

ГЕОТЕХНОЛОГИЯ

УДК 622.831

И.А.Ермакова

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И УСТОЙЧИВОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМ РАЗРАБОТКИ С ОБРУШЕНИЕМ РУДЫ И ВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД

При разработке рудных месторождений системами с обрушением руды и вмещающих пород возникают следующие геомеханические задачи.

1. Описание деформационного состояния обрушенных пород и руды в выемочных блоках.

2. Установление границ зоны обрушения над отработанными блоками.

3. Расчет напряженного состояния рудного массива в окрестности блоков и оценка устойчивости конструктивных элементов рассматриваемых систем разработки.

Адекватную постановку и решение основной задачи 3 можно получить только после решения первых двух задач.

Сложность описания деформационного состояния обрушенных пород и руды состоит в том, что практически невозможно провести натурные эксперименты по определению деформационных характеристик этой среды. Поэтому решение

первой задачи сводится к построению математической модели деформационного состояния обрушенных пород и руды и выбору соответствующих значений деформационных характеристик. Один из таких подходов состоит в описании состояния обрушенных пород и руды, как линейно-деформируемой среды [1] с модулем линейных деформаций на порядок меньшим, чем у массива вмещающих пород. Такой подход позволяет рассматривать рудный массив и обрушенные породы как кусочнооднородное линейно-деформируемое тело и получать приемлемые для практики оценки напряженного состояния рудного массива в окрестности выемочных блоков. Другой деформационной моделью обрушенных руд и пород является модель сыпучей среды, которая более приемлема при учете выпуска руды из блоков [2]. В этом случае обрушенная руда и порода переходят из состояния покоя в движение как сыпучая

среда. Характеристики обрушенных руд и пород как сыпучей среды в предельном состоянии – коэффициенты трения и сцепления, можно оценить по углу откоса в доставочной выработке.

Решение задачи 2 также усложняется отсутствием натурных наблюдений за поведением обрушенных пород. Установление точных границ зоны обрушения позволило бы выделять в массиве горных пород расчетную область и задавать соответствующие граничные условия по напряжениям или смещениям. Поэтому размеры границы зоны обрушения и, прежде всего ее высоту, следует рассматривать как переменный параметр задачи. При значительном развитии горных работ в качестве высоты зоны обрушения вмещающих пород можно принимать суммарную высоту отработанных этажей.

В данной работе приведены постановки задач и результаты расчетов напряженного состоя-

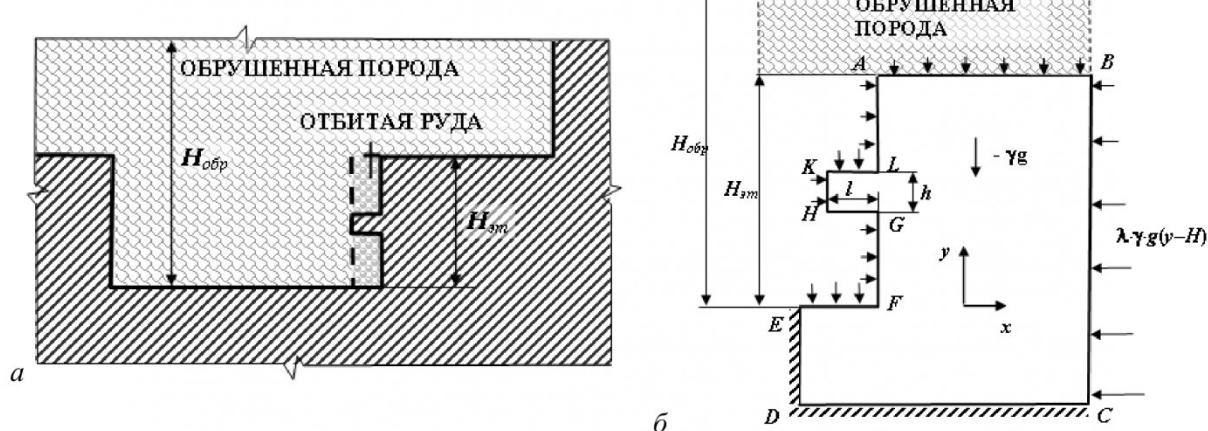


Рис.1. Сечение очистного пространства с разделительным целиком (а) и расчетная схема для определения напряженно-деформированного состояния целика (б)

ния и устойчивости рудного массива в окрестности очистного блока для двух систем разработки с обрушением руды и вмещающих пород.

Система разработки с формированием разделительных целиков [3]

Рассматривалась типичная горнотехническая ситуация процесса очистной выемки руды системой разработки с обрушением руды и вмещающих пород с использованием разделительных целиков. Очистные работы находятся в стадии, когда над рудным массивом сформировался массив обрушенных пород на высоту $H_{обр}$, считая от днища отрабатываемого блока. Плоское вертикальное сечение блока, проходящее через середину разделительного целика, показано на рис.1а.

Из рассматриваемого сечения была выделена расчетная область – многоугольник $ABCDEF GHKL$ (рис.1б) по следующим критериям. Границы расчетной области BC и CD должны быть удалены от выемочного блока на расстояние,

не менее чем в три раза превышающие размеры блока в соответствующих направлениях. При таком удалении границ можно считать, что на них сохраняется начальное напряженно-деформированное состояние рудного массива, на которое не оказали влияния очистные работы. Линия DE является осью симметрии отрабатываемого горизонта, что позволяет рассматривать половину сечения, показанного на рис.1а. Остальные размеры расчетной области (высота этажа $AF = H_{эт}$, высота целика $KH = h$, ширина целика $GH = l$) являлись переменными величинами задачи.

Начальное напряженное состояние массива горных пород на глубине H в системе координат, показанной на рис.1б задавалось гравитационной вертикальной составляющей $\sigma_{yy} = \gamma g(y-H)$ и тектонической горизонтальной составляющей $\sigma_{xx} = \lambda \sigma_{yy}$. Эти напряжения являются главными и поэтому $\tau_{xy}=0$. Здесь γ – плотность горных пород; λ – коэффициент

бокового распора; g – ускорение свободного падения.

На границах расчетной области, контактирующих с массивом руды и вмещающими породами, принимались следующие граничные условия.

1) На границе BC были заданы напряжения, равные напряжениям в нетронутом массиве горных пород

$$\sigma_{xx} = \lambda \gamma g \cdot (y - H), \tau_{xy} = 0. \quad (1)$$

2) На границе CD , достаточно удаленной от линии очистного забоя, заданы постоянные нормальные перемещения u_y и нулевые касательные напряжения τ_{xy} , что также соответствует напряженно-деформированному состоянию нетронутого массива горных пород. Так как граничное значение $u_y = const$ не влияет на распределение напряжений в расчетной области, а изменяет только перемещения точек на эту константу, она может быть выбрана произвольно, в частности, была задана равной нулю

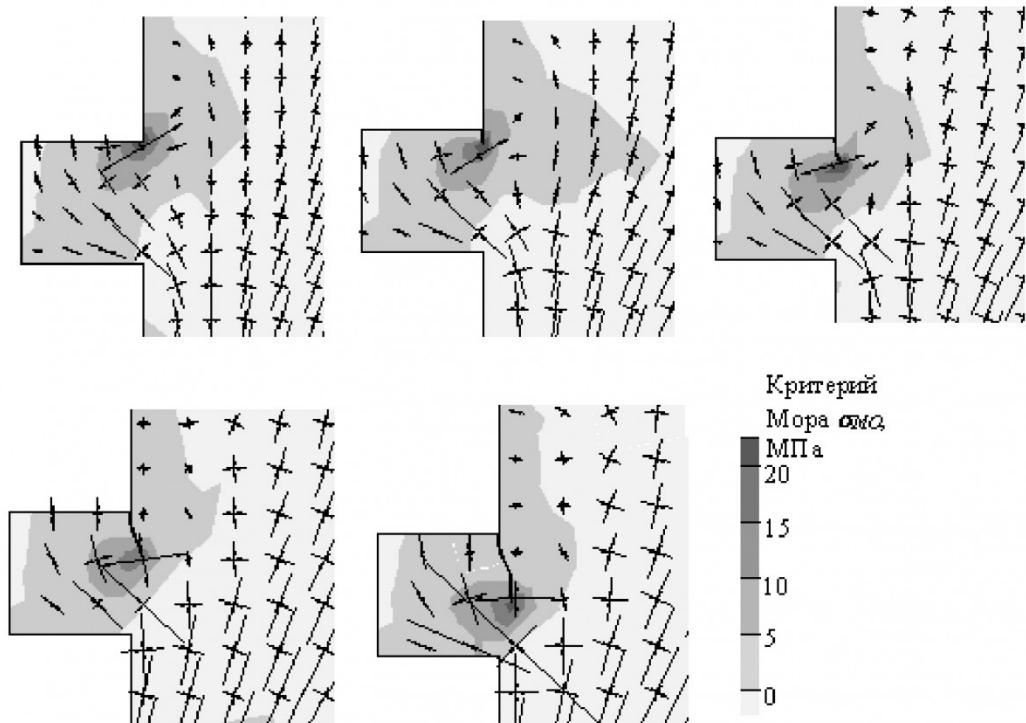


Рис.2. Типичное распределение главных напряжений и значений критерия Мора в разделительном целике и процесс его разрушения при $l/h=1$; $H_n=240$ м; $H_{эт}=80$ м; $H=600$ м; $\lambda=2$; $E=5 \cdot 10^9$ МПа; $v=0,25$; $\sigma_p=20$ МПа

$$u_y = 0, \tau_{xy} = 0. \quad (2)$$

3) Граница DE является осью симметрии, поэтому на ней отсутствуют горизонтальные перемещения и касательные напряжения, граничные условия имеют вид

$$u_x = 0, \tau_{xy} = 0. \quad (3)$$

4) На горизонтальных границах расчетной области AB , KL , EF , контактирующих с обрушенными породами, граничные условия определяются весом обрушенных пород и заданы следующим образом:

на AB

$$\sigma_{yy} = -\gamma g \frac{H_{обр} - H_{эм}}{k_p}, \quad (4)$$

$$\tau_{xy} = 0;$$

на KL и EF

$$\begin{aligned} \sigma_{yy} &= -\gamma g H_{обр} / k_{разр}, \\ \tau_{xy} &= 0; \end{aligned} \quad (5)$$

где k_p – коэффициент разрыхления обрушенной руды и породы.

5) На вертикальных границах блока AL , KH , GF граничные условия учитывали горизонтальное давление отбитой руды. Боковой подпор отбитой руды определяется из условия предельного равновесия сыпучего массива разрушенных горных пород как давление на вертикальную подпорную стенку [4]:

$$\sigma_{xx} = \frac{\gamma g H_{обр}}{k_p} \cdot \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}, \quad (6)$$

$$\tau_{xy} = 0,$$

где φ – угол внутреннего трения обрушенной руды и породы.

6) Нижняя граница целика HG свободна от нагрузок, на ней нормальные и касательные напряжения приняты равными нулю.

Для учета веса горных пород в расчетной области задавалась объемная сила ($-\gamma g$).

Таким образом, рассматривалась задача об определении напряженно-деформированного состояния линейно-деформируемой области рудно-

го массива, находящегося в состоянии плоской деформации с граничными условиями (1)÷(6). Решение данной задачи выполнялось численным методом конечных элементов (МКЭ). Генерируемая сетка треугольных элементов выбиралась неравномерной таким образом, чтобы сгущение элементов происходило в области наибольших градиентов напряжений, то есть в разделительном целике $GHKL$ и его окрестности. Точность решения контролировалась требованием выполнения граничных условий с погрешностью не более 5÷10% по значениям напряжений.

После расчета напряженно-деформированного состояния рудного тела в каждой точке области вычислялся прочностной параметр $\sigma_{мо}$ критерия Мора в форме

$$\sigma_{мо} = \sigma_1 - \frac{\sigma_p}{\sigma_{сж}} \cdot \sigma_2, \quad (7)$$

где σ_1 , σ_2 – главные напряжения; σ_p , $\sigma_{сж}$ – пределы прочности руды на растяжение и сжатие. Оценка прочности рудного массива проводилась путем сравнения расчетного значения $\sigma_{мо}$ с пределом прочности руды на растяжение σ_p . Выполнение условия $\sigma_{мо} > \sigma_p$ позволяет судить о потере прочности рудного массива и его частей.

На рис.2 приведено типичное распределение главных напряжений в разделительном целике, и показаны изолинии значений прочностного параметра $\sigma_{мо}$. Процесс разрушения целика воспроизведен путем последовательного образования трещины внутри зоны, в которой выполнялось условие потери прочности с учетом направления главных напряжений.

После обработки результатов расчетов значений прочностного параметра $\sigma_{мо}$ для различных горно-геологических и горнотехнических условий были получены зависимости, при-

веденные на рис.3.

Обобщение полученных результатов сводится к следующему. Для тонких целиков, при $h/l=1/2$, решающим фактором влияния является величина столба обрушенных сверху пород H_n . Глубина разработки H и коэффициент бокового распора λ практически не оказывают влияния на величину $\sigma_{мо}$ при $H_n > 120$ м. Для целика с $h/l=1/2$ значение $\sigma_{мо}$ связано с H_n уравнением регрессии

$$\begin{aligned} \sigma_{мо} &= 0,18 \cdot H_n + 5,57 \\ (R^2 &= 0,9674). \end{aligned}$$

На состояние целика с $h/l=1$ оказывают влияние оба фактора: и величина H_n , и величина $(\lambda \cdot H)$, в обоих случаях коэффициенты корреляции значимы. Значение $\sigma_{мо}$ связано с указанными факторами уравнением множественной регрессии:

$$\begin{aligned} \sigma_{мо} &= 1,875 + 0,054 \cdot H_n + \\ &0,005 \cdot (\lambda \cdot H) \quad (R^2 = 0,9765). \end{aligned}$$

Прочность целиков с промежуточной относительной высотой $1/2 < h/l < 1$ также связана с установленной закономерностью: чем тоньше целик, тем меньшее влияние на максимальное значение $\sigma_{мо}$ оказывает глубина разработки и коэффициент бокового распора.

Анализ результатов расчетов напряженно-деформированного состояния разделительного целика и его устойчивости показал следующее:

- напряженно-деформированное состояние целика под действием горного давления и веса обрушенных пород характеризуется возникновением растягивающих горизонтальных напряжений в верхней зоне целика на границе с рудным массивом;

- устойчивость «тонких» целиков с относительной высотой, близкой к 0,5 не зависит от начального напряженного состояния рудного массива, максимальное значение критерия Мора в них определяется высотой обрушенных пород над целиками по линейной зависимо-

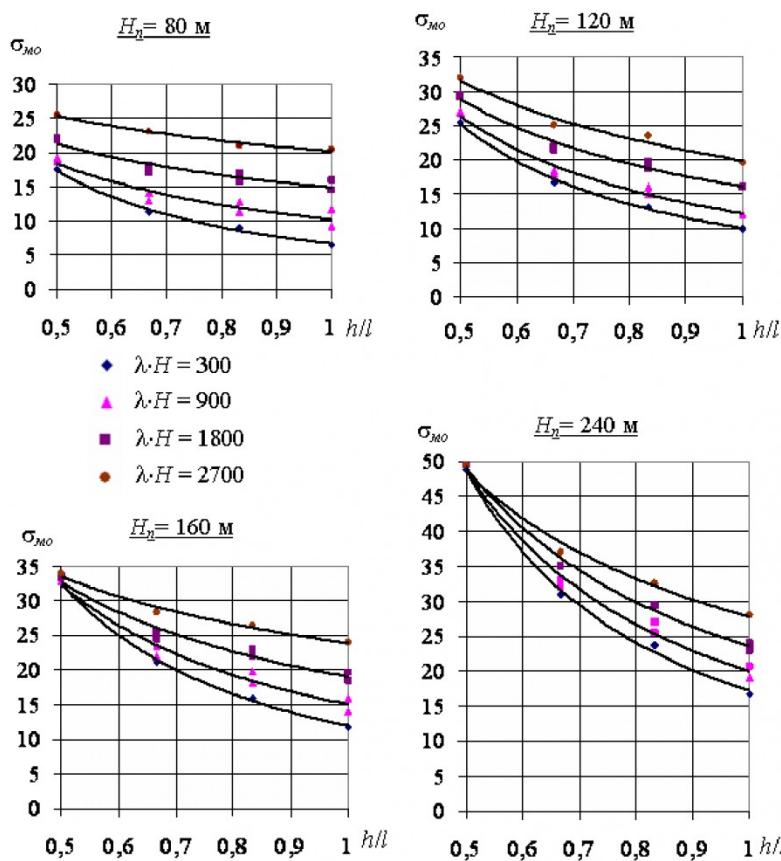


Рис.3. Изменение максимальных значений σ_{Mo} (МПа) в разделимом целике в зависимости от его относительной высоты h/l при различных значениях $\lambda \cdot H$ и высоты столба обрушенных над целиком пород H_n

сти;

– устойчивость целиков с относительной высотой, близкой к единице, определяется высотой обрушенных пород и произведением коэффициента бокового распора на глубину

разработки; максимальное значение критерия Мора связано с этими факторами линейной зависимостью.

Система разработки с формированием нависающих уступов [5].

Аналогичная расчетная схема была построена для исследования напряженно состояния уступов в очистном блоке (рис.4). Этаж по высоте делится на два подэтажа с формированием линии очистного забоя в виде нависающего уступа. На вертикальных и горизонтальных границах расчетной области ABCDEFGL задавались такие же граничные условия (1)–(6), за исключением вертикальных границ AL и GF.

На вертикальные границы AL и GF действуют две нагрузки со стороны обрушенной руды в блоке. Нормальные напряжения определяются боковым распором обрушенной руды, касательные напряжения возникают при выпуске руды из блока и рассчитываются через нормальные напряжения и коэффициент трения обрушенной руды о стенки блока k_{tp} . Граничные условия имеют вид на AL и FG

$$\sigma_{xx} = \frac{\gamma g H_{обр}}{k_p} \cdot \frac{1}{1 + \sin \varphi}, \quad (8)$$

$$\tau_{xy} = k_{tp} \cdot \sigma_{xx}.$$

Для выявления факторов, влияющих на напряженное состояние нависающего уступа и значения критерия Мора, были проведены расчеты в исследуемой области при различных горно-геологических и горнотехнических условиях.

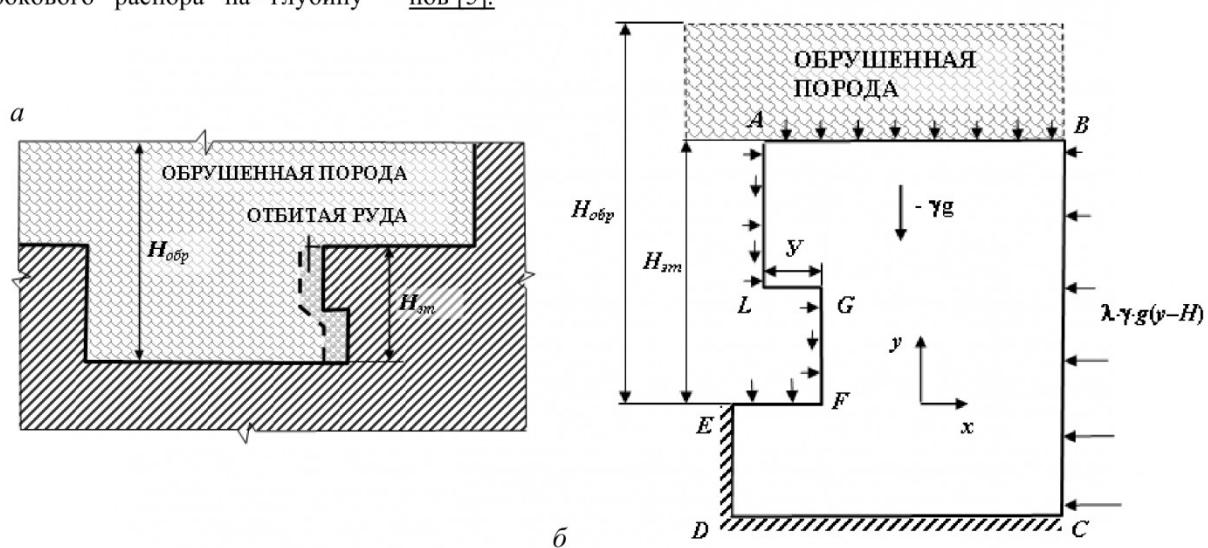


Рис.4. Сечение очистного пространства с нависающим уступом (а) и расчетная схема для определения напряженно-деформированного состояния уступа (б)

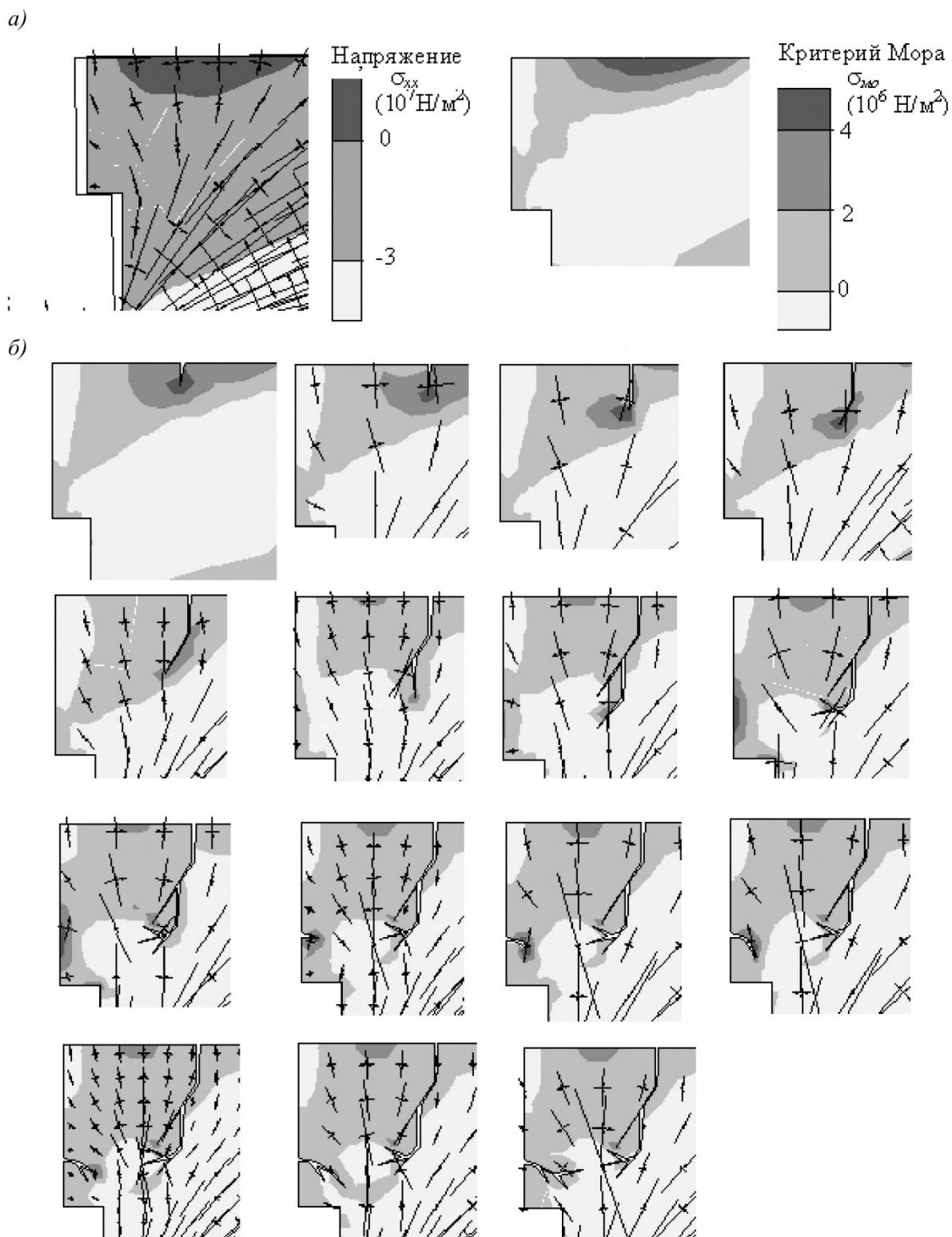


Рис.5. Распределение напряжений σ_{xx} , значений критерия Мора σ_{mo} (а) и стадии развития трещин в уступе (б) при $H=600\text{м}$, $\lambda=2$, $H_{обр}=3H_{эп}$, $Y=10\text{ м}$, $\sigma_p=4\text{ МПа}$.

Типичное распределение главных напряжений и значений критерия Мора σ_{mo} показаны на рис.5а. Максимальные значения σ_{mo} наблюдаются в верхней части уступа, где возникают горизонтальные растягивающие

напряжения σ_{xx} . Основное влияние на значение критерия Мора σ_{mo} оказывают глубина разработки H , показатель тектонической составляющей начальных напряжений λ и ширина уступа Y .

Была установлена зависимость (рис.6) максимальных значений σ_{mo} от произведения указанных факторов ($\lambda \cdot H \cdot Y$) со значимым коэффициентом корреляции $R=0,96$:

$$\sigma_{mo} = 1,2132 (\lambda \cdot H \cdot Y / 1000)^{0,6697}.$$

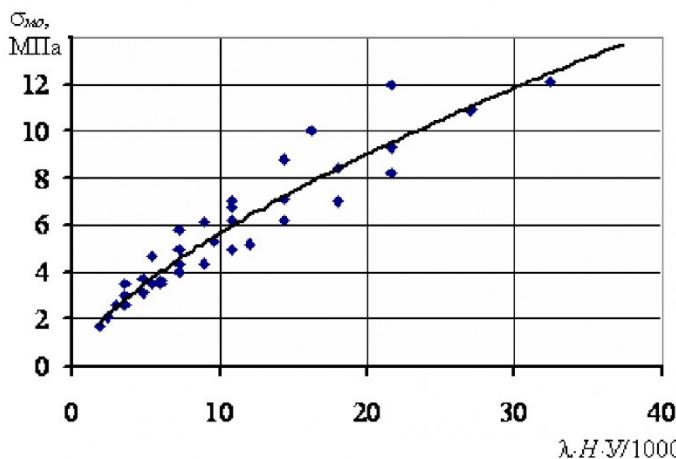


Рис.6. Изменение максимальных значений σ_{mo} на верхней границе уступа

Стадии разрушения уступа в результате развития трещин показаны на рис.5б.

Проведенные численные эксперименты напряженного состояния нависающего уступа

и анализ их результатов позволили сделать следующие основные выводы:

– напряженное состояние рудного массива в окрестности нависающего уступа характери-

зуется возникновением двух зон с растягивающими напряжениями: в верхней части уступа на почве вышеотработанного блока и в боковой части уступа на границе с обрушенной рудой в блоке;

– устойчивость нависающего уступа определяется напряженным состоянием его верхней части, в которой возникают горизонтальные растягивающие напряжения;

– максимальные значения критерия Мора в верхней части уступа не зависят от высоты обрушения и определяются параболической зависимостью от произведения коэффициента бокового распора, глубины разработки и нависания уступа в степени 2/3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курленя М.В. Техногенные геомеханические поля напряжений/ М.В.Курленя, В.М.Серяков, А.А.Еременко.– Новосибирск: Наука,2005.–264с.
2. Ермакова И.А. Параметры потока руды, изменяющего направление движения при выпуске, и их учет для совершенствования систем разработки рудных месторождений// Горн. инф.-анал. бюл.– 2001.– №12.– С. 40–44.
3. Рыжков Ю.А. Вариант системы с подэтажной отбойкой и этажным выпуском руды при отработке мощных крутопадающих рудных тел с образованием разделительных целиков/ Ю.А.Рыжков, И.А.Ермакова// Горн. инф.-анал. бюл.– 2001.– №11.– С.94–97.
4. Соколовский В.В. Статика сыпучей среды.– М.: Гос. изд-во физ.-мат. литературы, 1960.– 243 с.
5. Рыжков Ю.А. О выборе рациональной формы линии очистного забоя при системах подэтажного обрушения с послойной отбойкой руды/ Ю.А.Рыжков, И.А. Ермакова// ФТПРПИ. – 2002.– № 6. С.80–84.

□ Автор статьи:

Ермакова
Инна Алексеевна
- канд. техн. наук, доц. каф.
прикладной математики

УДК 622.831

Е. А. Белоусов

РАЗРАБОТКА И ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБОВ ПРОВЕДЕНИЯ И КРЕПЛЕНИЯ КАПИТАЛЬНЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК В УСЛОВИЯХ УДАРОПАСНОСТИ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД

Железорудные месторождения Горной Шории разрабатываются на больших глубинах в условиях действия высоких тектонических напряжений и нарушенности массива горных пород. Руды и породы прочные, хрупко разрушаются под на-

грузкой, способны накапливать значительную упругую энергию деформаций; около 90% пород ударопасны. При этом развитие горных работ связано с ростом объемов проведения капитальных выработок, расположенных в лежачем боку место-

рождения, которые имеют большой удельный вес, и их длина на отдельных рудниках изменяется от сотен до тысяч метров.

До настоящего времени устойчивость горных выработок в большинстве случаев обеспечи-