

ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ОТРАБОТКЕ ОПЫТНО- ПРОМЫШЛЕННОГО БЛОКА РУДНИКА «ИНТЕРНАЦИОНАЛЬНЫЙ»

К.т.н. Барышников В.Д., к.т.н. Болтенгаген И.Л.
Институт горного дела СО РАН, г.Новосибирск
к.т.н. Н.П.Крамсков
Институт ЯкутНИПРОАлмаз, г.Мирный
А.В.Вечкитов, А.С.Кульминский, О.Г.Шаньшин
АК «АЛРОСА», г.Мирный

АННОТАЦИЯ: Выполнено компьютерное моделирование изменения поля напряжений при последовательной выемке рудных запасов. Исследованы особенности распределения напряжений вокруг цилиндрических выработанных пространств. Предложены геомеханические рекомендации по выбору параметров конструктивных элементов системы разработки.

Введение

Месторождения алмазов в Якутии обрабатывались открытым способом. Достигнуты предельные глубины карьеров. В последние годы развиваются подземные способы добычи руды. Актуальность задачи связана с обеспечением безопасности горных работ при подземной выемке запасов кимберлитовых руд. На руднике «Интернациональный» на глубине 700 - 800 м отработан опытно – промышленный блок №6 высотой 90 м. Рудное тело (вертикальная трубка диаметром 60 - 70 м) в пределах блока разбивалось на три подэтажа. Применялись варианты слоевой системы разработки с закладкой при восходящем и нисходящем порядке выемки руды. Горизонтальные слои высотой 3.5-5 м обрабатывались с помощью проходческого комбайна по камерно - целиковой схеме заходками шириной около 5 м и закладывались твердеющими смесями. В процессе ведения горных работ в блоке создавались заполненные закладкой цилиндрические выработанные пространства, разделенные рудными потолочинами. Методом конечных элементов моделировались изменения поля напряжений при последовательной выемке рудных запасов.

Конечно-элементная модель

По результатам исследований методом целевой разгрузки вертикальная компонента начального поля напряжений на руднике на данной глубине соответствует весу налегающей толщи пород, различие горизонтальных компонент не превышает 20% и их отношение к вертикальной компоненте находится в интервале значений от 0.7 до 1.0 [1]. В данных условиях при цилиндрической форме выработанных пространств реализуется осесимметричное напряженное состояние массива горных пород. В конечно- элементной модели принималось следующее начальное напряженное состояние массива горных пород, соответствующее данным экспериментальных измерений,

$$\sigma_z^0 = \gamma z , \sigma_r^0 = \sigma_\theta^0 = \lambda \gamma z , \tau_{rz}^0 = 0 ,$$

где z – расстояние от земной поверхности (глубина), γ – удельный вес массива горных пород, равный 27 КН/м³, величина λ (отношение горизонтальной компоненты начального поля напряжений к вертикальной) при моделировании изменялось в интервале значений 0.7-1. Задачи

решались в дополнительных перемещениях [2] в осесимметричной постановке при следующих условиях на внешней границе – поверхности цилиндра диаметром 4 км и высотой 2 км: верхняя горизонтальная граница – свободна от напряжений, на нижней горизонтальной границе заданы нулевые дополнительные смещения, на вертикальной боковой границе – горизонтальные дополнительные смещения и касательные напряжения равны нулю. Модуль упругости и коэффициент Пуассона массива горных пород принимались равными 10 ГПа и 0.25, соответственно. Высота выработанных пространств – цилиндров диаметром 60 м приведена ниже на соответствующих иллюстрациях результатов решения задач. Модуль деформации заполняющего выработанные пространства искусственного массива в 10-100 раз меньше модуля упругости массива горных пород. Реакция закладочного массива, обусловленная смещениями границ выработанного пространства высотой менее 100 м, создает давление, не превышающее 2 МПа, которое препятствует обрушению вмещающих пород. Напряжения на данной глубине порядка 20 МПа и реакцией закладочного массива можно пренебречь. При моделировании механического состояния массива горных пород закладка не учитывалась.

В случае осесимметричной постановки задачи при использовании трехузловых элементов, имеющих форму кольца с треугольным поперечным сечением, элементный вклад в подматрицу k_{ps} матрицы жесткости, характеризующую взаимозависимость смещений (u_r, v_θ) соседних узлов с номерами p, s , определяется следующим выражением [3]:

$$k_{ps}^e = \frac{\pi \bar{r}}{2} \mu \frac{|\Delta|}{\Delta^2} \begin{vmatrix} b_p b_s + c_p c_s + \alpha(b_p d_s + d_p b_s) + \beta c_p c_s & \alpha(b_p + d_p) c_s + \beta c_p b_s \\ \alpha c_p (b_s + d_s) + \beta b_p c_s & c_p c_s + \beta b_p b_s \end{vmatrix},$$

где параметры $\alpha = \frac{\nu}{1-\nu}$ и $\beta = \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}$, $\mu = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}$ - коэффициент Ламе материала элемента (E – модуль Юнга, ν – отношение Пуассона). Геометрические параметры b_k, c_k, d_k – определяются координатами узлов элемента:

$$b_p = z_s - z_q, b_s = z_q - z_p, c_p = r_q - r_s, c_s = r_p - r_q, \\ d_p = \frac{r_q z_s - r_s z_q}{\bar{r}} + b_p + \frac{c_p \bar{z}}{\bar{r}}, d_s = \frac{r_p z_q - r_q z_p}{\bar{r}} + b_s + \frac{c_s \bar{z}}{\bar{r}},$$

(\bar{r}, \bar{z} - координаты центра треугольника p, q, s). Модуль величины

$$\Delta = 1/2 [(r_q - r_s)(z_p - z_s) - (z_q - z_s)(r_p - r_s)]$$

равен площади треугольного сечения элемента.

При решении задачи в дополнительных смещениях начальные напряжения в расчетной области учитываются с помощью эквивалентных узловых сил [4]. Вклад начальных напряжений элемента σ_{ij}^0 в компоненты силового вектора узла p определяется следующими выражениями:

$$R_p^e = \text{sign}(\Delta) \pi \bar{r} (b_p \sigma_r^0 + d_p \sigma_\theta^0 + c_p \tau_{r\theta}^0), Z_p^e = \text{sign}(\Delta) \pi \bar{r} (c_p \sigma_z^0 + b_p \tau_{r\theta}^0).$$

Система линейных уравнений относительно узловых перемещений решалась итерационным методом последовательной верхней релаксации. Количество узлов сетки – около 2000. Минимальный размер элемента – 1 м.

Двухмерная осесимметричная упругая модель, не описывая всех особенностей деформирования горных пород вокруг выработанных пространств, позволяет, тем не менее, оценить изменения механического состояния массива при развитии горных работ.

Моделирование последовательной отработки запасов

Рис.1 иллюстрирует напряженное состояние массива горных пород на следующих этапах разработки опытно- промышленного блока:

а - отработка 2 слоев (общей высотой 10 м) нижнего подэтажа;

б - отработка 2 слоев нижнего подэтажа и одного слоя (высота 5.25 м) среднего подэтажа;

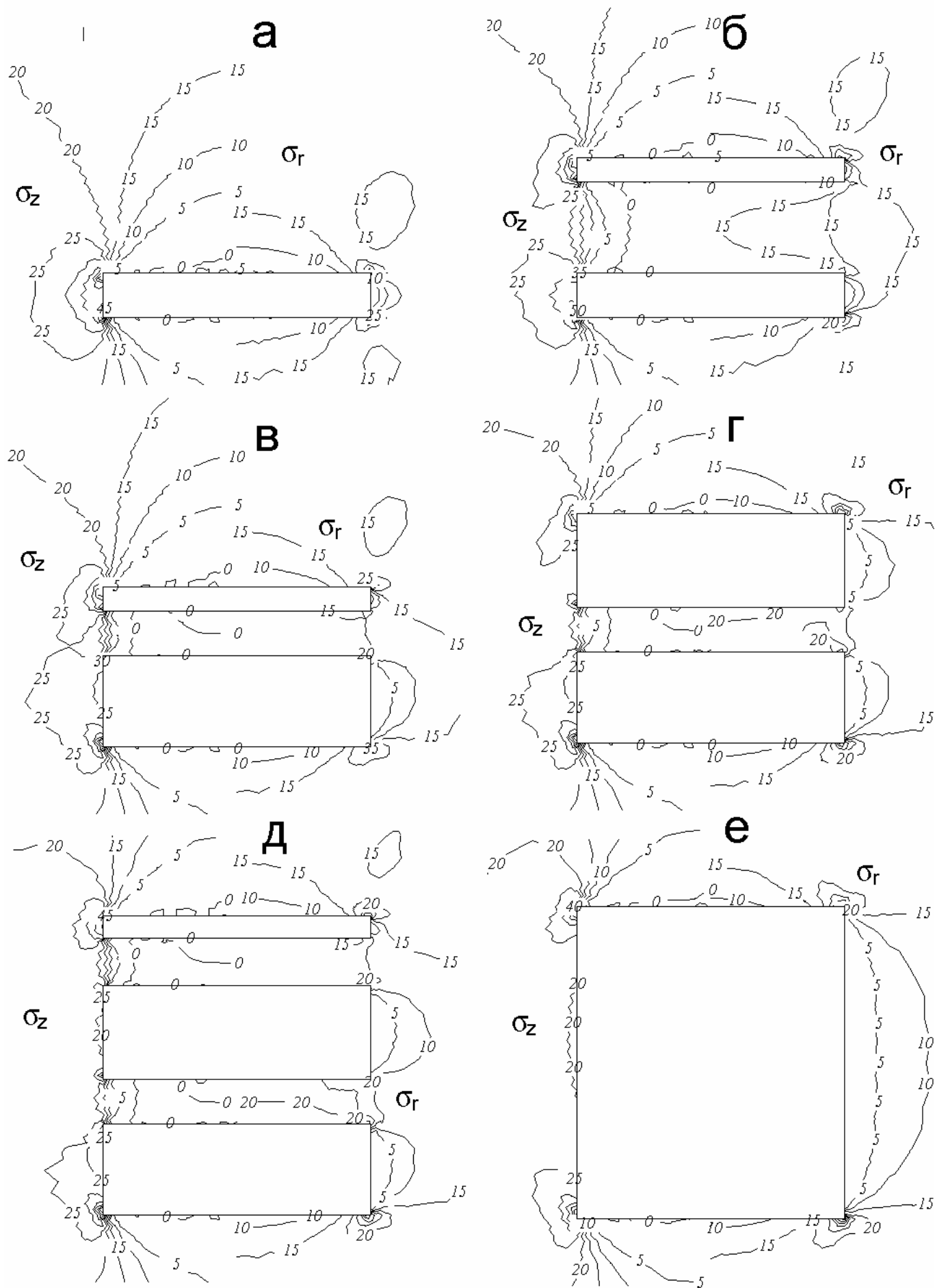


Рис.1. Напряжения вокруг выработанных пространств в процессе выемки запасов блока.

выработанные пространства разделены потолочиной высотой 20.5 м;

в - отработка 5 слоев (высота 20.5 м) нижнего подэтажа и 1 слоя (высота 5.25 м) среднего подэтажа; выработанные пространства разделены потолочиной высотой 10 м;

г - отработка 5 слоев нижнего подэтажа и 4 слоев (высота 21 м) среднего подэтажа; выработанные пространства разделены потолочиной высотой 10 м;

д – в дополнение к (*г*) отработан нижний слой верхнего подэтажа (высота 4.5 м); три цилиндрических выработанных пространства разделены двумя потолочинами высотой 10 м и 10.5 м.

е – выполнена выемка рудных запасов нижнего и среднего подэтажа, создано единое выработанное пространство высотой около 70 м.

Почва нижнего выработанного пространства находится на глубине около 770 м. Коэффициент бокового распора λ принимался равным 0.8. Величины начального вертикального и горизонтального напряжений на данной глубине равны 21 и 17 МПа соответственно. Вследствие осевой симметрии на соответствующих иллюстрациях приведены изолинии как вертикальных (слева), так и горизонтальных радиальных (справа) компонент напряжений.

На начальной стадии выемки запасов (рис.1,а) коэффициент концентрации вертикальных напряжений в центральной части вертикальной границы выработанного пространства равен 1.6-1.9. Горизонтальные напряжения в кровле и почве снижаются до величины 5 МПа.

После выемки нижнего слоя среднего подэтажа и создания двух выработанных пространств формируется межслоевая потолочина (рис.1,б). Коэффициент концентрации вертикальных напряжений на вертикальной границе верхнего выработанного пространства достигает 1.9-2.1, на вертикальной границе нижнего выработанного пространства его величина снижается до 1.4-1.6. В межэтажной потолочине высотой 20.5 м вертикальная компонента напряжений равна нулю а горизонтальная – около 18 МПа.

После уменьшения размеров межэтажной потолочины до 10.5 м вследствие выемки запасов нижнего подэтажа (рис.1,в) горизонтальные напряжения в потолочине увеличиваются до 15-20 МПа и фиксируется консольный характер деформирования потолочины с растягивающими вертикальными напряжениями в нижней его части (в кровле нижнего выработанного пространства) и сжимающими - в верхней (в почве верхнего выработанного пространства). Коэффициент концентрации вертикальных напряжений на вертикальной границе нижнего выработанного пространства снижается до 1.2, что объясняется увеличением его высоты (возрастает расстояние между концентраторами напряжений в углах выработки). Коэффициент концентрации вертикальных напряжений вблизи вертикальной границы верхнего выработанного пространства не изменяется и равен 1.9-2.1.

После дополнительной выемки запасов среднего подэтажа (рис.1,г) горизонтальные напряжения в межслоевой потолочине увеличиваются до 20-22 МПа. Коэффициент концентрации вертикальных напряжений на вертикальной границе выработанных пространств равен 1.2.

После выемки нижнего слоя верхнего подэтажа созданы три выработанных пространства (рис.1,д) и сформированы две межслоевые потолочины высотой 10 и 10.5 м. Фиксируется консольный характер деформирования обеих потолочин. Горизонтальные напряжения в нижней потолочине 20-22 МПа, в верхней – 15-20 МПа. Коэффициент концентрации вертикальных напряжений на вертикальных границах верхнего выработанного пространства равен 1.9-2.1, среднего – 0.9-1.1, нижнего – 1.2-1.4.

После создания единого выработанного пространства высотой 70 м (рис.1,е) коэффициент концентрации вертикальных напряжений в центральной части вертикальной границы выработанного пространства снижается до 1.-1.1. Горизонтальные напряжения в кровле и в почве выработанного пространства – около 12 МПа.

Основные особенности напряженно- деформированного состояния массива горных пород – увеличение вертикальных напряжений вблизи вертикальных границ выработанных пространств и разгрузка кровли и почвы. Наибольшая концентрация напряжений фиксируется в углах на сопряжениях горизонтальных и вертикальных границ выработанных пространств. В центральной части кровли верхнего выработанного пространства фиксируется зона растягивающих

вертикальных напряжений, распространяющаяся на глубину до 5 м. Из анализа границы областей сжимающих и растягивающих дополнительных вертикальных деформаций массива горных пород вокруг выработанных пространств получена оценка угла сдвижения (около 60^0).

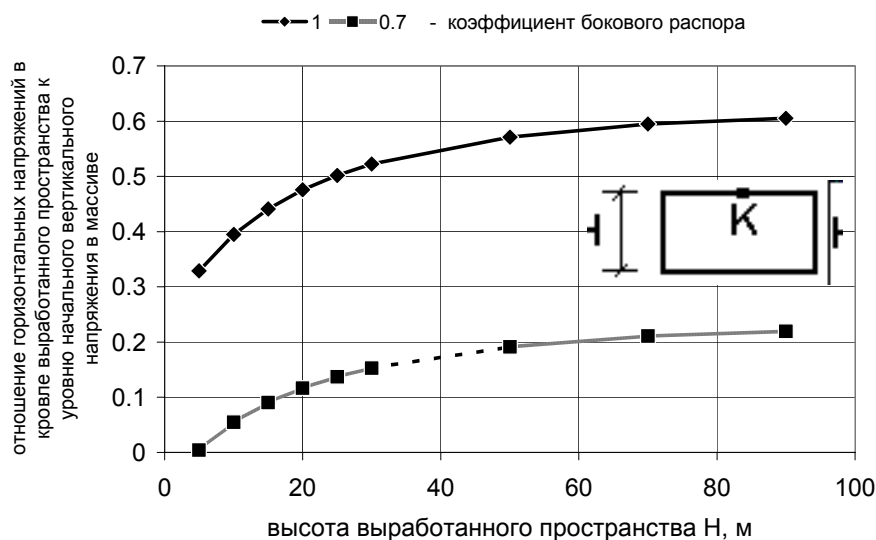


Рис.2. Зависимость концентрации горизонтальных напряжений в центре кровли цилиндрического выработанного пространства от его высоты при λ равном 0.7 и 1.

Компьютерное моделирование позволило исследовать изменения напряженного состояния массива горных пород при различной высоте одиночного цилиндрического выработанного пространства и коэффициенте бокового распора λ . На рис.2 показаны расчетная схема и зависимости величины горизонтального напряжения (в единицах γz) в центре кровли цилиндрического выработанного пространства (точка К) от его высоты. При увеличении коэффициента бокового распора с 0.7 до 1.0 горизонтальные напряжения в кровле выработанного пространства возрастают в почти в три раза. Увеличение высоты выработанного пространства от 10 до 30 м сопровождается незначительным повышением уровня горизонтальных напряжений в кровле с 5 до 10 МПа. При дальнейшем увеличении высоты выработанного пространства до 50 и 70 м уровень горизонтальных напряжений практически не изменяется. Высота выработанного пространства, при которой достигается стабильный характер напряженного состояния, не изменяющийся с увеличением его высоты, может быть оценена величиной 40 м при диаметре выработанного пространства 60 м. Отметим снижение коэффициента концентрации вертикальных напряжений на вертикальных границах выработанного пространства с 2 до 1 при изменении его высоты от 10 до 50 м. При дальнейшем увеличении высоты выработанного пространства концентрация вертикальных напряжений снижается.

Для приближенных верхних оценок горизонтальных напряжений в кровле и почве выработанного пространства σ_h

$$\sigma_h = (a+b)\sigma_h^0 + c\sigma_v^0 \quad (1)$$

могут быть использованы коэффициенты концентрации напряжений в забое цилиндрической скважины полученные Ван- Херденом [5]

$$a=1.25, b=0, c=-0.75(0.645 + \nu),$$

где σ_h^0 и σ_v^0 – начальные горизонтальная и вертикальная компоненты напряжений на данном горизонте, ν - коэффициент Пуассона. При ν равном 0.25 получим

$$\sigma_h = 1.25\sigma_h^0 - 0.67125\sigma_v^0, \quad \sigma_h = (1.25 - 0.67125/\lambda)\sigma_h^0, \quad \sigma_h = (1.25\lambda - 0.67125)\sigma_v^0.$$

В частных случаях значений коэффициентов бокового распора получим при λ равном 0.7 - σ_h равно $0.204 \sigma_v^0$, а при λ равном 1 - σ_h равно $0.579 \sigma_v^0$; т.е. горизонтальные напряжения в кровле выработанного пространства возрастают примерно втрое при увеличении λ с 0.7 до 1.

Одним из основных конструктивных элементов системы разработки является рудная потолочина, разделяющая выработанные пространства подэтажей. На рис.3 приведена расчетная схема и коэффициенты концентрации горизонтальных напряжений в центральной верхней части потолочины (точка О) при различной ее высоте для λ равного 0.7 и 1. По результатам компьютерного моделирования коэффициент концентрации горизонтальных напряжений в центральной части межэтажной потолочины увеличивается от 1. до 1.5 при уменьшении высоты потолочины с 25 до 5 м. Вертикальные напряжения близки к нулю (не превышают 1-2 МПа). По формуле Ван-Хердена при нулевом значении вертикальных напряжений величина коэффициента концентрации горизонтальных напряжений 1.25 может быть использована для практических оценок механического состояния потолочины.

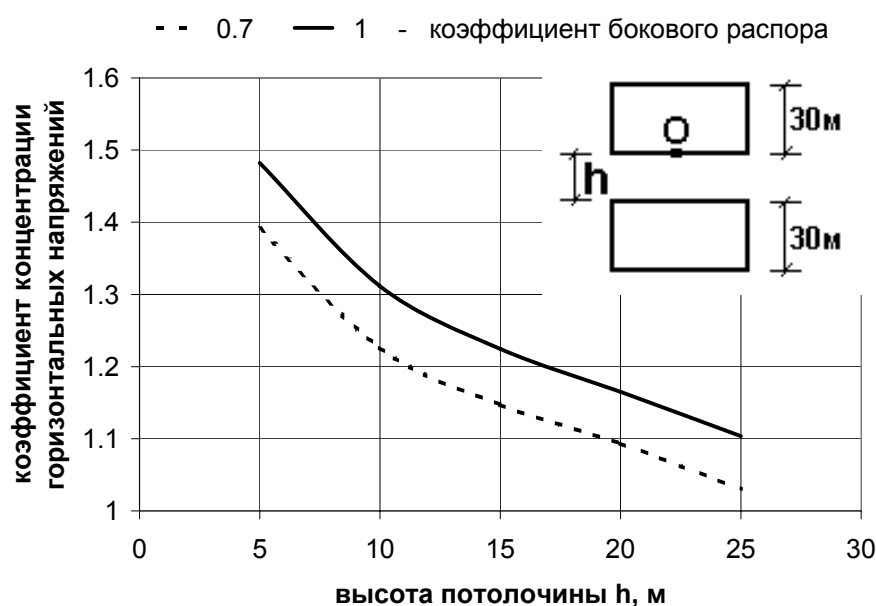


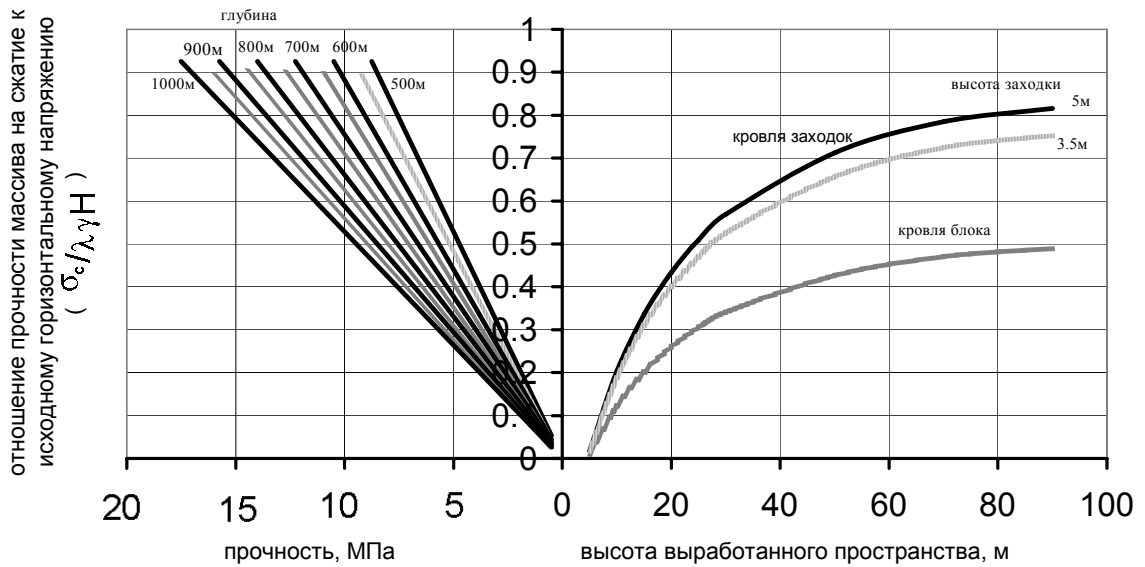
Рис.3 Концентрация горизонтальных напряжений в потолочине при различной ее высоте.

На основании выполненных расчетов напряженного состояния массива горных пород вокруг цилиндрических выработанных пространств построены номограммы, приведенные на рис.4-5 для оценки устойчивости кровли центральных заходок. Коэффициенты концентрации в кровле прямоугольных заходок шириной 5 м и высотой 5 и 3.5 равны 1.67 и 1.54 (получены из решения задач в плоской постановке о напряжениях в упругой полуплоскости с прямоугольным вырезом). Коэффициент запаса по результатам исследования вариации прочности рудного массива принимался равным 1.56.

Геомеханические условия отработки определяются глубиной горных работ, коэффициентом бокового распора (отношением горизонтальных исходных напряжений к вертикальным) и прочностью массива на сжатие. Для определения условий применения слоевой восходящей системы рекомендуется использование номограмм, представленных на рис.4. В левой части номограмм приведены отношения прочности массива на сжатие к величине исходного горизонтального напряжения для различных глубин ведения горных работ и прочности рудного массива. В правой части диаграмм показаны отношения величин напряжений в кровле выработанного пространства (нижняя кривая) и в кровле заходки шириной 5 м в центральной части трубки высотой 5 м и 3.5 м (верхние кривые) к действующим в массиве исходным горизонтальным напряжениям при различной высоте выработанного пространства. Данные

а

номограмма для оценки устойчивости кровли выработанного пространства и кровли заходки в центре трубки (боковой отпор 0.7)



б

номограмма для оценки устойчивости кровли выработанного пространства и кровли заходки в центре трубки (боковой отпор 1)

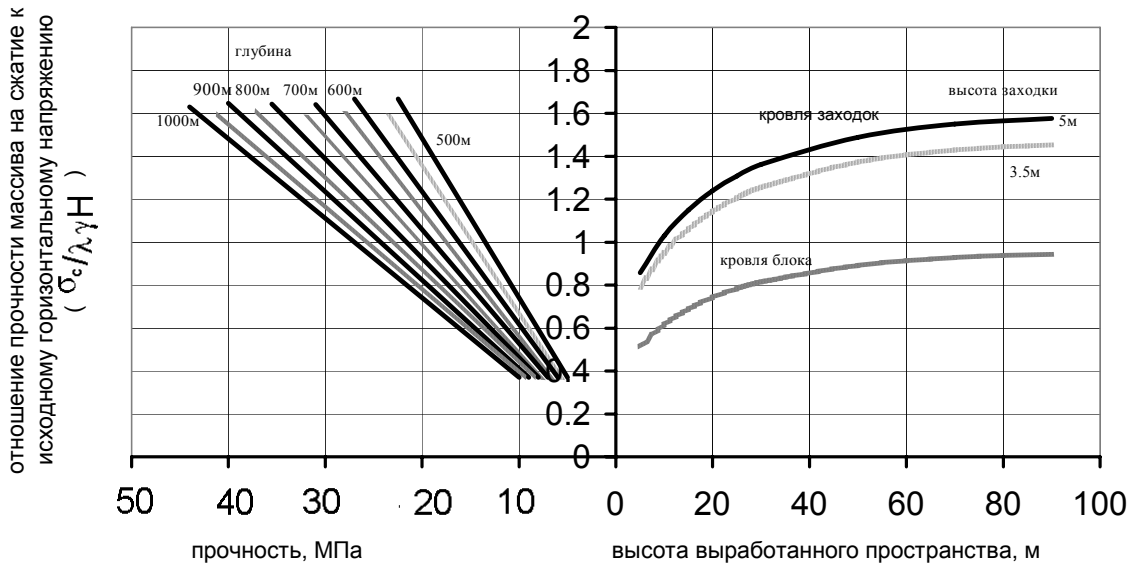
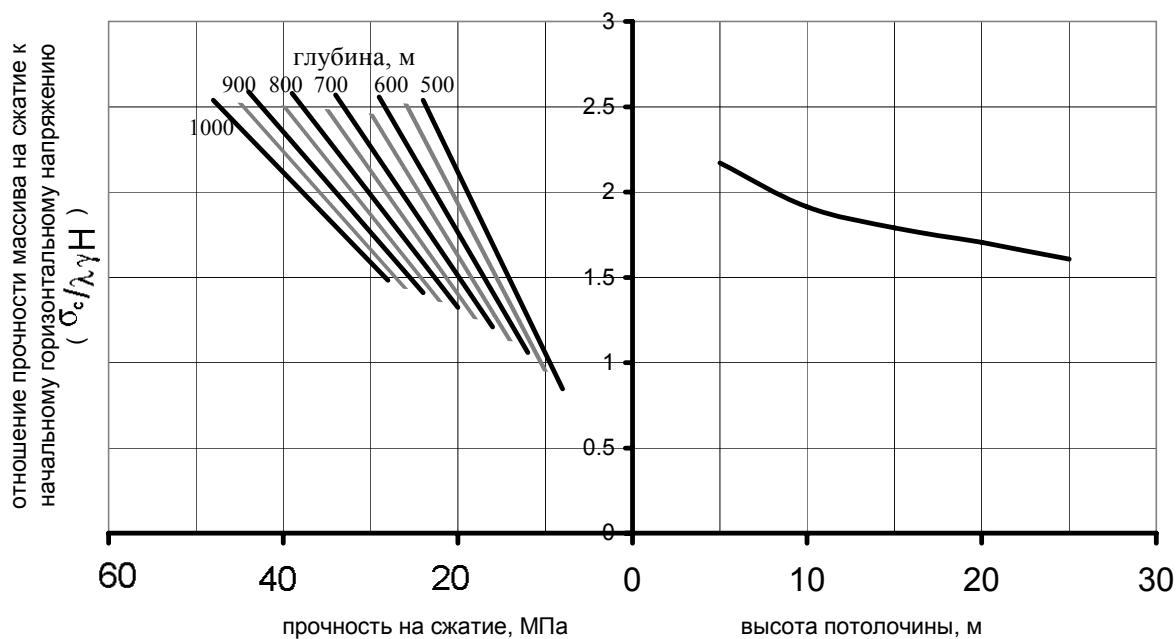


Рис.4. Номограммы для оценки устойчивости кровли центральных заходок над одиночным цилиндрическим выработанным пространством при различной глубине разработки и прочностных свойствах руды для коэффициента бокового распора равного 0.7 (а) и 1 (б).

а

номограмма для определения устойчивости потолочины (боковой отпор 0.7)



б

номограмма для определения устойчивости потолочины (боковой отпор 1)

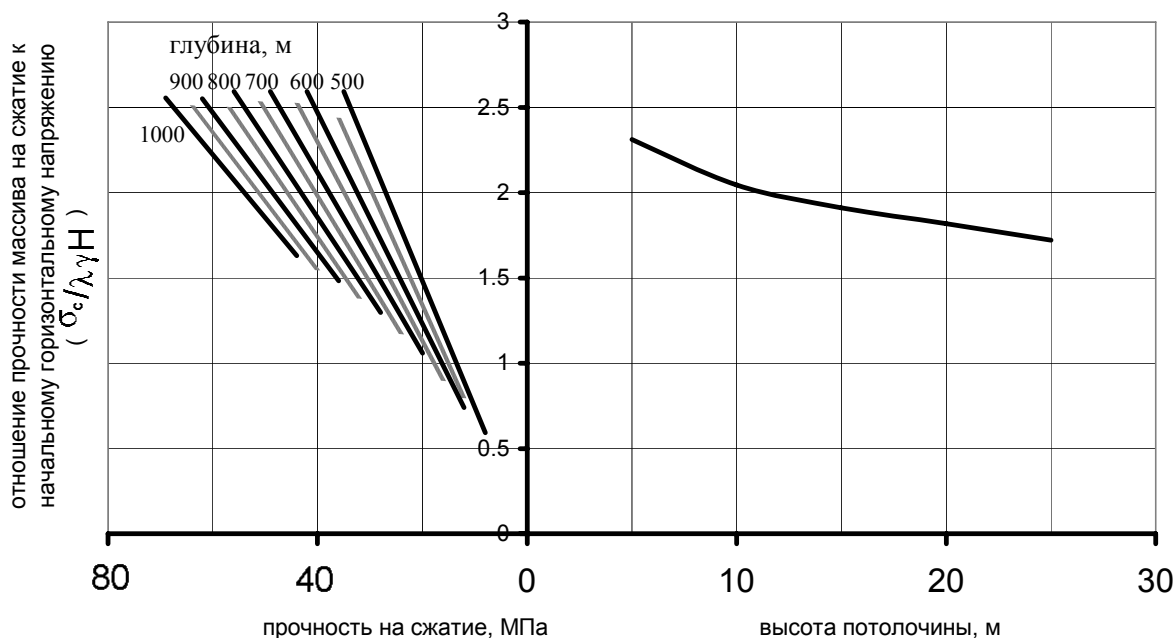


Рис.5. Номограммы для оценки устойчивости массива скальных пород при различной глубине разработки и прочностных свойствах руды для коэффициента бокового распора равного 0.7 (а) и 1 (б).

номограммы позволяют определять предельную высоту выработанного пространства при различных геомеханических условиях отработки трубки. Рассмотрим следующий пример. Пусть прочность массива на сжатие равна 10 МПа и коэффициент бокового распора 0.7 (рис.4,а) на глубине около 900 м. Проводя вертикальную линию от прочности 10 МПа до точки пересечения с линией глубины 900 м найдем точку в левой части номограммы. Проводя от этой точки горизонтальную линию до пересечения с кривыми правой части номограммы и опуская от них перпендикуляры на горизонтальную ось правой части, найдем высоту выработанного пространства. В данном случае из условия устойчивости кровли заходок высотой 5 м она может достигать 35 м. Начиная с этого размера высоту заходки необходимо уменьшить до 3.5 м. Это позволит увеличить высоту безопасной отработки до 40м. При боковом отпоре 1 (рис.4,б) и прочности массива 30 МПа на глубине около 900 м высота выработанного пространства может достигать 15 м при высоте заходки 5 м. Снижение высоты заходки до 3.5 м позволит отработать еще один слой. Данные номограммы позволяют также при заданной высоте выработанного пространства на определенной глубине определять необходимую прочность массива. Например, создание выработанного пространства высотой 25 м на глубине 800 м заходками высотой 5 м при коэффициенте бокового отпора 0.7 возможно при прочности массива не ниже 8 МПа (рис.4,а). Для той же высоты блока и глубины ведения горных работ при коэффициенте бокового отпора 1 (соляной массив) необходима прочность массива не менее 25 МПа (рис.4,б). Нижняя кривая в правой части рисунков позволяет оценивать условия устойчивости кровли выработанного пространства.

Аналогична методика оценки устойчивости рудного массива в потолочинах (рис.5). Концентрация напряжений в потолочине значительно выше, чем в кровле одиночного выработанного пространства, и для безопасного ведения необходима более высокая прочность рудного массива. Для глубины 800 м и высоты потолочины 15 м при λ равном 0.7 необходима прочность руды более 27 МПа (рис.5,а); при λ равном 1 – более 40 МПа (рис.5,б). Коэффициент запаса –1.56. Для определения условий устойчивости центральных заходок высотой 5 и 3.5 м при восходящем порядке разработки необходимо поднять графики правой части рисунков в соответствии с коэффициентом концентрации напряжений (в 1.67 и 1.54 раза).

Заключение

Наиболее опасными по фактору горного давления являются области массива горных пород, расположенные в непосредственной близости (до 10 м) от вертикальных границ выработанного пространства. Возможное расслоение массива горных пород в кровле выработанных пространств на расстояниях около 10 м является дополнительным определяющим фактором, влияющим на устойчивость выработок. В практических оценках коэффициента концентрации горизонтальных напряжений в центральной части межэтажных потолочин может быть использована величина 1.25 при нулевом значении вертикальных напряжений. Предложены номограммы для оценки устойчивости кровли центральных заходок при восходящей системе разработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Барышников В.Д., Болтенгаген И.Л., Коврижных А.М.** Определение напряжений методом щелевой разгрузки // Комбинированная геотехнология: развитие способов добычи и безопасность горных работ. – Магнитогорск: МГТУ, 2003.
- 2. Болтенгаген И.Л.** Моделирование начальных напряжений и поверхностей ослабления методом конечных элементов // ФТПРПИ, №2, 1999.
- 3. Болтенгаген И.Л.** О влиянии модуля упругости грунта на характер колебаний заглубленного стального цилиндра // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли. –Новосибирск: ИГД СО РАН, 2001.
- 4. Зенкевич О.** Метод конечных элементов в технике. –М.: Мир, 1975.
- 5. Курленя М.В., Попов С.Н.** Теоретические основы измерения напряжений в массиве горных пород. – Новосибирск: Наука, 1982.