее методами интервального анализа [7], мотивируется тем, что диаметр, глубина шпура, а также расстояние между ними могут варьировать в пределах некоторого интервала, в зависимости от многих параметров разрабатываемых горных пород. Например, согласно [8], диаметр скважины $d \in [60; 100]$ мм, глубина $h \in [6d; 10d]$, расстояние между скважинами $l = 1000 \frac{df}{\sigma}$ мм и т.д., здесь f – коэффициент разжимаемости породы, σ – коэффициент прочности горных пород. По этой причине, естественно, эти параметры нужно рассмотреть в некотором интервале. Рассмотрение математической модели в интервальном варианте, гарантируют двустороннюю оценку этих параметров по нижней и верхней границе получаемых интервалов.

Рассмотрим следующую задачу: при каком расположении шпуров можно получить сплошную трещину, образованную между ними? Для этого поступим следующим образом.

Учитывая приведенную мотивацию интервального варианта, диаметр шпура d и координаты центра шпуров $M_i(x_i; y_i)$ берём как интервальную величину, т.е.

$$d = [d, \bar{d}], x_i = [x_i, \bar{x}_i] \text{ и } y_i = [y_i, \bar{y}_i],$$

здесь x_i – называется нижней границей и \bar{x}_i – верхней границей интервала x_i , соответственно, которые являются вещественными числами.

Далее интервалы, согласно общепринятым правилам, обозначаются жирным шрифтом, а вещественные числа обычным шрифтом. В дальнейшем все арифметические действия над интервальными величинами будем проводить, согласно [9], в полной интервальной арифметике Каухера, которую принято обозначать KR . Интервальное пространство и классическую интервальную арифметику в этом пространстве обозначим через IR .

Пусть, $* \in \{+, -, \cdot, / \}$, тогда $* \in KR$ означает, что операции сложение, вычитание, умножение и деление выполняются в полной интервальной арифметике KR .

Теперь приступим к решению поставленной задачи.



Т.к. рассматриваемые интервалы расположены в положительной части абсцисс и ординат, то эти интервалы являются положительными и не ноль содержащими интервалами. Пересечение интервалов x_i и y_i в R^2 образуют прямоугольники, содержащие точку $M_i(x_i; y_i)$, стороны которых равны $\bar{x}_i - x_i$, $\bar{y}_i - y_i$, соответственно.

Приведем некоторые характеристики интервальных величин согласно [7], которые будем использовать в дальнейших рассуждениях.

Серединой интервала $a = [a, \bar{a}]$ называется величина $mid(a) = \frac{1}{2}(a + \bar{a})$, шириной этого интервала называется величина $wid(a) = \bar{a} - a$.

В вещественном варианте рассматриваемой задачи координаты точки должны были удовлетворять условию:

$$\begin{aligned} \text{абсциссы точки } x_2 - x_1 = x_3 - x_2 = \dots = x_n - x_{n-1} = a, \quad (*) \\ \text{ординаты точки } y_2 - y_1 = y_3 - y_2 = \dots = y_n - y_{n-1} = b. \quad (**) \end{aligned}$$

Отметим что $x_i \in x_i$ и $y_i \in y_i$ для всех $i=1, 2, \dots, n$.

Теперь, используя введенные обозначения, равенства (*) и (**) перепишем в следующем виде

$$mid(x_2) - mid(x_1) = mid(x_3) - mid(x_2) = \dots = mid(x_n) - mid(x_{n-1}) = a, \quad (4)$$

$$mid(y_2) - mid(y_1) = mid(y_3) - mid(y_2) = \dots = mid(y_n) - mid(y_{n-1}) = b, \quad (5)$$

где a и b – постоянные числа.

Далее, как в вещественном случае, потребуем расположение середины интервалов M_i на одной прямой, т.к. середина этих интервалов, по определению, есть вещественные числа. Тогда эти точки лежат на одной прямой и удовлетворяют уравнению прямой

$$\frac{x - x_1}{x_2 - x_1} = \frac{y - y_1}{y_2 - y_1}$$

Подставляя в это уравнение вместо x и y соответствующие им интервальные величины, получим

$$\frac{x - mid(x_1)}{mid(x_2) - mid(x_1)} = \frac{y - mid(y_1)}{mid(y_2) - mid(y_1)}, \quad \frac{x - mid(x_1)}{y - mid(y_1)} = \frac{mid(x_2) - mid(x_1)}{mid(y_2) - mid(y_1)}, \dots, \frac{x - mid(x_1)}{mid(y_n) - mid(y_1)} = \frac{mid(x_n) - mid(x_1)}{mid(y_n) - mid(y_1)}. \quad (6)$$

По членное сложение левых и правых частей равенства (6) соответственно, дает

$$\frac{x - mid(x_1)}{mid(x_2) - mid(x_1)} + \frac{x - mid(x_1)}{mid(x_3) - mid(x_2)} + \dots + \frac{x - mid(x_1)}{mid(x_n) - mid(x_{n-1})} = \frac{y - mid(y_1)}{mid(y_2) - mid(y_1)} + \frac{y - mid(y_1)}{mid(y_3) - mid(y_2)} + \dots + \frac{y - mid(y_1)}{mid(y_n) - mid(y_{n-1})}. \quad (7)$$

В силу равенств (4) и (5), можем написать

$$\begin{aligned} mid(x_2) - mid(x_1) = a, \quad mid(x_3) - mid(x_2) = a, \dots, \quad mid(x_n) - mid(x_{n-1}) = a \\ = (n - 1)a \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} mid(y_2) - mid(y_1) = b, \quad mid(y_3) - mid(y_2) = b, \dots, \quad mid(y_n) - mid(y_{n-1}) = b \\ = (n - 1)b \end{aligned}$$

Далее, используя свойства интервальных операций [9], знаменатели дробей в равенстве (7) заменим на соответствующие числа. Это возможно, т.к. в знаменателях стоят числа. Тогда имеем

$$\frac{x - mid(x_1)}{a} + \frac{x - mid(x_1)}{2a} + \dots + \frac{x - mid(x_1)}{(n-1)a} = \frac{y - mid(y_1)}{b} + \frac{y - mid(y_1)}{2b} + \dots + \frac{y - mid(y_1)}{(n-1)b} \quad (8)$$

В равенстве (8), внося за скобку общие множители, получим

$$\frac{x - mid(x_1)}{a} \left(1 + \frac{1}{2} + \dots + \frac{1}{(n-1)}\right) = \frac{y - mid(y_1)}{b} \left(1 + \frac{1}{2} + \dots + \frac{1}{(n-1)}\right).$$

Сокращая в обеих частях последнего равенства выражения, стоящие в скобках, имеем

$$\frac{x - mid(x_1)}{a} = \frac{y - mid(y_1)}{b} \quad (9)$$

Проведя несложные преобразования, последнее равенство перепишем в следующем виде

$$y - mid(y_1) = \frac{b}{a}(x - mid(x_1)). \quad (10)$$

Уравнение (2.10) определяет ширину полосы на плоскости, расположенной в первой четверти плоскости Оху.

Это означает, что центры шпуров расположены внутри этой полосы, причем расстояние между центрами шпуров постоянные, т.е. равные, это вытекает из условий (4) и (5). Координаты центров шпуров находятся в точках

$$M_i(mid(x_i); mid(y_i)).$$

Направление полосы определяет величина $\frac{b}{a}$. Расстояние между центрами шпуров определим равенствами

$$M_{i+1}(mid(x_{i+1}); mid(y_{i+1})) - M_i(mid(x_i); mid(y_i)) = l, \text{ где } i = 1, 2, \dots, n - 1. \quad (11)$$

Теперь определим ширину полученной полосы, задающей уравнением (10).

Это равносильно определению ширины интервалов

$$x - mid(x_1) \text{ и } y - mid(y_1).$$

Определим ширину интервала

$$x - mid(x_1).$$

По определению и свойство ширины интервала $wid(x - mid(x_1)) = wid(x) + wid(mid(x_1)) = wid(x) +$

$$mid(x_1) = \bar{x} - \underline{x} + \frac{1}{2}(\bar{x}_1 + \underline{x}_1) = \left(\bar{x} + \frac{1}{2}\bar{x}_1\right) - \left(\underline{x} - \frac{1}{2}\underline{x}_1\right). \quad (12)$$

Точно также получим результат для интервала $y - mid(y_1)$:

$$wid(y - mid(y_1)) = (\bar{y} + \frac{1}{2}\bar{y}_1) - (\underline{y} - \frac{1}{2}\underline{y}_1). \quad (13)$$

Из равенства (12) и (13) видно, какая ширина полученной полосы, данной формулой (10).

Следствие. Т.к., нам требуется найти полосу с наименьшей шириной, то в равенстве (10) выражения $x - mid(x_1)$ и $y - mid(y_1)$, не нарушая общности, можно заменить на $wid(x)$ и $wid(y)$, что часто встречаются и удобно для применения в практических задачах. Тогда получим

$$wid(y) = \frac{b}{a} wid(x). \quad (14)$$

Если положить $wid(x) = \min x_i$ и $wid(y) = \min y_i$ для всех $i=1, 2, \dots, n$, то равенство (14) примет вид

$$\min y_i = \frac{b}{a} \min x_i. \quad (15)$$

Равенство (15) имеет практическую ценность, т.к. инженеры работают с вещественными числами, а не интервалами, причем этим равенством задается полоса наименьшей шириной. На рис.1 показано



определение ширины полосы и расположение центров шпуров для трех точек.

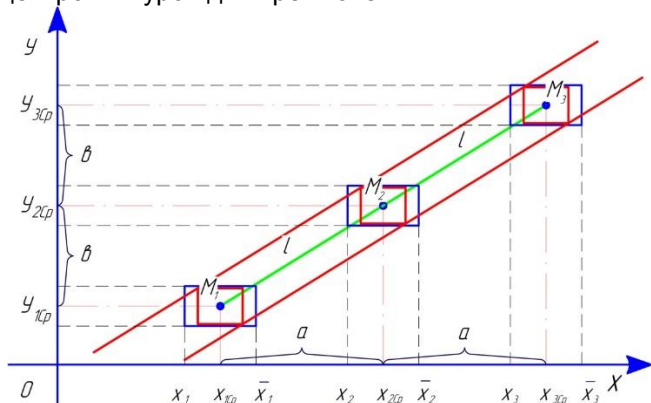


Рис. 1. Изображение полосы и расположение центров шпуров

Известно, что наименьшая площадь прямоугольника равна площади квадрата, полученной из этого прямоугольника с меньшей стороной.

Далее, обозначим через ρ ширину полосы и через c сторону квадрата, полученного из прямоугольника $x_i \cap y_i$. Сторона квадрата определяется следующим равенством

$$c = \begin{cases} \min x_i, & \text{если } \min x_i \leq \min y_i \\ \min y_i, & \text{если иначе. } i = 1, 2, \dots, n. \end{cases}$$

В этом случае ширина полосы ρ будет равна

$$\rho = \sqrt{2}c, \quad (16)$$

если полоса является наклонной и

$$\rho = c, \quad (17)$$

если полоса горизонтальная или вертикальная.

При этом шпур, как окружность, является вписанным в квадрат со стороной c , поэтому для диаметра шпура имеет место неравенство

$$d < \rho.$$

Таким образом, вывод уравнения (10) и как его следствие уравнение (14) и равенство (15), являются решением поставленной задачи. Равенствами (16) и (17) определяется ширина получаемой полосы. В результате получения этих уравнений была доказана следующая теорема.

Теорема. Если для интервалов $x_i, y_i \in IR, i=1, 2, \dots, n$, выполнены условия (4) и (5), то

1) координаты точек центра шпуров располагаются по полосе, определяемой равенством (10), причем наименьшая ширина этой полосы задается равенствами (16) или (17);

2) расстояние между шпурами определяются равенством (11).

Рассмотрим образование контурной щели как результат действия тангенциальных напряжений σ_θ в точке А, расположенной в плоскости щели на равном расстоянии от соседних шпуров (рис. 2) [10]. Существенную роль в механизме образования щели оказывают радиальные напряжения от соседних шпуров, геометрически складывающихся в плоскости, пересекающей контурную щель перпендикулярно к ней на расстоянии от соседних

зарядов. Эти напряжения также создают растягивающие усилия в плоскости щели и необходимо знать затраты энергии на раздвижение стенок щели после образования магистральной трещины.

Щель возникает в массиве под действием растягивающих напряжений σ_θ в точке А и симметричных, направленных в разные стороны растягивающих напряжений в точках С и С₁, формирующих в результате геометрического сложения радиальных напряжений сжатия σ_r в этих точках (рис.2).

Запишем условие образования контурной щели, как соотношение напряжений, вызывающих ее образование, и напряжений, препятствующих этому (рис. 3):

$$\sigma_R \geq \sigma_p + \sigma_h, \quad (18)$$

где σ_R – суммарное растягивающее напряжение в точке А, действующее перпендикулярно плоскости шпура, МПа;

σ_p – предел прочности породы при растяжении с учетом коэффициента структурного ослабления для данного массива, МПа;

σ_h – дополнительные напряжения, необходимые для перемещения стенок контурной щели на некоторую величину h_w , и ее раскрытия, МПа.

Приняв величину сжимающих напряжений, вызванных действием НРС у стенки контурного шпура, равной $P(t)$, можно записать величину радиальных сжимающих напряжений в точках С и С₁ как

$$\sigma_r = P(t) \cdot K_{c.3}, \text{ МПа,} \quad (19)$$

где $K_{c.3}$ – коэффициент, характеризующий степень затухания напряжений с увеличением расстояния от оси шпура.

В первом приближении можно предположить, что

$$K_{c.3} = \left(\frac{d_c}{R}\right)^{n_3}, \quad (20)$$

где d_c – диаметр шпура, м;
 R – расстояние от оси шпура до рассматриваемой точки в массиве, м;

n_3 – показатель степени затухания напряжений с удалением расчетной точки от оси шпура.

Тогда величина радиальных сжимающих напряжений в точках С и С₁ может быть установлена по формуле

$$\sigma_r = P(t) \left(\frac{d_c \cos \beta}{a_k}\right)^{1.5}, \text{ МПа,} \quad (21)$$

где a_k – расстояние между контурными шпурами, м;

β – острый угол между плоскостью контурных шпуров и направлением от ближайших шпуров до точек С и С₁, град.

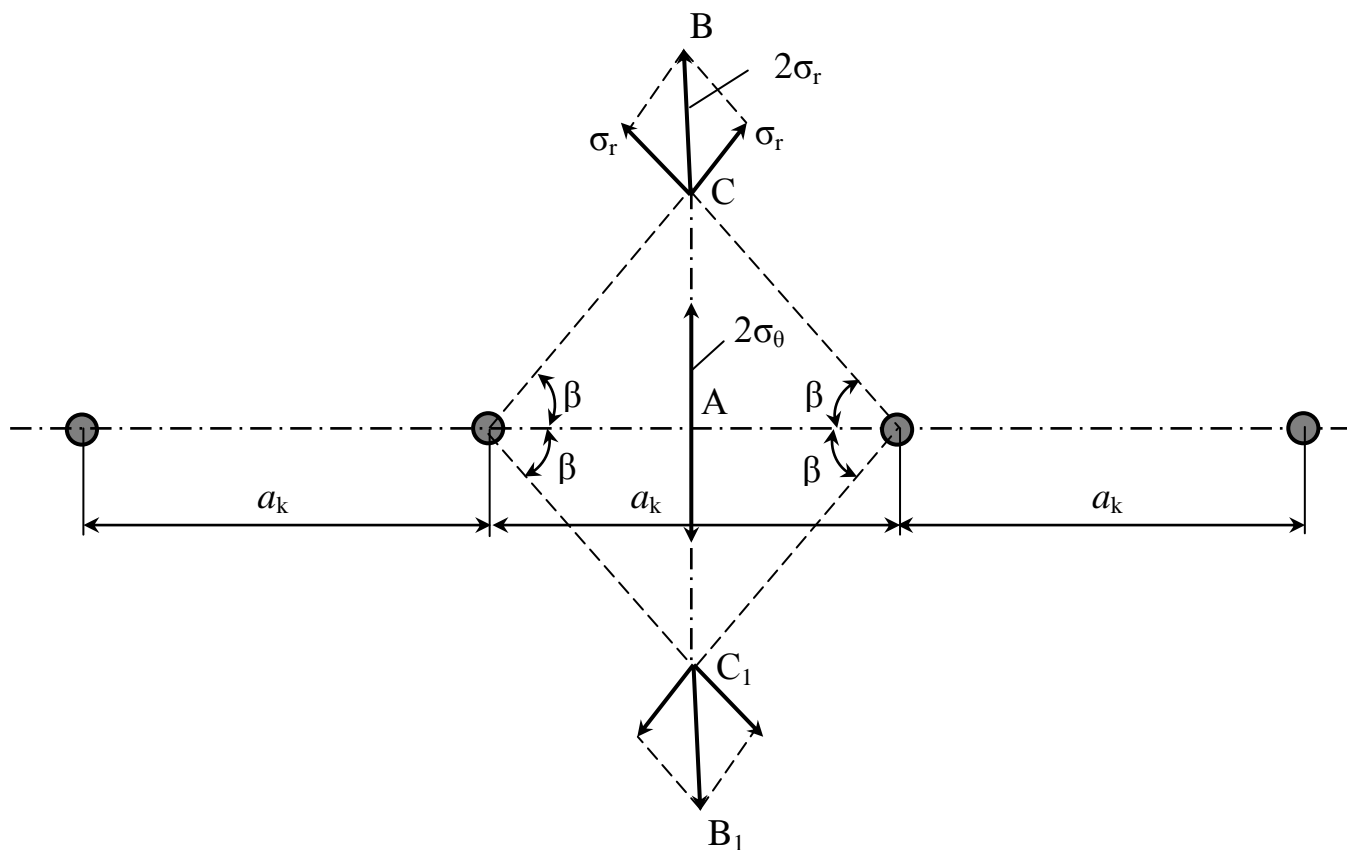


Рис. 2. Схема к расчету расстояния между шпурами с НРС

Анализ функции $\sigma_R = f(\beta)$ [10] показывает, что наибольшая величина $\sigma_R = f(\beta)$ соответствует при $\beta = 45^\circ$. При этом

$$\sigma_R = 2P(t) \left(\frac{d_c}{a_k} \right)^{1,5} \left(0,85 + \frac{\mu}{1-\mu} \right). \quad (24)$$

Произведя замену $\sigma_R = \sigma_p + \sigma_h$ и выполнив соответствующие преобразования, получим формулу определения эффективного расстояния между контурными шпурами с НРС:

$$a_k = d_c \left[\frac{2P(t)(0,85 + \frac{\mu}{1-\mu})}{\sigma_p + \sigma_h} \right]^{2/3}, \text{ м}. \quad (25)$$

Таким образом, разработана формула определения эффективного расстояния между контурными шпурами при использовании НРС, позволяющая обеспечить ровный отрыв массива горных пород.

Выводы

1. Разработана математическая модель создания высокого внутреннего давления в шпурах при использовании НРС, позволяющая получить ровный отрыв горных пород в массиве.

2. Рассмотрена задача получения сплошной прямой линии трещин при использовании НРС в горных породах. Обоснован и получен интервальный вариант математической модели и алгоритм решения этой задачи, а также доказана теорема и показана интервальная полоса с

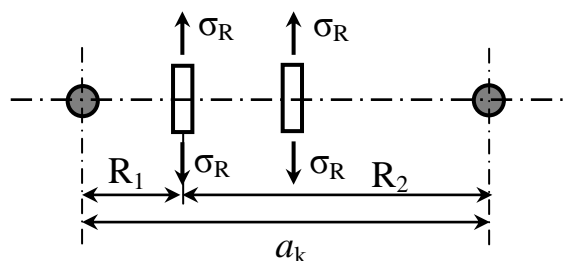


Рис. 3. Схема к определению места зарождения трещины растяжения

С учетом зависимости $\sigma_\theta = f(\sigma_r)$ можно определить вызываемые действием НРС тангенциальные напряжения σ_θ в точке А по выражению:

$$\sigma_\theta = P(t) \left(\frac{d_c}{a_k} \right)^{1,5} \frac{\mu}{1-\mu}, \text{ МПа}. \quad (22)$$

где μ – коэффициент Пуассона.

Тогда, согласно расчетной схеме на рис. 2.2 суммарные растягивающие напряжения в точке А составят:

$$\sigma_R = 2P(t) \left(\frac{d_c}{a_k} \right)^{1,5} \left(2\cos^{1,5}\beta \sin\beta + \frac{\mu}{1-\mu} \right), \text{ МПа}. \quad (23)$$

Положения точек С и С₁ определяются из условия достижения максимальной величины σ_R .



ограниченной шириной, где должны располагаться центры шпуров.

3. Разработана формула определения эффективного расстояния между контурными шпурами при использовании НРС, позволяющая обеспечить ровный отрыв массива горных пород.

Список литературы:

- [1]. А.с. 1251611 СССР, МПК E21 C37/00. Способ направленного формирования трещин в массиве твердой среды/ Е.М. Гарцуев, А.А. Хрипко, А.И. Штомпель; заявитель Стахановский филиал Коммунарского горно-металлургического института Минвуза УССР. заявл. 25.12.1984; опубл. 25.10.86.
- [2]. Средство невзрывчатое разрушающее(НРС-1). Технические условия ТУ21-53-22-87. – Изд. январь 1987. М.: МПСМ СССР, 1987. – 37 с.
- [3]. Пат. 2035421 Российская Федерация. МПК6С04В7/00, С04В38/02. Состав газовыделяющей сырьевой смеси, стержень и этой смеси и способ статического разрушения массивов или конструкций из хрупкого материала/ Ю.Л. Грамовский, Ю.А. Белов Ю.А., Ю.И. Седов; заявитель Научное проектно-строительное объединение "Монолит". – №5047245/33; заявл. 09.04.1992; опубл. 20.05.1995, Бюл. №7. – 8 с.
- [4]. Заявка 93058105 Российская Федерация. МПК6 E21C37/00, С04В7/34. Невзрывчатый

разрушающий материал быстрого воздействия/ Ю.Л. Грамовский, В.М. Захаров, Е.А. Кузнецов заявители Ю.Л. Грамовский, В.М. Захаров, Е.А. Кузнецов– №93058105/03; заявл. 30.12.1993; опубл. 20.10.1996.

[5]. Пат. 246982 ГДР, МКИ С04 В7/34. Способ разрушения хрупких материалов/ Н.О. Eckler, W. Bergholt, M. Peneyal, D. Korth; заявитель Banakademieder DDR. – №2854807; заявл. 27.12.85; опубл. 24.06.87.

[6]. Rios Varguer Joine Практическое применение расширяющихся цементов для дробления и выемки пород/ Joine Varguer Rios // Rocas y miner. – 1983. – 12 (№143). – Р. 20-21, 24-26.

[7]. 7.Кальмыков С.А., Шокин Ю.И., Юлдашев З.Х. Методы интервального анализа. – Новосибирск: Изд-во «Наука», 1986. – 222 с.

[8]. Сахно И.Г. Научные основы управления состоянием горных пород невзрывчатыми разрушающими смесями при подземной разработке месторождений // Дисс. ... докт. техн. наук. – Красноармейск, 2015. – 457 с.

[9]. Шарый С.П. Конечномерный интервальный анализ. – Новосибирск: Изд-во «XYZ», 2019. – 602 с.

[10]. Baklashov I.V., Goncharov S.A., Davidenko B.Yu., Morit R.E. The search for new ways to eclipse and strengthen the contour ledges of the Olenegorsk quarry // Scientific report of the Moscow State Institute of Physics GF-2-300. – Moscow, 1991. – 84 p.

[11].