

УДК 622.831; 622.834

**ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ И СПОСОБА
СОЗДАНИЯ ДЕМПФЕРНОГО СЛОЯ В ОКРЕСТНОСТИ ВЫРАБОТКИ
ДЛЯ СНИЖЕНИЯ УРОВНЯ ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ**

А. А. Еременко, В. М. Серяков, Л. Н. Гахова

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: eremenko@ngs.ru,
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Приведены результаты оценки напряженно-деформированного состояния массива горных пород в окрестности выработки в неустойчивом массиве. Для снижения интенсивности горного давления обоснована необходимость создания демпферного слоя и определены параметры буровзрывных работ для его образования. Установлены зоны возможного разрушения массива взрывом камуфлетных зарядов ВВ.

Напряжения, деформации, массив горных пород, выработка, динамические явления, взрыв

Разработка месторождений полезных ископаемых приводит к активизации опасных деформационных процессов в массиве горных пород. В результате реакции породного массива на техногенное воздействие возникают динамические явления, которые приводят к авариям и значительному экономическому ущербу. Все это в полной мере отмечается на Орловском железорудном месторождении (Жезкентский ГОК). Руды месторождения способны накапливать упругую энергию с последующими ее проявлениями в виде шелушения, стреляния и интенсивного заколообразования [1]. В районе контакта рудного тела и неустойчивых вмещающих горных пород часто наблюдаются вывалы пород и нарушения крепей.

Одним из способов снижения уровня напряжений и деформаций в крепи и в окрестности выработок может быть создание в ее кровле демпферного слоя (слоя разрушенных пород). Представлены исследования, направленные на оценку напряженно-деформированного состояния (НДС) массива горных пород в районе бортов и кровли горных выработок при создании демпферного слоя.

**НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД
В ОКРЕСТНОСТИ ВЫРАБОТКИ ПРИ СОЗДАНИИ ДЕМПФЕРНОГО СЛОЯ**

Моделирование напряженно-деформированного состояния приведено для условий проходки южного полевого штрека на горизонте 13 м. Массив горных пород здесь сложен порфиритами с коэффициентом крепости по Протодьяконову 12; категория устойчивости 2–3. Напряжения определены в окрестности одиночной выработки размером 4×4 м при создании и без создания раздробленных зон (демпферных слоев высотой 1 м) [2].

Предполагалось, что исходное напряженное состояние нетронутого массива гидростатическое — $\sigma_y^\infty = -\gamma H^0$, $\sigma_x^\infty = -\gamma H^0$, где σ_y^∞ , σ_x^∞ — соответственно вертикальная и горизонтальная компоненты напряжений, γ — объемный вес пород, H^0 — глубина расположения выработки. Физико-механические свойства пород приняты в соответствии с данными, полученными по испытаниям образцов из керна геологоразведочных скважин: коэффициент Пуассона $\mu = 0.21$, объемный вес пород $\gamma = 0.028$ МН/м³, модуль упругости $E = 7.5 \cdot 10^4$ МПа, предел прочности на сжатие $\sigma_{сж} = 96$ МПа, предел прочности на растяжение $\sigma_p = 9.6$ МПа, сцепление $C = 27$ МПа, угол внутреннего трения $\varphi = 34^\circ$. Породы относятся к слабоустойчивым с коэффициентом структурного ослабления $k = 0.1 \div 0.4$ [1].

Для рассмотренной глубины расположения выработки $H^0 = 700$ м $\sigma_y^\infty = \sigma_x^\infty = -19.6$ МПа. Предположено, что кровля области демпферного слоя свободна от напряжений, на его основание и боковую поверхность действуют усилия, пропорциональные соответствующему весу разрыхленной породы.

Для анализа геомеханической ситуации вблизи выработки применялся подход, основанный на комплексном использовании численных расчетов и результатов натурных наблюдений. Результаты расчетов представлены в виде изолиний компонентов тензора напряжений (σ_x , σ_y) и напряжений σ_s , сравниваемых со сцеплением массива и позволяющих воспользоваться критерием Кулона – Мора [3].

Визуальные наблюдения за состоянием контура выработки показали, что при “закрепленной” кровле выработки в бортах наблюдаются обрушения горных пород. По результатам расчетов вертикальные сжимающие напряжения в бортах выработки $\sigma_y = -18$ МПа. Если принять условие, что разрушение происходит за счет сжатия, то должно выполняться следующее неравенство: $\sigma_{сж} k < 18$ МПа. Отсюда при $\sigma_{сж} = 96$ МПа $k < 0.18$. С учетом такого значения коэффициента структурного ослабления сцепление реального массива $C^M \approx 3 \div 4$, что позволяет в качестве критического принять значение $\sigma_s^k = 3$ МПа.

Напряженное состояние в окрестности одиночной выработки (рис. 1) характеризуется появлением в бортах и кровле области неупругих деформаций на глубине около 50–60 см (рис. 1в), в которых $\sigma_s > 3$ МПа.

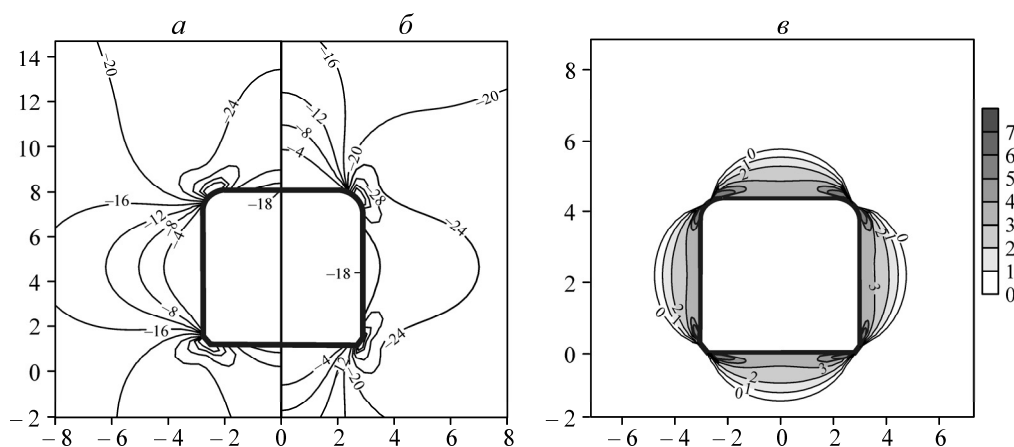


Рис. 1. Напряженное состояние в окрестности одиночной протяженной выработки: а — горизонтальные напряжения; б — вертикальные; в — сдвигающие

При размещении над выработкой на расстоянии 6 м от ее кровли области разрыхления шириной 6 м (рис. 2) вертикальные сжимающие напряжения в бортах выработки $\sigma_y \approx -9$ МПа, что вдвое меньше их значений в борту выработки, показанной на рис. 1б. Неупругие деформации формируются только в нижнем плинтусе борта выработки (рис. 2в).

В то же время в кровле значительно возрастают сжимающие горизонтальные напряжения σ_x (до 30 МПа на контуре выработки, рис. 2а), а область неупругих деформаций распространяется на глубину до 2 м (рис. 2в), что может потребовать дополнительного крепления кровли выработки.

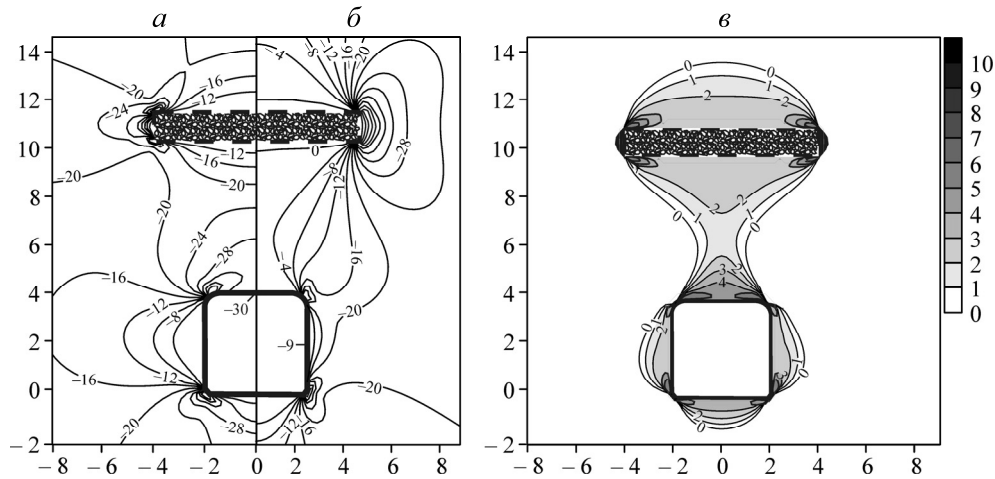


Рис. 2. Напряженное состояние в окрестности одиночной выработки при формировании на удалении 6 м от нее области разрыхленных пород высотой 1 м, протяженностью по горизонтали 8 м: а — горизонтальные напряжения; б — вертикальные; в — сдвигающие

Увеличение ширины области разрыхления над выработкой (рис. 3) не изменяет ситуацию: борт разгружается от напряжений σ_y , а в кровле происходит еще бóльший рост сжимающих напряжений σ_x . Удаление области разрыхления от кровли выработки на 8 м и более (рис. 4) приводит к напряженному состоянию в ее окрестности, близкому к состоянию выработки без размещений над ее кровлей области разрыхления.

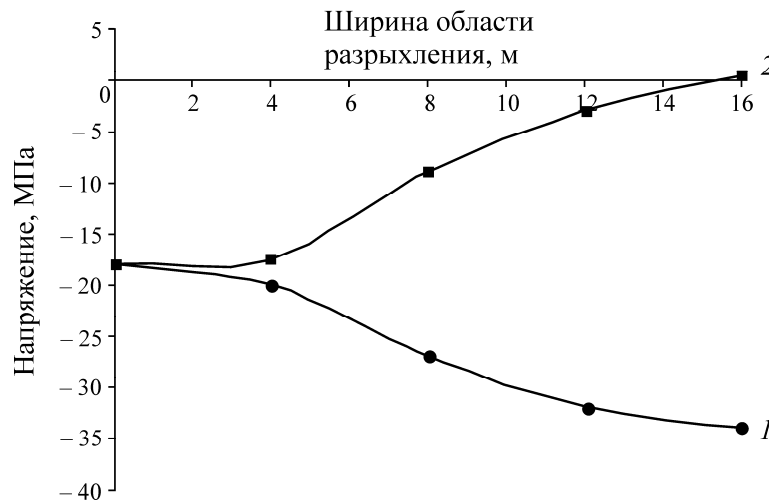


Рис. 3. Изменение напряженного состояния в окрестности выработки с увеличением ширины области разрыхления, формируемой на удалении 6 м от кровли выработки: 1 — горизонтальные напряжения в кровле выработки; 2 — вертикальные напряжения в борту выработки

Наиболее благоприятная геомеханическая ситуация в приконтурной части выработки наблюдается при создании области разрыхления дугообразной формы (рис. 5). В этом случае в бортах выработки вертикальные сжимающие напряжения не превышают 7 МПа (рис. 5б); в то же время в кровле выработки принципиальных изменений по сравнению с первым вариантом не происходит: сжимающие горизонтальные напряжения не превосходят 19 МПа (рис. 5а). Одна область неупругих деформаций формируется в нижнем плинтусе борта выработки, а другая в кровле на удалении не более 50–60 см. Увеличение протяженности дугообразной области разрыхления не приводит к существенному изменению напряженного состояния в окрестности выработки.

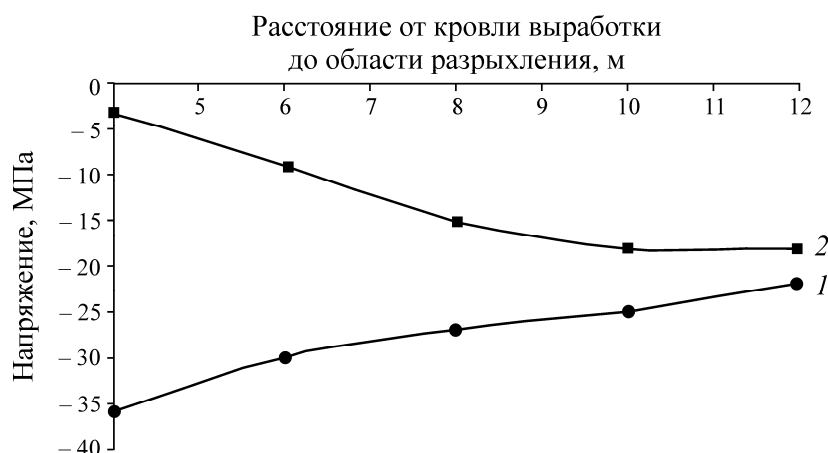


Рис. 4. Изменение напряженного состояния в окрестности выработки с удалением области разрыхления от кровли: 1 — горизонтальные напряжения в кровле выработки; 2 — вертикальные напряжения в борту выработки

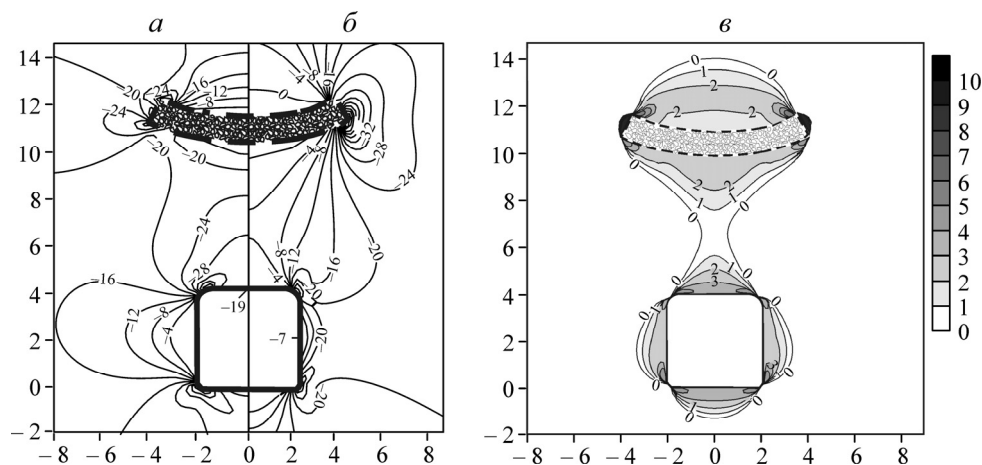


Рис. 5. Напряженное состояние в окрестности одиночной выработки при сформированной на удалении 6 м от ее кровли области разрыхления дугообразной формы протяженностью 8 м, высотой 1 м ($\lambda = 1$): а — горизонтальные напряжения; б — вертикальные; в — сдвигающие (сравниваемые со сцеплением C)

Дополнительное создание областей разрыхления на удалении 4 м от бортов выработки ухудшает ее состояние: сжимающие вертикальные напряжения в бортах достигают 19 МПа, область неупругих деформаций охватывает весь борт выработки. Таким образом, для повышения устойчивости бортов выработки целесообразно создать область разрыхления (демпферный слой) дугообразной формы в ее кровле на расстоянии около 6 м.

**ОЦЕНКА ЗОН РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ СОЗДАНИИ ДЕМПФЕРНОГО СЛОЯ
ВЗРЫВОМ КАМУФЛЕТНЫХ СКВАЖИННЫХ ЗАРЯДОВ ВВ**

Радиус зоны регулируемого дробления ϵ_o определялся на основе теории применения промышленных ВВ [4]:

$$\epsilon_o = 0.5d_3 \sqrt{\frac{P_0}{\sigma_p}} \text{ м,}$$

где P_0 — давление газов взрыва заряда ВВ в скважине; d_3 — диаметр заряда ВВ; σ_p — предел прочности пород на растяжение.

Это соотношение имеет место при взрыве ВВ в непрерывной однородной изотропной среде. В реальном трещиноватом массиве значение ϵ_o меньше рассчитанного на 10–20 %. В рассматриваемом случае взрыва гранулита в горной породе III категории трещиноватости ϵ_o^{pn} меньше ϵ_o на 15 %, т. е. $\epsilon_o^{pn} = 0.85\epsilon_o$. При наличии дополнительных обнажений линия наименьшего сопротивления определяется формулой $W_{кр} = \sqrt{2}\epsilon_o^{pn}$.

Ширина зоны разрушения (трещинообразования) горной породы, образованная взрывом ряда зарядов сторону следующего ряда зарядов, составляет $\epsilon_o^{pn} = 0.51$. С учетом влияния дополнительной поверхности обнажения возможная ширина зоны разрушения $\epsilon_p = 2\epsilon_o^{pn}$ (м).

Расчет параметров буровзрывных работ для образования направленных трещин в массиве горных пород выполнен для ВВ, состоящего из гранулита и аммонита 6ЖВ. Диаметр скважин 32 мм, веерных скважин — 64 мм.

Расстояние между скважинами при взрывании ВВ определялось по формуле

$$a = Kd(1 + 2^{1/2})\{2\nu P_o(V_3/V_c)X / [\sigma_p(1 - \nu)(1 + C)]\}^{1/m},$$

где K — коэффициент, учитывающий ориентацию естественных трещин в массиве горных пород относительно плоскости оконтуривания, равный 0.95–1.2; d — диаметр скважины, м; ν — коэффициент Пуассона, равный 0.26; P_o — детонационное давление в заряде ВВ, Па; V_3 — объем заряда ВВ в скважине, м³; V_c — объем скважины; X — показатель адиабаты, равный 1.17; σ_p — предел прочности горной породы на растяжение, равный $11 \cdot 10^6$ Па; C — безразмерная величина; m — степень затухания ударной волны в зоне разрушения [5].

Объем заряда гранулита в скважине находится из соотношения

$$V_3 = \pi d_3^2 / 4h, \quad V_{32} = 2V_3,$$

где d_3 — диаметр заряда; h — высота заряда.

Коэффициент заполнения скважины вычисляется по формуле

$$K_3 = V_3 / V_c.$$

Степень затухания ударной волны m в зоне разрушения: $m = 2 + \nu / (1 - \nu)$.

В зоне образования направленной трещины $n = 2 - \nu / (1 - \nu)$.

Детонационное давление (P_o , Па) зарядов ВВ определяется следующим образом:

$$P_o = 10\rho_{ВВ}D^2 / 4g,$$

где $\rho_{\text{ВВ}}$ — средняя плотность заряда ВВ в скважине, равная 1000 кг/м^3 для аммонита 6ЖВ; D — скорость детонации, равная 4000 м/с для аммонита 6ЖВ; 10 — переводной коэффициент в систему СИ; g — ускорение свободного падения, 9.8 м/с^2 ;

$$C = \rho_{\text{ВВ}} D / \gamma C_n,$$

где γ — плотность горной породы, кг/м^3 ; C_n — скорость продольной волны в горной породе, м/с .

Определенное по этим соотношениям расстояние между скважинами при взрывании в них гранулита составило 1 м. Разработаны схемы расположения и взрывания камуфлетных зарядов ВВ при образовании демпферного слоя в окрестности выработки. В качестве ВВ используется гранулит и аммонит 6ЖВ. Длина патрона аммонита 6ЖВ составляет 200 мм, диаметр 32 мм; масса заряда ВВ — 200 г. В каждую скважину помещается по два патрона аммонита 6ЖВ.

Вместимость гранулита на 1 м скважины (P , кг/м) рассчитывалась так [6]:

$$P = 785 d_{\text{скв}}^2 \delta,$$

где δ — плотность заряжания, г/см^3 .

Например, для скважины длиной 8.5 м и недозарядом 1.5 м масса заряда ВВ составила 4.55 кг, а с учетом установки двух патронов аммонита 6ЖВ — 4.95 кг (таблица).

При ширине и высоте демпферного слоя соответственно 8 и 1.0–1.5 м с расположением камуфлетных скважинных зарядов ВВ по сетке 1×1 м на расстоянии 6 м и более от кровли выработки суммарная длина скважин в одном веере составляет 64.3 м; масса гранулита и аммонита 6ЖВ — соответственно 32.2 и 3.2 кг (рис. 6). Масса их ВВ при взрывании 10 вееров равна 308 и 32 кг (таблица).

Параметры буровзрывных работ

Номер скважины	Угол наклона скважины, град	Длина скважины, м	Недозаряд, м	Масса ВВ, кг	
				гранулит	аммонит 6ЖВ
Диаметр скважин 0.064 м (сетка 1.0×1.0 м)					
Веер № 1					
1	70	8.5	7.0	4.55	0.4
2	75	7.5	6.3	4.2	0.4
3	80	7.1	6.0	3.85	0.4
4	87	7.0	6.0	3.5	0.4
5	87	7.0	6.0	3.5	0.4
6	80	7.1	6.0	3.85	0.4
7	75	7.5	6.3	4.2	0.4
8	70	8.5	7.0	4.55	0.4
Итого	—	60.2	50.6	32.2	3.2
Веера № 2 – 10 идентичные					
	—	541.8	455.4	277.2	28.8
Всего	—	602	506	308	32

Конструкция заряда ВВ представлена на рис. 7. Скважины в веере взрываются мгновенно, а веера № 1 – 4 взрываются с замедлением 0 мс; № 5 – 7 — 20 мс; № 8 – 10 — 40 мс.

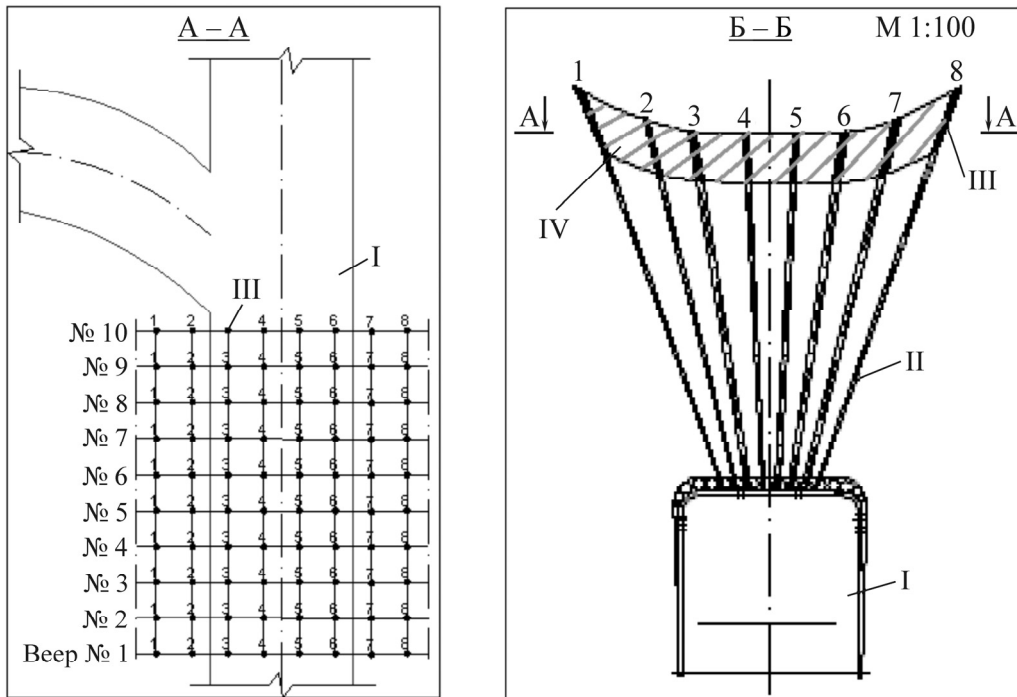


Рис. 6. Схема расположения (1–8) веерных скважин в массиве горных пород: I — штрек; II — скважина; III — заряд ВВ; IV — демпферный слой

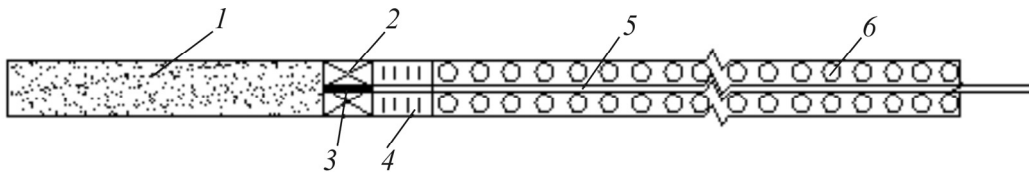


Рис. 7. Конструкция заряда ВВ: 1 — гранулит; 2 — аммонит 6ЖВ; 3 — электродетонатор; 4 — гидropаста; 5 — провод; 6 — забойка

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВЗРЫВА СКВАЖИННЫХ ЗАРЯДОВ ВВ НА СОСТОЯНИЕ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД В КРОВЛЕ ВЫРАБОТКИ

Образование демпферного слоя в кровле выработки можно осуществить путем взрывания веерных скважин. Суммарная масса ВВ во всех скважинах превышает 300 кг. Взрыв такого количества вещества может привести к разрушению массива в районе формирования демпферного слоя и нарушению устойчивого состояния породного массива в кровле выработки. При оценке степени влияния взрыва камуфлетных веерных зарядов ВВ на напряженное состояние массива в окрестности выработки предполагались выполненными условия плоской деформации. Исходное напряженное состояние принято гидростатическим.

На рис. 8 показано распределение полей напряжений в окрестности выработки до начала процесса формирования демпферного слоя. Приведены изолинии главных σ_1 , σ_2 и максимальных касательных напряжений τ_{\max} . Размеры выработки 4×4 м. Характер изменения напряжений соответствует установленным ранее закономерностям: концентрация сжимающих и касательных напряжений в зонах опорного давления; разгрузка массива в кровле и почве выработки. В кровле и частично в почве выработки формируются области растяжения (напряжение

σ_1), значения растягивающих напряжений не превышают 2 МПа. Если сравнить рассчитанные напряжения с пределами прочности массива: $\sigma_p = 9.6$ МПа, $\sigma_{сж} = 96$ МПа, то можно сделать вывод, что их значения в окрестности выработки не достигают предельных.

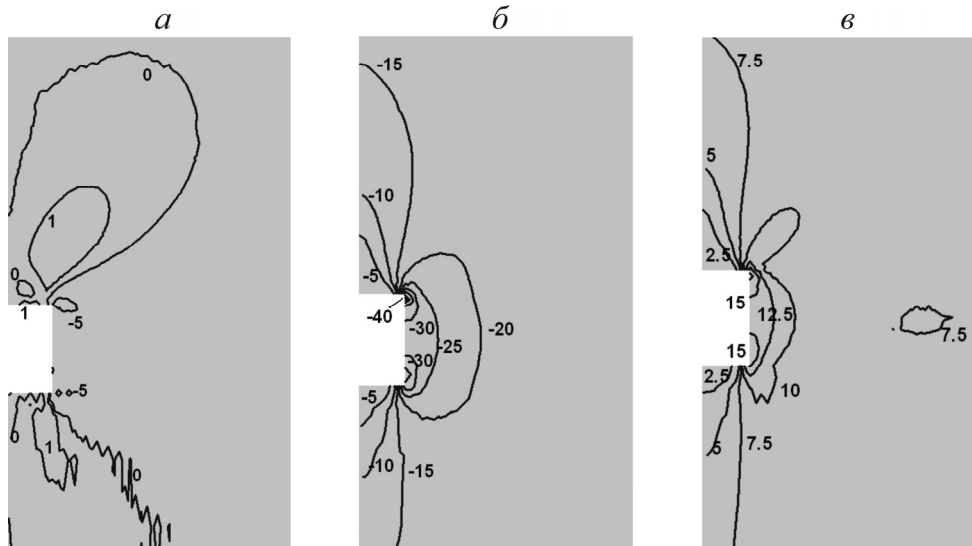


Рис. 8. Главные σ_1 (а), σ_2 (б) и максимальные касательные напряжения τ_{\max} (в) в окрестности выработки до формирования демпферного слоя

Действие взрыва на окружающий породный массив моделируется статическим давлением продуктов детонации на границу образованного демпферного слоя. Демпферный слой располагается на расстоянии 6 м от кровли выработки. Его высота 1 м, ширина 8 м. Статическое давление рассчитывалось следующим образом: максимальное давление при взрывании гранулита — $30 \cdot 10^8$ Па, или 3000 МПа; отношение площади всех скважин к площади формируемого демпферного слоя 0.005. Тогда осредненное давление продуктов детонации на границе демпферного слоя может быть принято равным $P_0 \approx 3000 \text{ МПа} \cdot 0.005 = 15 \text{ МПа}$.

На рис. 9 приведены те же характеристики напряженного состояния среды (σ_1 , σ_2 и τ_{\max}) при задании на границах демпферного слоя статического давления $P = 15$ МПа. Наиболее сильно изменяется распределение напряжений в кровле выработки. Увеличение растягивающих напряжений σ_1 происходит в краевых частях демпферного слоя (до 5 МПа). Существенного увеличения сжимающих σ_2 и максимальных касательных напряжений в кровле не отмечено: здесь σ_2 увеличивается до 15 МПа, τ_{\max} — до 10 МПа. Полученные значения σ_1 , σ_2 и τ_{\max} также не достигают пределов прочности породного массива.

Принятое значение давления на границы демпферного слоя является достаточно приближенным, поэтому представляется обоснованным рассмотреть напряженное состояние массива при более высоких значениях P_0 . На рис. 10 такое состояние показано для $P_0 = 30$ МПа. Динамика изменения полей напряжений прежняя: в краевых частях демпферного слоя происходит рост растягивающих напряжений (σ_1). Их значения превышают предел прочности на растяжение (больше 10 МПа). В области между демпферным слоем и кровлей выработки наблюдается рост и других напряжений (σ_2 и τ_{\max}). Однако их значения намного меньше соответствующих пределов прочности массива.

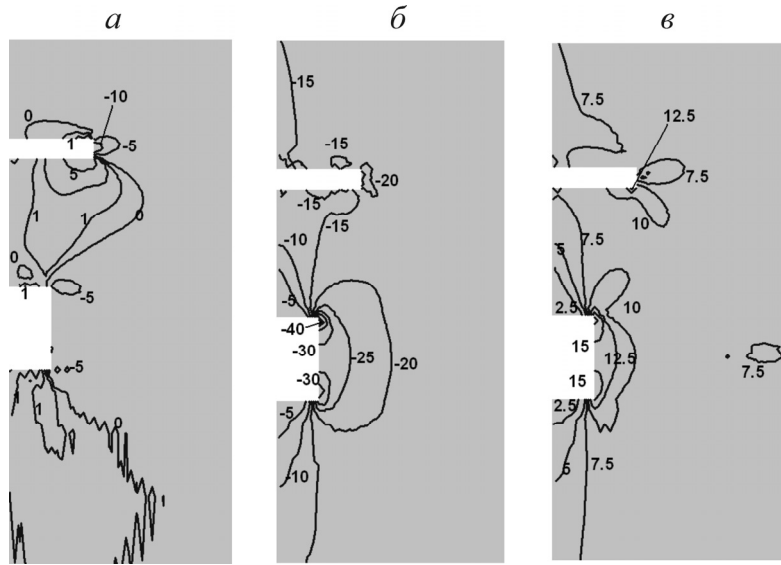


Рис. 9. Характер распределения главных σ_1 (а), σ_2 (б) и максимальных касательных напряжений τ_{\max} (в) при давлении продуктов детонации на границы демпферного слоя $P_0 = 15$ МПа

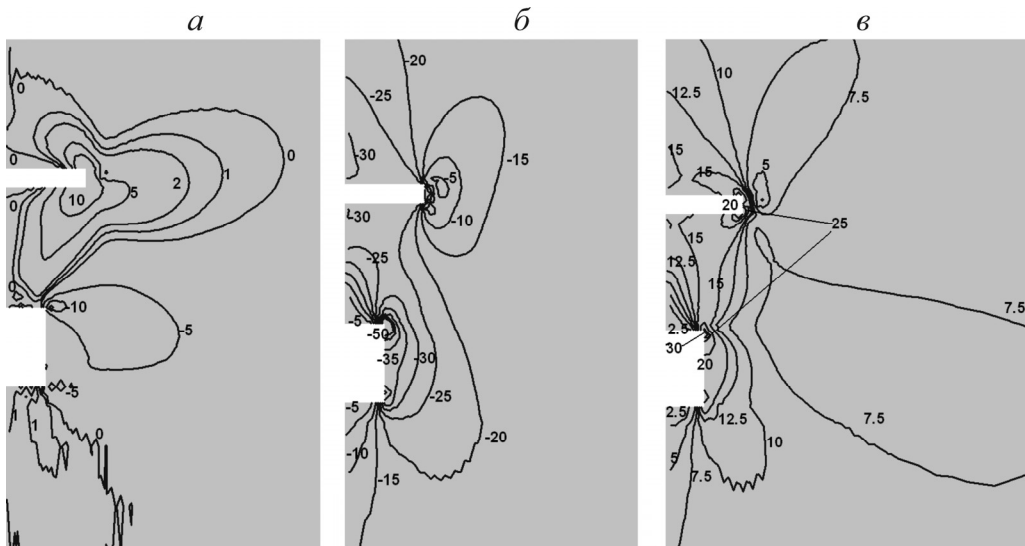


Рис. 10. Распределение главных σ_1 (а), σ_2 (б) и максимальных касательных напряжений τ_{\max} (в) в окрестности выработки при давлении продуктов детонации на границы демпферного слоя $P_0 = 30$ МПа

Зона действия предельных растягивающих напряжений σ_1 по размерам невелика, и разрушение породного массива здесь не окажет влияния на напряженное состояние пород в кровле выработки. Вместе с тем из приведенных расчетов можно сделать вывод о том, что разрушение массива, расположенного в кровле выработки, при формировании демпферного слоя будет происходить в краевых частях слоя за счет действия растягивающих напряжений.

Таким образом, на основании выполненной оценки характера распределения напряжений в районе расположения выработки при формировании демпферного слоя в ее кровле можно утверждать, что сжимающие и максимальные касательные напряжения не достигают предельных

значений; растягивающие напряжения могут превышать предел прочности на растяжение в краевых частях демпферного слоя, однако размеры этих областей незначительны и не оказывают влияния на устойчивость пород в кровле выработки при одновременном взрывании камуфлетных зарядов ВВ во всех веерах.

ВЫВОДЫ

Расчеты напряженно-деформированного состояния выработки без демпферного слоя, с демпферным слоем прямоугольной и дугообразной формы различной длины и расположением в кровле выработки, а также разрыхленных областей на удалении от бортов выработки и ослабленного массива вокруг выработки на глубину 2 м и более показали, что устойчивости бортов и кровли выработки можно достичь путем создания разрыхленного демпферного слоя дугообразной формы со стороны кровли выработки.

Разработана методика для проведения экспериментальных исследований по созданию демпферного слоя в окрестности горной выработки, включающая оценку разрушения горных пород взрывом, расчет параметров буровзрывных работ для образования направленных трещин в массиве горных пород, схемы расположения и взрывания камуфлетных зарядов ВВ и оценку состояния контура выработки до и после оформления демпферного слоя.

Теоретически показано, что создание демпферного слоя взрывом скважинных зарядов в кровле выработки на расстоянии 6 м не приведет к ухудшению устойчивости пород в ее окрестности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Технологический регламент** для разработки проекта “Вскрытие и обработка нижних горизонтов Орловского месторождения” / горная часть / ДГП “ВНИИцветмет”, утв. зам. ген. дир. ОАО “Жезкентский ГОК”, 02.07.01. — Усть-Каменогорск, 2001.
2. **Gakhova L. N.** Solving problems of stressed states of a mass having block structure, *Geocology and Computers*, Moscow: Balkema, 2000.
3. **Курленя М. В., Барышников В. Д., Гахова Л. Н.** Развитие экспериментально-аналитического метода оценки устойчивости горных выработок // ФТПРПИ. — 2012. — № 4.
4. **Клюков Г. М., Глазков Ю. В.** Феноменологическая квазистатическо-волновая теория деформирования и разрушения материалов взрывом зарядов промышленных ВВ. — М.: МГГУ, 2003. — № 11.
5. **Докучаев М. М., Галимуллина А. Т., Турута Н. У.** Взрывание наклонными скважинными зарядами. — М.: Недра, 1971.
6. **Руководство** по проектированию, организации и проведению массовых взрывов на подземных рудниках филиалов Евразруды / ОАО “ВостНИГРИ” – ОАО “Евразруда”. — Новокузнецк, 2008.
7. **Курленя М. В., Серяков В. М., Еременко А. А.** Техногенные геомеханические поля напряжений. — Новосибирск: Наука, 2005.

Поступила в редакцию 9/VI 2014