

УДК 622.28, 622.831

С.А. Неверов, А.А. Неверов, А.П. Тапсиев, А.М. Фрейдин

ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ГОРНЫХ РАБОТ В ГРАВИТАЦИОННОМ ПОЛЕ ЗЕМЛИ С УЧЕТОМ СИСТЕМЫ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ НАРУШЕНИЙ

Настоящая работа посвящена проблемам разработки мощных пологопадающих залежей, расположенных в блочных массивах горных пород, комбинированными геотехнологиями¹.

Определение напряженно-деформированного состояния (НДС) массива пород осуществлялось применительно к 2-м вариантам развития фронтов горных работ по следующим системам разработки: подэтажного (этажного) обрушения (рис. 1 а); комбинированной технологии с обрушением и закладкой (рис. 1 б).

Постановка задачи и исходные данные

Для геомеханической оценки вариантов развития горных работ было использовано численное моделирование НДС массива пород методом конечных элементов (МКЭ) [1]. Расчеты выполнялись для начального и максимального развития фронтов отработки очистного участка.

Характерной особенностью некоторых горизонтальных и пологопадающих месторождений является то, что оруденение их формируется в условиях сбросового напряженного состояния (режим растяжения) типичного для пород всех нетектонических отложений [2-3]. Последнее позволяет отнести, определенную их часть, к нетектонически активным участкам недр, в которых вертикальная составляющая поля напряжений определяется объемным весом (силой тяжести) вышележащей толщи пород и является макси-

мальным давлением, действующим в массиве. При этом горизонтальные напряжения определяются коэффициентом бокового распора.

В качестве основного подхода к определению НДС массива пород в условиях блочного строения месторождения была принята модель с использованием контакт-элементов.

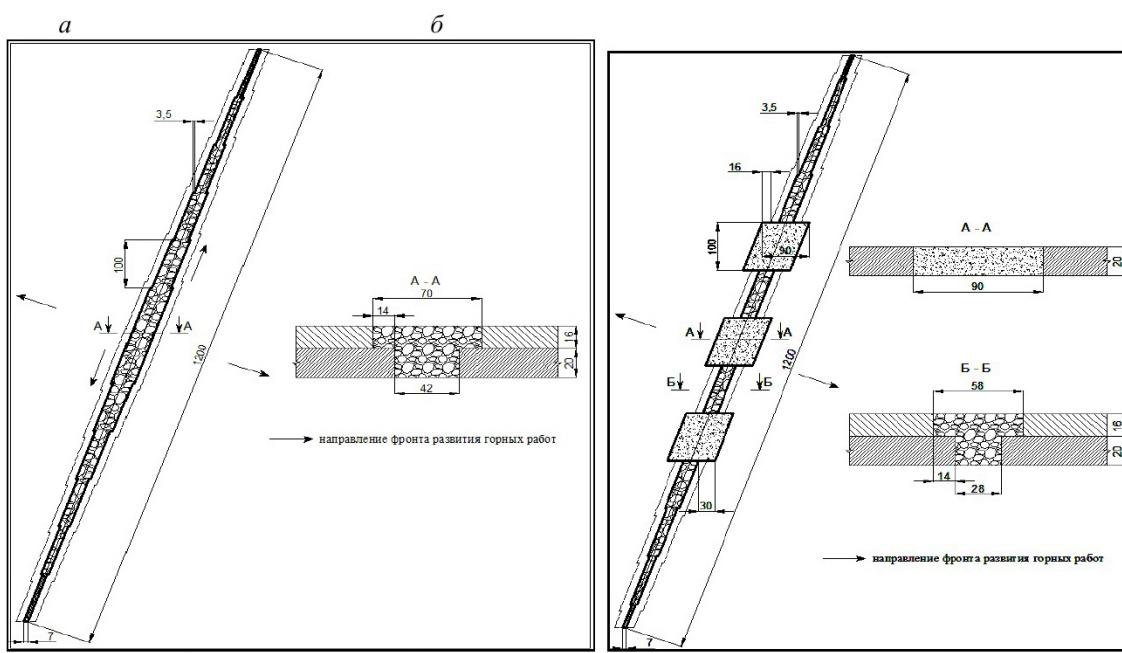
Рассматривалась задача контактного взаимодействия упругодеформированного массива с учетом трения в зоне контакта (т.е. на участке контактного взаимодействия геологических блоков принималось условие частичного проскальзывания [4-5] с коэффициентом трения $f = 0.5$).

На рис. 2 представлена геомеханическая модель. Пологая залежь находится на расчетной глубине $H = 1000$ м. Исходное напряженное состояние массива принято в соответствии с условиями сбросового режима (гипотезой Динника), характерного для большинства месторождений:

$$\sigma_y = \gamma g H, \quad \sigma_x = \sigma_z = q \sigma_y, \quad \tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{xz} = 0$$

где σ_y , σ_x , σ_z и τ_{xy} , τ_{xz} , τ_{yz} – соответственно вертикальная и горизонтальные нормальные и касательные напряжения; γ – плотность пород; g – ускорение свободного падения; $q = \mu / (1 - \mu)$ – коэффициент бокового распора; μ – коэффициент Пуассона.

Границы модели (рис. 2) выбраны по



¹ Рис. 1. Развитие фронтов горных работ на начальной стадии при: а — системе подэтажного обрушения; б — комбинированной геотехнологии с обрушением и закладкой

Таблица 1. Упругие свойства пород

Наименование	Плотность, кг/м ³	Коэффициент Пуассона	Модуль Юнга, МПа
Рудная залежь	3000	0.23	82000
Вмещающие породы	3000	0.25	80000
Породы крупных разломов	2500	0.35	10000
Твердеющая закладка	2000	0.35	3000
Обрушенные породы	2000	0.4	300

принципу Сен-Венана. Фронт очистных работ рассматривался без учета подготовительно-нарезных выработок. Краевые условия задачи приняты в соответствии с гравитационным типом геомеханических условий разработки и представляются как сжимающие усилия и ограничения нормальных перемещений на границах расчетной области: к верхней границе приложено внешнее давление (11,77 МПа) заменяющее вес столба массива пород высотой 400 м (расстояние от верхней границы модели до моделируемой горнотехнической ситуации составляет 600 м); на нижней границе полагались нулевыми вертикальная компонента вектора перемещений и касательные компоненты тензора напряжений; боковые границы закреплялись только в направлении нормали к ним – принимались нулевыми горизонтальная компонента вектора перемещений и касательные компоненты тензора напряжений. То есть при динниковской модели геосреды значения горизонтальных напряжений σ_x , σ_z в механическом смысле эквивалентны условию равенства нулю нормальных перемещений ($u_x = u_z = 0$) на вертикальных границах расчетной области. Вес пород в задачах учитывался объемной силой. Геологические нарушения моделировались с помощью контакт-элементов, введение которых учитывает (формально) граничные условия на разломах, позволяющих задать возможную подвижку по контакту.

В качестве основного условия поведения контактной поверхности была принята модель контакта без разделения. Здесь контактные поверхно-

сти сцепляются с разрешением проскальзывания до окончания анализа, если контакт был установлен. То есть данный вид контакта является линейным – не допускается любое разделение контактных поверхностей в направлении нормали (материалы склеены), однако разрешается небольшое относительное проскальзывание (срыва) одного тела относительно другого в зависимости от коэффициента трения.

Для проведения численных экспериментов использовалась объемная упругая модель. В табл. 1 приведены деформационные свойства моделируемых материалов. На границах контакта разнородных пород выполнялось условие жесткого сцепления. Крупные тектонические разломы шириной от 20 до 50 м имитировались вертикальными, заполненными материалом с пониженной жесткостью.

В численных расчетах большинства геомеханических задач полагается, что открытые обнажения и очистные выработки создаются «мгновенно». В нашем случае, принимая во внимание условия образования выработанного пространства размерами 600×1200 м при максимальном развитии фронта выемки системой подэтажного обрушения (наихудшая ситуация), а именно то, что участок отработки формируется на протяжении длительного периода и, учитывая наличия процессов релаксации напряжений для корректного решения моделировались обрушенные породы, обеспечивающие боковой подпор открытым обнажениям. Это позволяет получить хорошо согла-

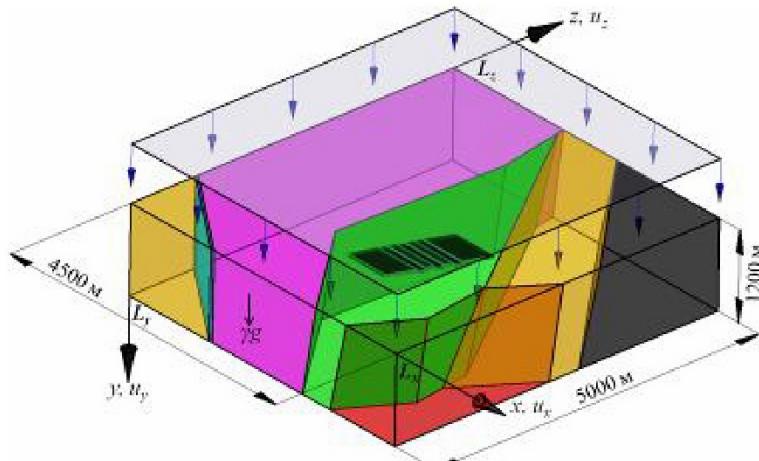


Рис. 2. Расчетная схема и основные параметры к определению НДС массива

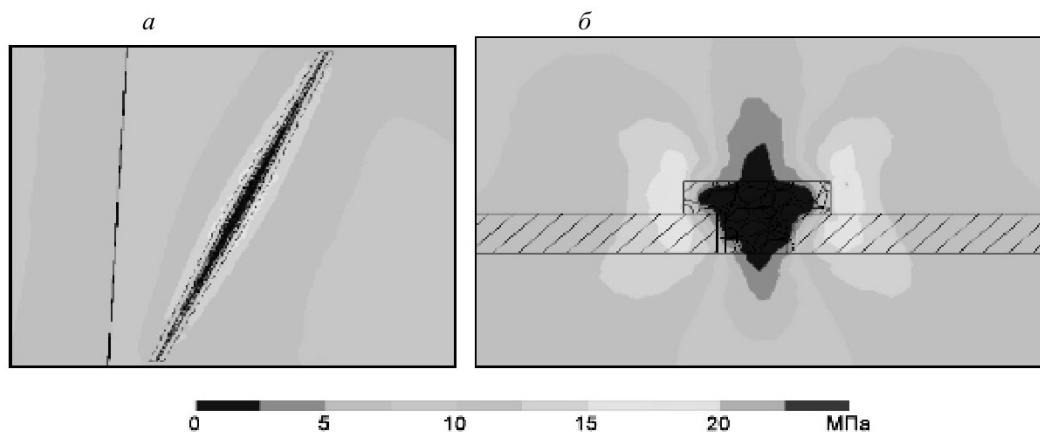


Рис. 3. Распределение напряжений τ_{\max} в плане по почве рудной залежи (а) и в вертикальном сечении по центральной части участка отработки на начальной стадии развития фронта горных работ системой подэтажного (этажного) обрушения

сующиеся с практикой работ распределения и значения напряжений вокруг обнажений при условии «не мгновенного» формирования значительной по размерам области отработки.

При установлении НДС массива пород в условиях развития фронта работ с использованием твердеющей закладки были приняты следующие допущения. В задачах предполагалось, что закладка несет определенную нагрузку и имеет сцепление с рудным телом и вмещающими породами. Последнее позволило принять ее низкомодульным упругим материалом (см. табл. 1), обеспечивающим сплошность очистного пространства с окружающим массивом. В первом приближении можно считать, что отсутствуют какие-либо разрывные смещения по контактам закладки и вмещаю-

щих пород.

Результаты исследований приводятся в виде картин изолиний компонент максимальных касательных усилий (τ_{\max}) с детальным анализом главных максимальных (σ_1) и минимальных (σ_3) напряжений для разрезов в соответствии с рис. 1.

Анализ результатов исследований

На рис. 3 показан характер распределения напряжений τ_{\max} в начальной стадии развития горных работ при использовании системы подэтажного (этажного) обрушения по почве залежи и в центральной части выемочного участка (по разрезу А-А см. на рис. 1а). Установлено, что зон с растягивающими усилиями на начальной стадии развития горных работ на уровне почвы залежи вблизи границы отработки не возникает ($\sigma_3 = 5$ кг/

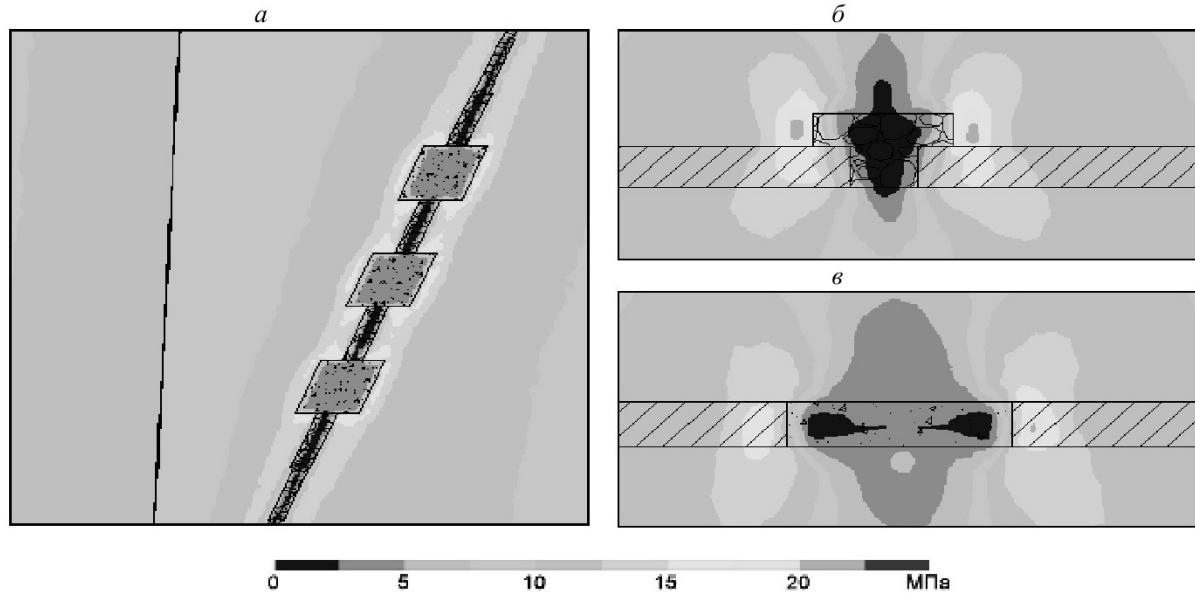


Рис. 4. Распределение τ_{\max} при развитии фронта выемки комбинированной технологией: а — в плане по почве залежи; б, в — соответственно, в вертикальном сечении по центру ленты отрабатываемой системой с обрушением и с твердеющей закладкой

Таблица 2.

Наименование анализируемого участка	Напряжения, МПа		
	σ_1	σ_3	τ_{\max}
<i>В сечении ленты отрабатываемой системой с обрушением (разрез Б-Б на рис. 1 б)</i>			
Кровля выработанного пространства	145	-240	1,542,5
Краевая часть зоны опережающего обрушения	50452	11413	20
Призабойная зона по рудной залежи	28433	34	13415
<i>В сечении ленты отрабатываемой системой с закладкой (разрез А-А на рис. 1 б)</i>			
Кровля пролета отработки	7410	14	3
Призабойная зона по рудной залежи	45450	10412	17420

МПа). Концентрация напряжений σ_1 отмечается в центральной части участка развития горных работ с постепенным незначительным снижением к флангам. При этом величины их изменяются в пределах 35438 МПа, что в сравнении с вертикальной составляющей исходного поля напряжений составляет $1.2 \div 1.3 \gamma H$. Относительно небольшая разница компонент σ_1 и σ_3 обуславливает формирование сравнительно невысокой концентрации τ_{\max} впереди фронта очистных работ (15 МПа).

Оценка НДС массива для вертикального сечения А-А на рис. 1 а показала, что в область незначительного растяжения ($\sigma_3 = 0$ 4-2 МПа) попадает кровля зоны обрушения налегающих пород. Однако абсолютные их значения не являются предельными. Наиболее высокий уровень сжимающих напряжений σ_1 (до 50 МПа) наблюдается вблизи боковых (вертикальных) границ опережающего обрушения рудной кровли, который в

1,341,5 раза больше, чем в призабойной зоне по рудному телу. В связи с чем, отчетливо прослеживается разгрузка части рудного массива надработанного опережающим обрушением пород кровли. Величины τ_{\max} в краевых частях зоны обрушения и области отработки (по рудному телу) не превышают соответственно 18 и 15 МПа (рис. 3 б), что позволяет оценить горную конструкцию на данном этапе, как достаточно устойчивую.

Таким образом, повышенная концентрация опорного давления на начальной стадии выемки при использовании системы подэтажного (этажного) обрушения формируется впереди фронта развития горных работ на уровне горизонта посадки налегающих пород кровли. Использование опережающего обрушения налегающей толщи позволяет существенно снизить нагрузки в призабойной области рудной залежи.

На рис. 4 приведены прогнозные карты распре-

а

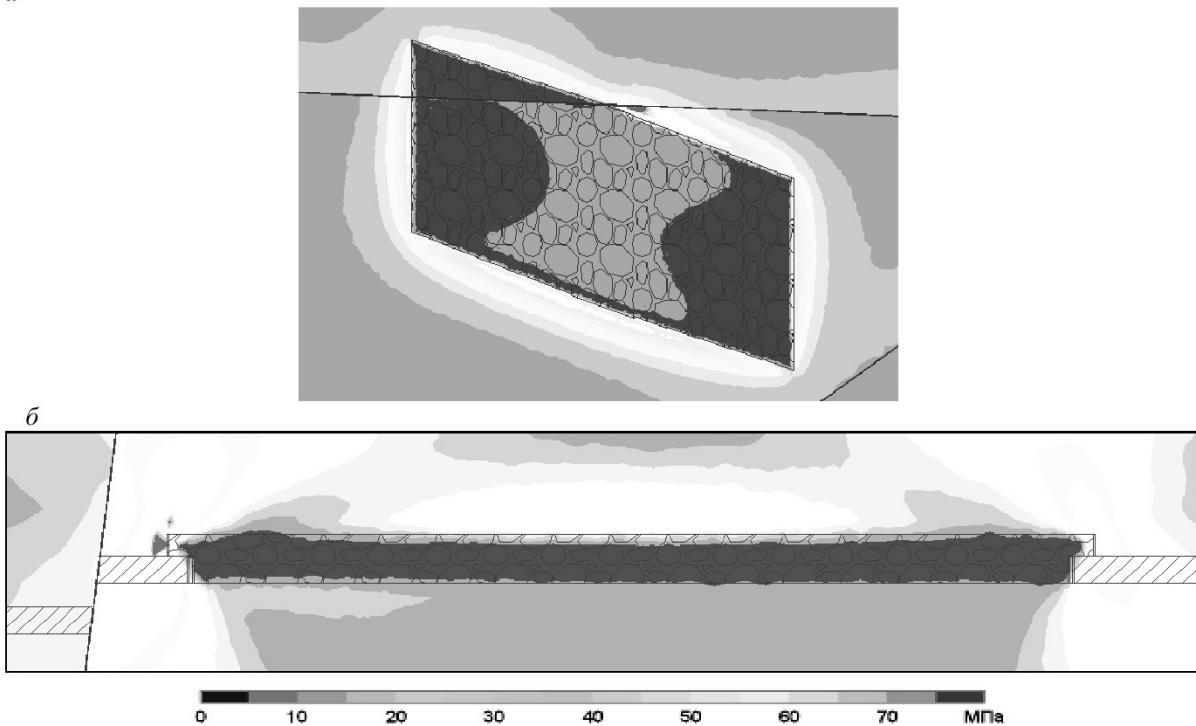


Рис. 5. Распределение напряжений τ_{\max} в плане по почве рудной залежи (а) и в вертикальном сечении по центральной части участка отработки при максимальном развитии фронта выемки системой подэтажного (этажного) обрушения

деления τ_{\max} на начальной стадии развития горных работ при комбинированной отработке системами с обрушением и закладкой (см. на рис. 1 б).

Исследованиями НДС массива пород установлено, что на уровне почвы залежи повышенные значения усилий σ_3 (до 12 МПа) характерны для призабойной части ленты, отрабатываемой технологией с твердеющей закладкой.

В аналогичной области для участка выемки системой с обрушением величина σ_3 составляет 6÷8 МПа. Зона максимальных сжимающих напряжений ($\sigma_1 = 45÷50$ МПа) формируется впереди фронта выемки (вблизи боковых границ) ленты с закладкой выработанного пространства, что в среднем на 25% больше, чем в призабойной части залежи отрабатываемой подэтажным (этажным) обрушением.

Последнее объясняется использованием при системе с обрушением опережающей посадки пород кровли на длину 14 м и высоту 2/3 мощности залежи, а также незначительным пролетом отработки по рудному телу (28 м), который в 3 раза меньше, чем пролет по ленте с закладкой (90 м). Фронт концентрации опорного давления σ_1 в направлении выемки захватывает область отработки, включающей 3-и ленты с твердеющей закладкой и 2-е с обрушением. То есть в призабойной зоне ленты отрабатываемой системой подэтажного обрушения вначале идет разгрузка, а затем на определенном расстоянии (по линии фронта выемки с

закладкой) прослеживается пригрузка, равная концентрации вблизи боковых границ участка с твердеющей закладкой. Подобная картина наблюдается и в распределении напряжений τ_{\max} (см. рис. 4).

В табл. 2 приведены значения действующих напряжений в характерных местах горнотехнической конструкции по разрезам А-А и Б-Б (см. на рис. 1 б).

Из табл. 2 следует, что областями повышенного горного давления в рассматриваемых сечениях горнотехнической конструкции являются краевая зона опережающего обрушения и призабойная часть ленты, вынимаемой с закладкой. Формирование в кровле выработанного пространства области растяжения свидетельствует о возможной потери устойчивости зависающих пород в местах с обрушением.

В аналогичной ситуации на участке, отрабатываемом с закладкой, зон с растягивающими усилиями в кровле пролета отработки не возникает. Как и в варианте развития фронта отработки подэтажной технологией, за счет опережающей посадки пород кровли, происходит разгрузка призабойной части ленты, вынимаемой системой с обрушением.

Геомеханическая ситуация, возникающая в условиях максимального развития фронта выемки при принятых вариантах отработки продемонстрирована на рис. 5-6.

Таблица 3. НДС массива для вариантов максимального развития фронта выемки

Наименование анализируемого участка	Напряжения, МПа					
	σ_1		σ_3		τ_{\max}	
	максимальное развитие фронта выемки при технологии					
	подэтажного (этажного) обрушения	комбинированной с обрушением и закладкой	подэтажного (этажного) обрушения	комбинированной с обрушением и закладкой	подэтажного (этажного) обрушения	комбинированной с обрушением и закладкой
<i>В вертикальном сечении</i>						
Кровля выработанного пространства (зоны обрушения)	15÷20	3÷6	до -40	-10	30	7
Кровля пролета отработки (над участком, заложенным твердеющей закладкой)	—	50	—	0÷2	—	25
Краевая часть зоны опережающего обрушения	200÷240	110÷130	50÷60	30	75÷90	40÷50
Призабойная зона по рудной залежи: система с обрушением система с закладкой	80÷95	60÷70 80÷95	12÷16	10÷15 22÷25	35÷40	25÷30 30÷35
<i>В плане по почве залежи в районе пересечения участком отработки тектонического нарушения</i>						
В лежачем боку тектонического нарушения	150÷200	80÷110	12÷15	10÷15	70÷93	35÷45
В висячем боку тектонического нарушения	50÷70	50÷55	16÷22	15÷17	20÷25	17÷20

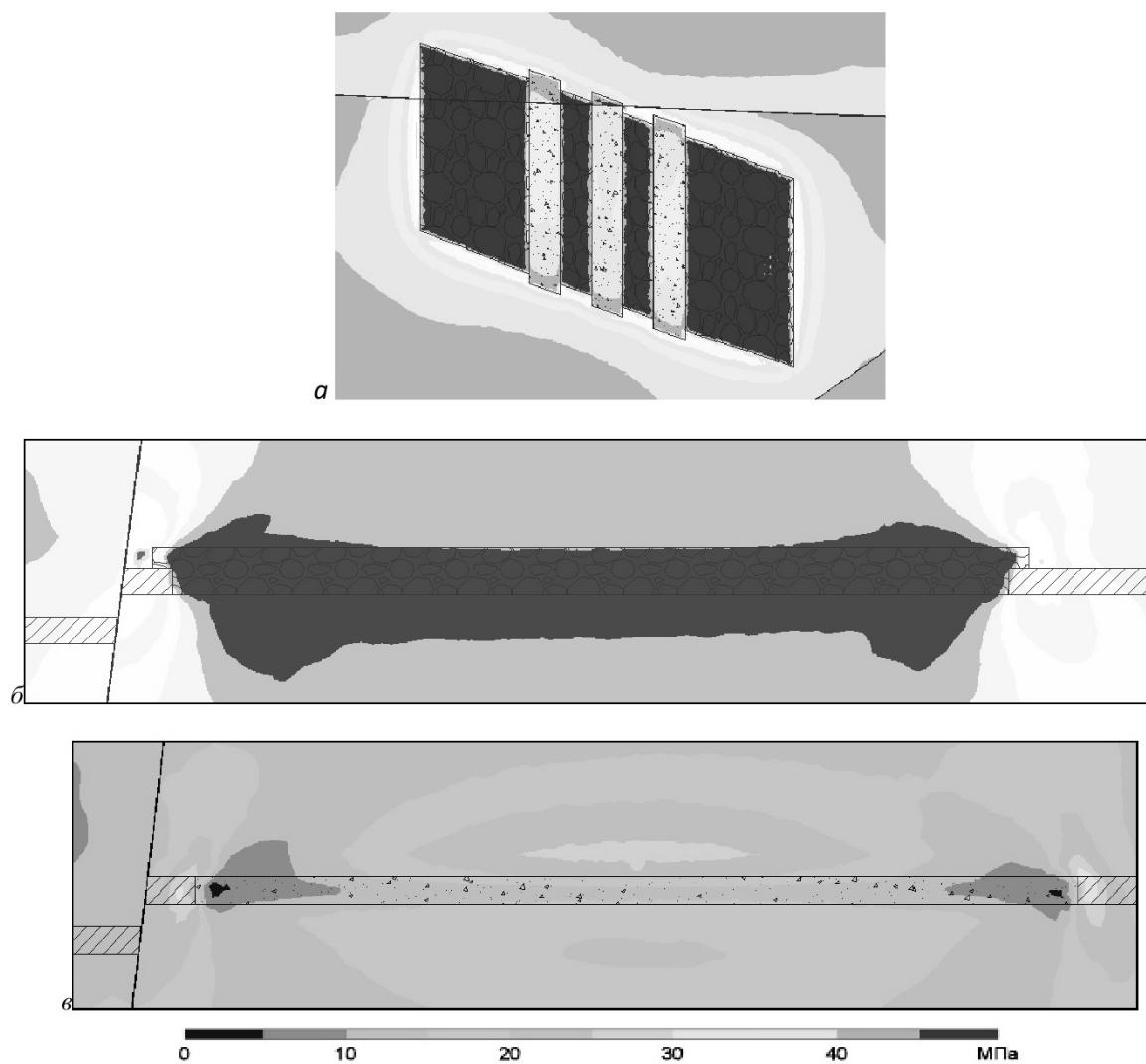


Рис. 6. Распределение напряжений τ_{\max} при максимальном развитии фронта горных работ комбинированной технологией: а — в плане по почве рудной залежи; б, в — соответственно, в вертикальном сечении по центру ленты отрабатываемой системой с обрушением и технологией с твердеющей закладкой

Анализ результатов моделирования для данной группы задач выполнен в сравнительном виде (табл. 3).

В варианте максимального развития фронта работ системой с обрушением оценка действующих напряжений в вертикальном сечении осуществлялась на границе 4-й и 5-й выемочных лент (см. план «с севера на юг» на рис. 1). В условиях комбинированной выемки — в центральной части лент, отрабатываемых соответственно с обрушением и с закладкой.

Из полученных данных (табл. 3) следует, что в наиболее сложных геомеханических условиях с учетом значений пределов прочности пород на сжатие, растяжение и сдвиг находятся горнотехническая конструкция при развитии фронта отработки подэтажной (этажной) выемкой, а именно краевая часть зоны опережающего обрушения ($\sigma_1 = 6,8 \div 8,1 \gamma H$, $\tau_{\max} = 2,6 \div 3,1 \gamma H$) и область лежачего

бока тектонического нарушения в районе его пересечения с участком разработки ($\sigma_1 = 5,1 \div 6,8 \gamma H$, $\tau_{\max} = 2,4 \div 3,2 \gamma H$).

Поэтому с приближением очистных работ к геологическому нарушению повышается вероятность динамических сдвигов по сбросу. За счет применения опережающего обрушения налегающих пород в призабойной зоне по рудной залежи концентрация максимальных напряжений не является критической ($\sigma_1 = 2,7 \div 3,2 \gamma H$, $\tau_{\max} = 1,2 \div 1,4 \gamma H$).

В аналогичных местах при развитии фронта горных работ комбинированной геотехнологии с обрушением и закладкой наблюдается падение напряжений. Существенное снижение компонент σ_1 и τ_{\max} (в среднем в 1,8 \div 2 раза) наблюдается вблизи боковых границ опережающего обрушения и на участке пересечения области выемки с текто-

ническим нарушением (в лежачим боку). Однако абсолютные их величины соизмеримы с прочностными характеристиками пород.

В призабойной зоне по рудной залежи на участках разрабатываемых системой с обрушением геомеханическая обстановка несколько улучшается ($\sigma_1 = 2,0 \div 2,4 \gamma H$, $\tau_{\max} = 0,85 \div 1,0 \gamma H$), и наоборот – ухудшается на участках отработки технологией с твердеющей закладкой ($\sigma_1 = 2,7 \div 3,2 \gamma H$, $\tau_{\max} = 1,2 \gamma H$).

Последнее идентично варианту развития фронта работ подэтажным обрушением, использующим опережающую посадку пород кровли.

Отдельно следует отметить уровень действующих напряжений в кровле выработанного пространства (пролета отработки).

Значительный рост растягивающей компоненты σ_3 (до -40 МПа), как по величине, так и по размерам охватываемой области, наблюдается в варианте развития фронта горных работ системой с обрушением.

При этом очевидным фактом является развитие процессов самообрушения пород с возможным выходом на дневную поверхность, что благоприятно с точки зрения снижения опорного давления на краевых участках. Аналогично в условиях комбинированной технологии степень влияния растягивающих усилий в налегающих над выработанным пространством породах значительно ниже (σ_3 до -10 МПа).

Формирование максимальных по величине сжимающих напряжений ($\sigma_1 = 50$ МПа) в породах

кровли над заложенными участками можно охарактеризовать следующим образом.

Образующиеся между принудительно обрушенными сводами породные участки (целики) в кровле опираются на искусственные закладочные массивы, в результате чего формируется комбинированный целик, в котором одна половина по высоте состоит из твердеющей смеси, другая – из налегающих пород (т.е. кровля над закладкой является продолжением целика). Поэтому повышенная концентрация напряжений σ_1 на этих участках очевидна.

Наличие растягивающих усилий в породах над выработанным пространством и закладочным массивом будет способствовать их посадке (обрушению), что с позиции снижения опорного давления на краевых участках является положительным моментом.

В целом можно выделить, что снижение прочности пород в районе ведения горных работ, главным образом, обусловливается действием в массиве значительных по величине напряжений сжатия и сдвига.

С приближением фронта выемки к тектоническому нарушению повышается вероятность динамических сдвигов (срывов) по нему. Наличие растягивающих напряжений на участках удаленных от области ведения горных работ (в кровле выработанного пространства), особенно при фронте развития подэтажной выемкой оказывает влияние лишь на возможность выхода деформаций (обрушения) на дневную поверхность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 541 с.
2. Неверов С. А. Типизация рудных месторождений с ростом глубины по виду напряженного состояния / С.А. Неверов. / Ч. 1: Современные представления о напряженном состоянии массивов горных пород с ростом глубины // ФТПРПИ. – 2012. – № 2. – с. 56-69
3. Неверов С. А. Типизация рудных месторождений с ростом глубины по виду напряженного состояния / С.А. Неверов. / Ч. 2: Тектонотипы рудных месторождений и модели геосреды // ФТПРПИ. – 2012. – № 3. – с. 25-34
4. Руководство по геодинамическому районированию шахтных полей. Санкт-Петербург: НИИ горной геомеханики и маркшейдерского дела – межотраслевой научный центр ОАО ВНИМИ, 2012. – 114 с.
5. Геодинамическое районирование недр. Методические указания / под ред. Петухова И.М., Батугиной И.М. – Л., ВНИМИ, 1990. – 129 с.

□ Авторы статьи

Неверов
Александр Алексеевич,
канд.техн.наук, старший
научный сотрудник
лаборатории подземной
разработки рудных
месторождений (Институт
горного дела СОРАН).
Email: nnn_aa@mail.ru

Неверов
Сергей Алексеевич,
канд.техн.наук, старший
научный сотрудник
лаборатории подземной
разработки рудных
месторождений(Институт
горного дела СОРАН).
Email: nsa_nsk@mail.ru

Тапсиев
Александр Петрович,
докт.техн.наук, зав.
лабораторией подземной
разработки рудных
месторождений
(Институт горного
дела СОРАН). Email:
labprtm@list.ru

Фрейдин
Анатолий Маркович,
докт.техн.наук, главный
научный сотрудник
лаборатории подземной
разработки рудных
месторождений(Институт
горного дела СОРАН).
Email: labprtm@list.ru