

РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ВЗРЫВАНИИ ВЕРТИКАЛЬНОГО КОНЦЕНТРИРОВАННОГО ЗАРЯДА

Среди способов разрушения горных пород, используемых при разработке месторождений полезных ископаемых, наибольшее применение получил буровзрывной. Практическому и экспериментальному изучению процессов разрушения породного массива посвящено значительное количество работ, в которых проведена всесторонняя оценка рассматриваемой проблемы [1,4,6]. Вместе с тем практика постоянно выдвигает новые задачи, решение которых трудно осуществить на основе имеющихся знаний и представлений. Преодоление возникающих трудностей невозможно без проведения дополнительных научных исследований. Большое число вопросов, требующих решения, возникает на месторождениях Горной Шории и Хакасии при применении вертикальных концентрированных зарядов (ВКЗ) [2,3,5]. Они используются для разрушения технологических блоков горных пород, формируемых при отработке рудных тел системами этажного принудительного обрушения. Основной целью успешного применения ВКЗ является максимальное разрушение рудного массива в пределах вынимаемого блока.

Опыт применения ВКЗ в производственных условиях показал, что эффективность его использования зависит от геометрических размеров разрушаемого массива. Наиболее полно оценить влияние параметров блока на характер распределения полей напряжений в горном массиве можно с помощью математического моделирования. Рассмотрим результаты расчетов механического состояния твердого тела для условий, отвечающих воздействию концентрированного заряда.

При постановке задачи горный массив представлялся однородным упругим изотропным телом, зарядная полость – отверстием цилиндрической формы. Действие продуктов детонации заменялось статическим давлением, приложенным к ее границам. Правомерность такого приближения справедлива при рассмотрении квазистатического действия взрыва, когда время разрушения значительно превосходит время распространения волн напряжений.

Многочисленными исследованиями, посвященными установлению механизма действия взрывчатых веществ на взрываемую среду, показано, что энергия заряда преобразуется как в ударные волны, так и в высокое давление поршневого действия продуктов детонации. Каждый из этих факторов оказывает свое влияние на процесс разрушения горного массива. Вместе с тем при достаточно качественной забойке, которая препятствует истечению продуктов детонации из взрывной камеры, определять характер разрушения будет высокое давление на стенки скважины.

Высота ВКЗ во много раз превосходит радиус зарядной полости, а распределение давления на стенки скважины можно считать одинаковым во всех горизонтальных сечениях. Это дает возможность при постановке задачи расчета напряженного состояния массива принять условия плоской деформации и рассматривать двумерный случай.

На рис.1 изображена расчетная область задачи $ABCD$ – ее внешние границы. Поршневое действие продуктов детонации моделируется заданием на границе зарядной полости равномерного давления

$$\sigma_n = -p, \quad \tau_n = 0,$$

где σ_n , τ_n – нормальная и касательная компоненты напряжений.

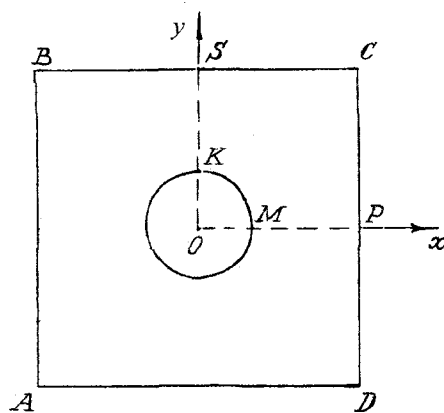


Рис.1. Расчетная область задачи

Поскольку давление не меняется вдоль контура зарядной полости, а расчетная область симметрична относительно осей x и y , достаточно рассмотреть лишь четверть этой области. Граничные условия задачи в этом случае будут выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned} V &= 0, & \tau_{xy} &= 0 & \text{на } MP; \\ U &= 0, & \tau_{xy} &= 0 & \text{на } KS; \\ \sigma_x &= 0, & \tau_{xy} &= 0 & \text{на } PC; \\ \sigma_y &= 0, & \tau_{xy} &= 0 & \text{на } SC. \end{aligned}$$

Здесь U, V – смещение точек расчетной области по осям x и y ; $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ – нормальные и касательная компоненты тензора напряжений.

Поставленная таким образом задача имеет единственное решение, так как область $KMPCS$ жестко закреплена относительно смещений и поворота вдоль осей x и y .

Расчеты были выполнены с помощью метода конечных элементов. Исследуемая область разбивалась на треугольные конечные элементы. Основными неизвестными задачи являлись перемещения узловых точек. Функция формы, определяющая перемещения любой точки внутри элемента, выбрана линейной. Для решения системы получаемых линейных уравнений использовался метод Гаусса. Напряженное состояние определялось после нахождения смещений

$$\{\sigma\} = [D][T]\{u\},$$

где $[D]$ – матрица упругости, $[T]$ – матрица, связывающая деформации в элементе с узловыми перемещениями; $\{\sigma\}, \{u\}$ – векторы напряжений и смещений конечного элемента. Величины напряжений вычислялись в узловых точках путем осреднения для элементов, примыкающих к данному узлу.

Расчет и анализ напряженного состояния массива горных пород состоял из двух этапов. На первом рассматривались поля напряжений, соответствующие различным геометрическим размерам разрушаемых блоков, на втором – определялись значения, оптимальные с точки зрения разрушения. Проанализируем каждый из рассмотренных этапов.

I. Для оценки влияния размеров разрушаемых блоков на характер распределения в них напряжений рассмотрены три варианта расчета со следующими геометрическими параметрами расчетной области: а) 20×20 м, б) 20×100 м, в) 100×100 м. Первый вариант моделирует условия взрыва в блоке с четырьмя свободными от напряжений внешними границами. Второй – отвечает случаю действия продуктов детонации на массив, имеющий две свободные внешние поверхности. Третий случай моделирует действие заряда в безграничной среде. Во всех расчетах механические характеристики массива горных пород имели следующие значения: модуль Юнга $E = 75000$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,25$. Данные параметры отвечают свойствам крепких горных пород. Действие продуктов детонации

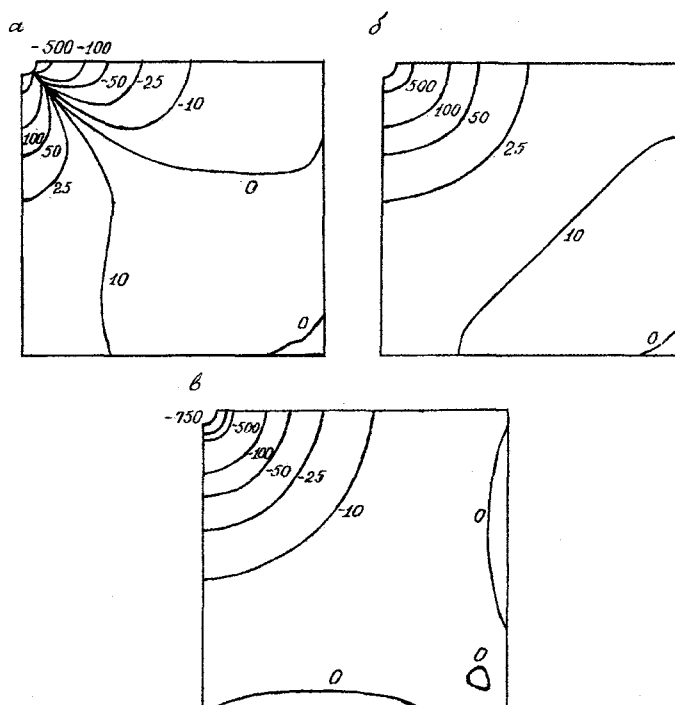


Рис.2. Характер распределения в упругой среде напряжений σ_x (а), главных напряжений σ_1 (б) и σ_2 (в) при размерах блока 20×20 м

в зарядной полости заменялось статическим давлением $P_0 = 1000$ МПа, ее радиус был принят равным 0,5 м. Сетка треугольных элементов построена таким образом, что уменьшение размеров элементов происходит при приближении к границе зарядной полости. Это необходимо для получения более точного решения, так как в этой области наблюдаются наибольшие изменения компонент тензора напряжений.

Первым был выполнен расчет варианта, в котором блок массива горных пород имел размеры 20×20 м, соответственно область расчета – 10×10 м. Представление о результатах моделирования дает рис.2. Наибольшие значения сжимающих и растягивающих напряжений σ_x достигаются на границе взрывной полости. Следует отметить, что изолинии с растягивающими значениями выходят на внешнюю границу расчетной области и их значения здесь превышают 25 МПа. Напряжение σ_y полностью повторяет распределение σ_x , если соответствующие изолинии отобразить симметрично диагонали области расчета (прямой $y = x$). Характер поведения напряжений σ_1 и σ_2 вблизи взрывной полости соответствует радиальной σ_r и окружной σ_ϕ компоненте тензора напряжений в цилиндрической системе координат для случая деформирования цилиндра под действием внутреннего давления. Напряжения $\sigma_1 = \sigma_\phi$ во всей области расчета являются растягивающими, $\sigma_2 = \sigma_r$ – сжимающими.

Удаление двух внешних границ массива на значительное расстояние от взрывной полости приводит к перераспределению полей напряжений в ее окрестности по сравнению с первым вариантом. Для компоненты σ_x наблюдается рост уровня напряжений в зоне сжатия и уменьшение в области растяжения. Наиболее четко о характере изменения растягивающих и сжимающих напряжений в области расчета можно судить по распределению σ_1 и σ_2 (рис.3). Удаление внешних границ на «бесконечность» приводит к падению интенсивности растягивающих напряжений в окрестности взрывной полости (рис.3, а). Несмотря на то, что весь массив подвержен действию растягивающих напряжений σ_1 , их

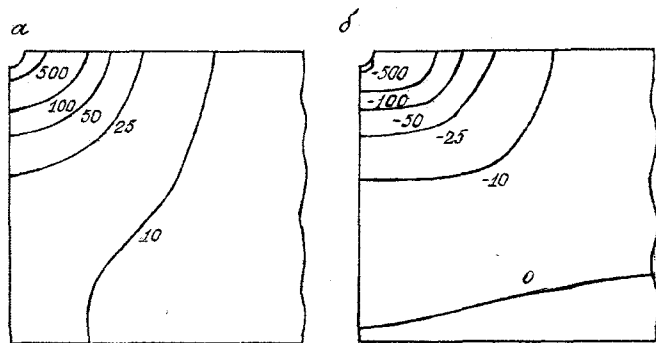


Рис.3. Характер распределения напряжений σ_1 (а) и σ_2 (б) при двух свободных от усилий границ блока

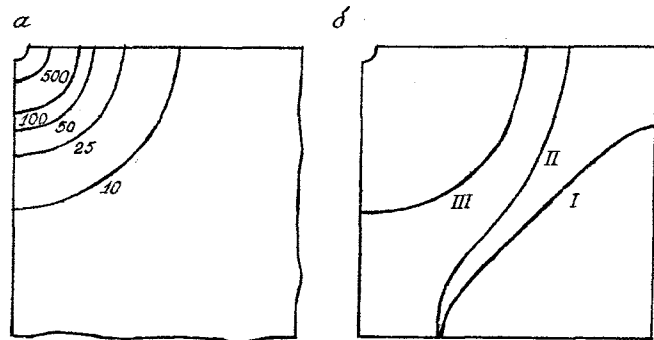


Рис.4. Изолинии напряжений σ_1 для случая «безграничной» среды (а) и распределение в массиве изобары $\sigma_1 = 10$ МПа (б) I, II, III – варианты расчета

значения на достаточно больших расстояниях от места приложения нагрузки малы. Второе главное напряжение σ_2 (рис.3, б) изменяется в меньшей степени. Можно отметить лишь, что область действия сжимающих усилий, по абсолютной величине меньших 10 МПа, в направлении оси x занимает теперь большую площадь. Значения напряжений σ_2 везде отрицательные и при удалении от взрывной полости на расстояние, большее 15 ее радиусов, становятся меньшими 1 МПа.

Для случая «безграничной» среды, когда размеры блока горных пород 100×100 м, распределение напряжений σ_x и σ_y симметрично относительно прямой $y = x$. Нулевая изобара делит расчетную область на две равные части, в одной из которых реализуется растяжение, в другой – сжатие. При рассмотрении характера поведения в расчетной области главных напряжений σ_1 и σ_2 можно установить, что для «безграничной» среды зона действия растягивающих напряжений, превышающих 10 МПа, занимает наимень-

шую площадь из всех рассмотренных вариантов и располагается в непосредственной окрестности взрывной полости (рис.4, а). Сжимающие напряжения σ_2 , напротив, в третьем варианте достигают наибольших значений.

Проведенные расчеты механического состояния массива для трех вариантов различных геометрических размеров технологических блоков позволяют оценить их с точки зрения возможного разрушения. Максимальные растягивающие и сжимающие напряжения различаются между собой незначительно, вместе с тем пределы прочности крепких горных пород на растяжение значительно меньше соответствующих на сжатие. Это указывает на правомерность сравнения рассмотренных вариантов с точки зрения возможного разрушения по распределению в массиве растягивающих напряжений.

Значения пределов прочности горных пород на растяжение на большинстве рудных месторождений Алтае-Саянского региона не превышает 10 МПа. Эта значение было принято за критическое, необходимое для разрушения элементарного объема массива. На рис.4, б для трех вариантов расчета показаны изолинии первого главного напряжения $\sigma_1 = 10$ МПа. Из рисунка четко видно, что наименьший объем разрушения соответствует случаю «безграничной» среды, наибольший – случаю четырех свободных от усилий внешних границ.

II. На втором этапе исследований была проведена оценка наиболее эффективного с точки зрения разрушения размера блока при взрыве ВКЗ на четыре свободные поверхности. С этой целью проведен расчет напряженного состояния массива при изменении линейных размеров блока от 14 до 28 м. Для анализа результатов расчетов в каждом варианте была построена изобара растягивающего напряжения σ_1 , имеющего значение 10 МПа, и все такие линии были изображены на одном рисунке (рис. 5). При увеличении размера блока от 14 до 20 м, площадь той части блока, в которой растягивающие напряжения превышают предел прочности на растяжение, растет. Дальнейшее увеличение длины и ширины блока до 28 м приводит к уменьшению этой области. Таким образом, выполненные на этом этапе расчеты показали, что наиболее эффективными с точки зрения разрушения массива горных пород ВКЗ при взрыве на четыре свободные поверхности являются размеры блока 20 × 20 м.

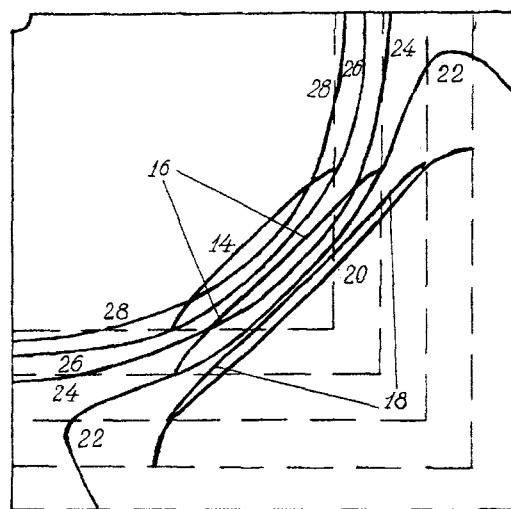


Рис.5. Изменение области разрушения в массиве горных пород при увеличении размеров блока 14-28 – длина и ширина блока в метрах

Выводы

1. Математическое моделирование напряженного состояния массива горных пород в рамках модели «квазистатического» действия ВКЗ на упругую среду показывает, что в окрестности взрывной полости формируется зона растягивающих напряжений.
2. Наибольший объем разрушения в массиве вокруг взрывной полости достигается для варианта взрыва ВКЗ на четыре свободные поверхности.
3. Наиболее эффективным по объему разрушаемой области является размер блока 20 × 20 м.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Власов О.Е.* Основы дробления горных пород взрывом / О.Е.Власов, С.А.Смирнов. М.: Изд-во АН СССР. 1962.
2. *Дубынин Н.Г.* Опыт применения скважин диаметром 212 мм при подземной отбойке крепких руд / Н.Г.Дубынин, П.Г.Гайдин // Горный журнал. 1981. № 7.
3. *Ермак Г.П.* Совершенствование буровзрывных работ на Абаканском руднике / Г.П.Ермак, В.И.Бендюга, И.В.Машуков и др. // Горный журнал. 1997. № 11.
4. *Машуков В.И.* Действие взрыва на окружающую среду и способы управления им. М.: Недра. 1976.
5. *Машуков В.И.* Совершенствование буровзрывных работ при обрушении междокамерных целиков / В.И.Машуков, А.А.Еременко и др. // Горный журнал. 1982. № 6.
6. *Ханукаев А.Н.* Физические процессы при отбойке горных пород взрывом. М.: Недра. 1974.