

ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ВЫРАБОТОК

И.Л.Болтенгаген

*Институт горного дела СО РАН, Красный проспект, 54, 630091, г.
Новосибирск, Россия*

Выполнено геомеханическое обоснование технологических предложений по повышению устойчивости выработок вблизи очистных фронтов для условий месторождений Талнаха. Основным средством анализа служит компьютерное моделирование методом конечных элементов.

Подготовительные и очистные выработки, попадающие в зону влияния очистного фронта, подвергаются интенсивному разрушению, включая и динамические формы проявления горного давления. Наряду с креплением выработок для повышения их устойчивости используют разнообразные способы снижения напряжений в массиве горных пород: надработка и подработка [1,2], создание разгрузочных щелей [3], бурение и камуфлетное взрывание разгрузочных скважин. Широко распространены способы управления горным давлением, основанные на изменении форм сечения выработок [4,5], и механические способы упрочнения массива предварительно напряженными анкерами [6]. Существует определенный опыт использования химического и взрывоинъекционного упрочнения горных пород вяжущими составами [7]. Особенность ведения горных работ на рудниках Талнаха состоит в использовании закладки выработанного пространства в качестве основного способа управления горным давлением. Поэтапность последовательного технологического процесса проходки и закладки выработок позволяет перераспределять напряжения в массиве горных пород и является эффективным средством борьбы с негативными проявлениями горного давления [8-10].

Опыт ведения горных работ на рудниках Талнаха позволил сформулировать два технологических предложения, направленных на повышение устойчивости выработок за счет рационального выбора их геометрических параметров с учетом особенностей напряженного состояния окружающего массива.

Первым предложением является способ охраны горной выработки, состоящий в том, что до проходки проектной выработки, предназначенной для долговременной эксплуатации, создается выработка примерно таких же размеров. Первичная выработка заполняется твердеющей закладкой, и проходка проектной выработки осуществляется непосредственно над ней.

Второе предложение относится к слоевой системе разработки в восходящем порядке и направлено на повышение устойчивости кровли очистной выработки путем частичного замещения рудной кровли на искусственную.

Особенность предложенных технологических решений заключается в совместном использовании двух способов управления горным давлением (изменение формы сечения выработки и закладка выработанного пространства) при определенной последовательности технологических операций.

Анализ эффективности способа охраны выработки

На рудниках Талнаха наблюдаются следующие основные виды интенсивного разрушения массива горных пород на контуре подготовительных выработок, расположенных в области активного влияния очистных работ. Во-первых, высокая концентрация сжимающих напряжений в бортах выработки сопровождается образованием заколов и приводит к существенному изменению ее поперечного сечения (рис.1,а). Во-вторых, вследствие растягивающих напряжений в кровле выработки, в результате раскрытия имеющихся в массиве трещин формируется ослабленная зона, сопровождающаяся вывалами пород кровли (рис.1,б). Для поддержания выработок в этих условиях традиционно применяют усиленную комбинированную крепь (набрызг бетона на закрепленную к анкерам металлическую сетку) и иногда арочную металлическую крепь. Однако существуют дополнительные возможности управления горным давлением путем рационального изменения геометрических параметров выработок, позволяющего в ряде случаев за счет перераспределения напряжений в массиве повысить их устойчивость, снизить затраты на крепление и увеличить время эксплуатации. На рис.1,в показана схема способа охраны горной выработки, предложенного А.П.Талсиевым. Вытянутость суммарного поперечного сечения в направлении преобладающих вертикальных напряжений способствует снижению концентрации напряжений на контуре выработки. Существует дополнительная возможность повышения устойчивости выработки, когда в бортах нижней полости до ее заполнения твердеющей закладкой формируются разгружающие слои путем бурения серии горизонтальных шпуров.

Использовался следующий подход к сравнительному геомеханическому анализу состояния выработок различных поперечных сечений. Выработка в области опорного давления находится в поле напряжений с вертикальной компонентой s и горизонтальной q (причем $s \geq q$), которое можно представить суперпозицией гидростатического q и вертикального одноосного $p=s-q$ сжатия. Пусть Q_k и Q_b – коэффициенты

концентрации напряжений в центральной части кровли и борта выработки при исходном гидростатическом состоянии массива q , а P_k и P_b – аналогичные коэффициенты в условиях вертикального одноосного сжатия массива p . Тогда тангенциальные напряжения в кровле и в борту выработки определяются следующими соотношениями: $\sigma_k = P_k s + (Q_k - P_k) q$ и $\sigma_b = P_b s + (Q_b - P_b) q$. Состояние выработки в области опорного давления считается устойчивым, когда величины сжимающих напряжений в центральных частях кровли и борта не превышают значения прочности массива горных пород на одноосное сжатие ($\sigma_c = 100$ МПа [11]), т.е. $\sigma_k, \sigma_b \leq 100$ МПа, и отсутствуют растяжения в кровле и в борту выработки, т.е. $\sigma_k, \sigma_b \geq 0$. Четыре приведенные неравенства в осях (s, q) определяют область значений компонент поля напряжений, при которых выработка устойчива.

Расчеты методом конечных элементов выполнялись при следующих геометрических параметрах выработки. Размеры квадратного поперечного сечения проектной выработки и заполненной твердеющей закладкой нижней полости - 4x4 м. Податливый разгружающий слой, формируемый бурением серии шпуров, моделировался горизонтальными прямоугольными областями в бортах нижней полости размерами 2x0,25 м на высоте 1,75-2 м от ее почвы. Вследствие симметрии рассматривалась половина полной области решения. Смещения на внешней границе области заданы таким образом, чтобы обеспечить исходное гидростатическое напряженное состояние (первая серия расчетов) и состояние одноосного вертикального сжатия (вторая серия расчетов) при условии плоской деформации. Деформационные свойства массива: $E_m = 40$ ГПа, $\nu_m = 0,3$. Коэффициент Пуассона закладочного материала и разгружающего слоя принимался равным 0,3. Сравнивались три способа создания проектной выработки квадратного поперечного сечения размерами 4 x 4 м: традиционно используемая одиночная выработка; прямоугольная выработка с отношением высоты к ширине равном двум, заполненная в нижней половине твердеющей закладкой; и предложенный способ охраны горной выработки. Решались задачи при различных значениях модуля упругости закладочного материала E_f и разгружающего слоя E_s . Уровень напряжений на контуре определяется в основном геометрическими параметрами полости. Закладка нижней половины полости не влияет на распределение напряжений в массиве, что объясняется высокой податливостью закладочного материала ($E_f/E_m \approx 10^{-2}$). На практике искусственный массив препятствует вывалу пород в выработанное пространство, локализуя области разрушения в окрестности выработок. Создание разгружающего слоя слабо влияет на напряженное состояние массива в кровле выработки, но способствует снижению концентрации напряжений в борту, которая существенно зависит от его деформационных свойств. Если при достаточно высоком значении модуля

упругости слоя (всего в четыре раза ниже значения модуля упругости массива) напряженное состояние в окрестности выработки практически не изменяется, то в предельном случае ($E_s=0$) в борту выработки возможно появление областей растягивающих напряжений в условиях вертикального одноосного сжатия

Численное моделирование позволило определить коэффициенты концентрации напряжений в кровле и в бортах выработки. На рис.2,а показаны области значений вертикальной и горизонтальной компонент поля напряжений в массиве, при которых не происходит разрушений в кровле и в бортах выработки квадратного поперечного сечения. Рис.2,б,в иллюстрируют соответственно вариант создания выработки прямоугольного поперечного сечения с отношением высоты к ширине, равном двум, и предложенный способ охраны выработки при нулевых модулях упругости закладочного материала и разгружающего слоя. По данным экспериментальных исследований напряженного состояния массива методом гидроразрыва скважин [12] значения вертикальной и горизонтальной компонент напряжений в области опорного давления находятся в интервалах $s = 71 - 93$ МПа, $q = 28-46$ МПа, которые показаны на рис.2 выделенным прямоугольником. Выработки квадратного поперечного сечения в области опорного давления неустойчивы, вследствие высоких сжимающих напряжений в бортах и возможных растяжений в кровле. Выработки прямоугольного сечения более устойчивы, но возможны разрушения в бортах. Наибольшую устойчивость обеспечивает предложенный способ защиты выработки, один из вариантов которого испытан на руднике «Октябрьский», и за счет упрощения схемы крепления получен экономический эффект.

Анализ устойчивости комбинированной кровли

Способ разработки мощных пологих рудных тел, использующий частичное замещение рудной кровли очистных выработок на искусственную, осуществляют следующим образом [13]. Рудное тело 1 (рис.3) разделяют на выемочные полосы, которые по мощности делятся на очистные слои 2. Выемку слоев осуществляют в пределах выемочной полосы в направлении «снизу-вверх» с заполнением выработанного пространства твердеющими смесями, в результате чего формируется закладочный массив 3. Закладку выработанного пространства производят с оставлением свободного технологического пространства между рудным забоем и закладочным массивом в выемочной полосе. Перед очистной выемкой осуществляют следующие операции. В третьем снизу слое вприсечку к закладочному массиву проходят опережающую выработку 4, закладывают ее твердеющими смесями и формируют таким образом нижний выступ. Аналогично формируют следующие выступы 5. После

этого приступают к очистной выемке в пределах выемочной полосы. По почве рудного тела проходят разрезной штрек 6, из которого обруивают и отбивают в один прием два первых нижних слоя. В результате формируют очистную выработку 7, кровлей которой подсекают нижний выступ. Кровля очистной выработки частично представлена потенциально опасной по обрушениям рудой. Остальная часть кровли представлена закладкой выступа. После выпуска отбитой горной массы двух нижних слоев из выработанного пространства обруивают нижний выступ и отбивают его 8 в очистную выработку 7. Этим восстанавливают контуры опережающей выработки 4. Далее осуществляют дозакладку выработанного пространства двух нижних слоев, оставляя свободное технологическое пространство 4. После затвердевания закладочного материала из образованной полости 4 обруивают и отбивают в один прием руду, находящуюся в следующих двух слоях. В результате отбойки формируют вторую очистную выработку, вскрывая следующий по высоте выступ и т.д.

Одним из основных элементов предложенного способа разработки является частичное замещение рудной кровли очистных выработок на искусственную. Комбинированная кровля может быть использована в различных вариантах слоевой системы разработки в восходящем порядке для повышения устойчивости очистных забоев. Рассматривается задача геомеханического обоснования предложенного технологического решения, обеспечивающего устойчивость кровли очистных выработок с учетом реальных условий рудников Талнаха.

Для исследования устойчивости комбинированной кровли выработки использовалась расчетная схема, представленная на рис.4,а. На глубине 1 км расположено выработанное пространство шириной 100 м и высотой 28 м, заполненное твердеющей закладкой с деформационными свойствами $E_f = 450$ МПа, $\nu_f = 0,3$. Модуль упругости, коэффициент Пуассона и удельный вес массива горных пород соответственно: $E_m = 40$ ГПа, $\nu_m = 0,3$, $\gamma_m = 0,027$ МН/м³. Вследствие симметрии задачи рассматривалась половина полной области решения. Граничные условия заданы таким образом, чтобы обеспечить исходное гидростатическое напряженное состояние на глубине залегания рудного тела. Вблизи очистного фронта вприсечку к закладочному массиву по почве рудного тела создана камера размерами 8 x 8 м. При сравнительном геомеханическом анализе состояния рудной и комбинированной кровли очистной выработки рассматривались варианты разработки с созданием по кровле рудного тела защитного перекрытия (рис.4,б) и без него (рис.4,в). Деформационные свойства закладочного материала в защитном перекрытии и в комбинированной кровле слоя: $E_s = 750$ МПа, $\nu_s = 0,3$.

Очистная выемка под защитным перекрытием. Причиной низкой устойчивости кровли очистных выработок является наличие в

призобойном рудном массиве растягивающих напряжений. Распределения минимальных главных напряжений в массиве позволяют определить зоны растяжений и выполнить сравнительный анализ состояния рудной и комбинированной кровли. Защитная надработка залежи снижает общий уровень горного давления в призобойной области, но приводит в ряде случаев к формированию зоны растягивающих напряжений в массиве горных пород непосредственно под защитным перекрытием. На рис.5,а показаны изолинии минимальных главных напряжений в массиве горных пород вблизи очистной выработки с рудной кровлей. Растягивающие напряжения в верхней части залежи непосредственно под защитным перекрытием превышают 5 МПа, что на практике может привести к разрушению рудного массива и к снижению устойчивости выработок в этой области. В рудной кровле очистной выработки формируется область растягивающих напряжений, не превышающих 1 МПа. Применение комбинированной кровли (рис.5,б) не оказывает существенного влияния на распределение напряжений в призобойном рудном массиве. На рудном участке кровли сохраняются растяжения, но уменьшение его длины способствует снижению вероятности разрушения комбинированной кровли очистной выработки.

Очистная выемка без надработки залежи. В этом случае складывается иная геомеханическая обстановка: в кровле камеры формируется протяженная область растягивающих напряжений, распространяющаяся на расстояние более 10 м вглубь массива (рис.5,в). Непосредственно в кровле максимальные значения растягивающих напряжений достигают 6 МПа. Зона повышенных (более 1 МПа) растяжений распространяется на глубину около 1,5 м. Таким образом, очистная выемка без надработки залежи характеризуется более низкой устойчивостью кровли очистных выработок по сравнению с вариантом ведения горных работ под защитным перекрытием. Применение комбинированной кровли приводит к перераспределению напряжений, улучшающему состояние ее рудной части (рис.5,г): область растягивающих напряжений также распространяется вглубь массива на расстояние более 10 м, но снижается интенсивность растягивающих напряжений (непосредственно в кровле они не превышают 2 МПа) и значительно уменьшается размер области повышенных растяжений в массиве. Комбинированная кровля улучшает состояние призобойной зоны и при сравнительно низкой, с учетом всех техногенных воздействий, нарушенности массива (прочность на растяжение не менее 1МПа) повышает устойчивость очистных выработок.

Выводы

1. Предложенный способ охраны выработки обеспечивает ее устойчивость в области опорного давления. Способ предусматривает проходку выработки над искусственным массивом после определенной последовательности технологических операций: проходки первичной выработки, крепления, бурения в бортах горизонтальных разгрузочных шпуров и заполнения ее твердеющей закладкой. На практике данное предложение может использоваться, как способ повышения устойчивости выработок, эксплуатация которых затруднена вследствие негативных проявлений горного давления. Закладка старой и проходка новой выработки непосредственно над созданным искусственным массивом фактически увеличивают срок эксплуатации выработки при минимальных изменениях ее местоположения.

2. Частичное замещение рудной кровли очистной выработки твердеющей закладкой способствует повышению ее устойчивости. Применение данного технологического решения допускает увеличение безопасных пролетов отработки залежи на начальной стадии без надработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Петухов И.М., Линьков А.М., Фельдман И.А. и др. Защитные пласты.- Л.: Недра, 1972.**
- 2. Петухов И.М., Линьков А.М., Сидоров В.С., Фельдман И.А. Теория защитных пластов.- М.: Недра, 1976.**
- 3. Черняев В.И. Основные параметры разгрузочных щелей // Изв. ВУЗов. Горный журнал.- 1978.-№7.**
- 4. Инструкция по безопасному ведению горных работ на рудных и нерудных месторождениях, склонных к горным ударам.-Л.: ВНИМИ, 1980.**
- 5. Турчанинов И.А., Иофис М.А., Каспарьян Э.В. Основы механики горных пород.- Л.: Недра, 1977.**
- 6. Борщ-Компониец В.И., Макаров А.Б. Горное давление при отработке мощных пологих рудных залежей.- М.: Недра, 1986.**
- 7. Замесов Н.Ф., Айнбиндер И.И., Бурцев Л.И. и др. Развитие интенсивных методов добычи руд на больших глубинах.- М.: ИПКОН АН СССР, 1990.**
- 8. Курленя М.В., Федоренко В.К. Управление горным давлением при разработке рудных залежей в условиях больших глубин.- София: ВГГИ.- 1981.- т.ХХУ11.- ч.1.**

- 9. Баймбетов М.О., Серяков В.И.** Влияние порядка ведения очистных и закладочных работ на напряженно – деформированное состояние месторождений // ФТПРПИ.- 1984.- №4.
- 10. Еременко А.А., Серяков В.М.** Геомеханическое обоснование последовательности разработки месторождения // Геотехнологии на рубеже XXI века.- Новосибирск: ИГД СО РАН, 1999.
- 11. Ильницкая Е.И., Тедер Р.И., Ватолин Е.С., Кунтыш М.А.** Свойства горных пород и методы их определения.- М.: Недра, 1979.
- 12. Попов С.Н., Федоренко В.К., Болтенгаген И.Л. и др.** Характер деформирования межшахтного целика на руднике «Октябрьский» (Талнах) // Экспериментальные исследования напряженно – деформированного состояния массива шахт и рудников.- Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1990.
- 13. А.с. СССР № 1514934.** Способ разработки мощных пологих залежей / Тапсиев А.П., Коротких В.И., Самусенко А.К. и др. - Оpubл. в Б.И., 1984, №38.

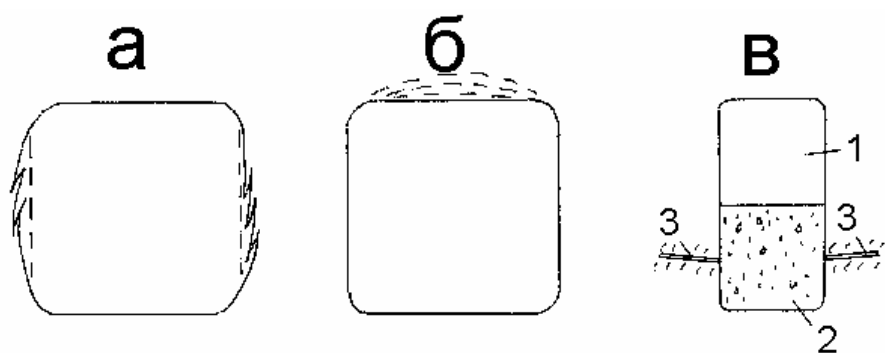


Рис.1. Виды разрушения массива в бортах (а) и в кровле (б) выработок в области повышенных вертикальных напряжений на рудниках Талнаха. Предлагаемое поперечное сечение выработки (в) в области активного влияния очистного фронта: 1- охраняемая выработка, 2- заполняемая твердеющей закладкой первичная полость, 3- разгружающий слой, созданный бурением серии шпуров.

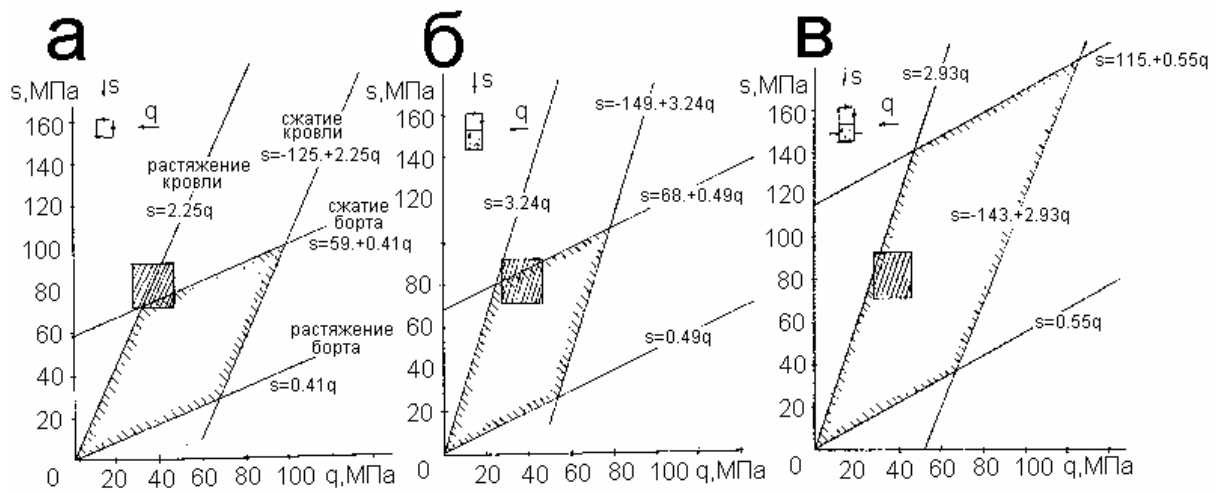


Рис.2. Области значений вертикальной s и горизонтальной q компонент поля напряжений, соответствующих устойчивому состоянию выработок. Выделенный прямоугольник - экспериментальная оценка напряжений в области опорного давления [12].

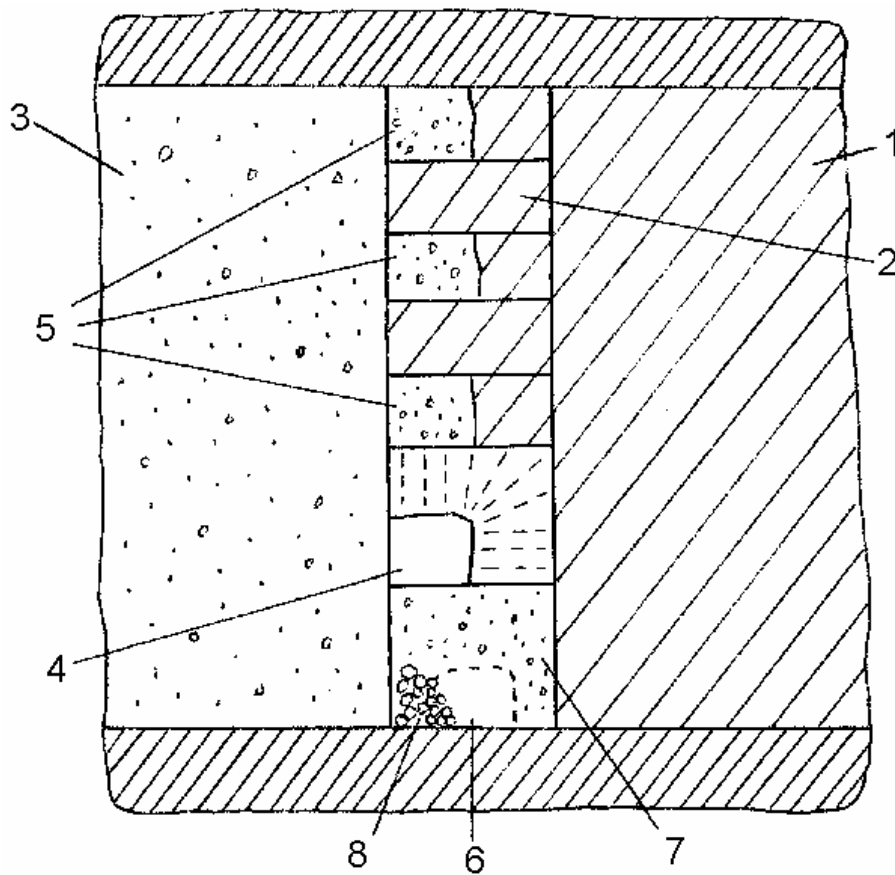


Рис.3. Способ разработки мощных пологих рудных тел с использованием частичного замещения рудной кровли очистных выработок на искусственную [13].

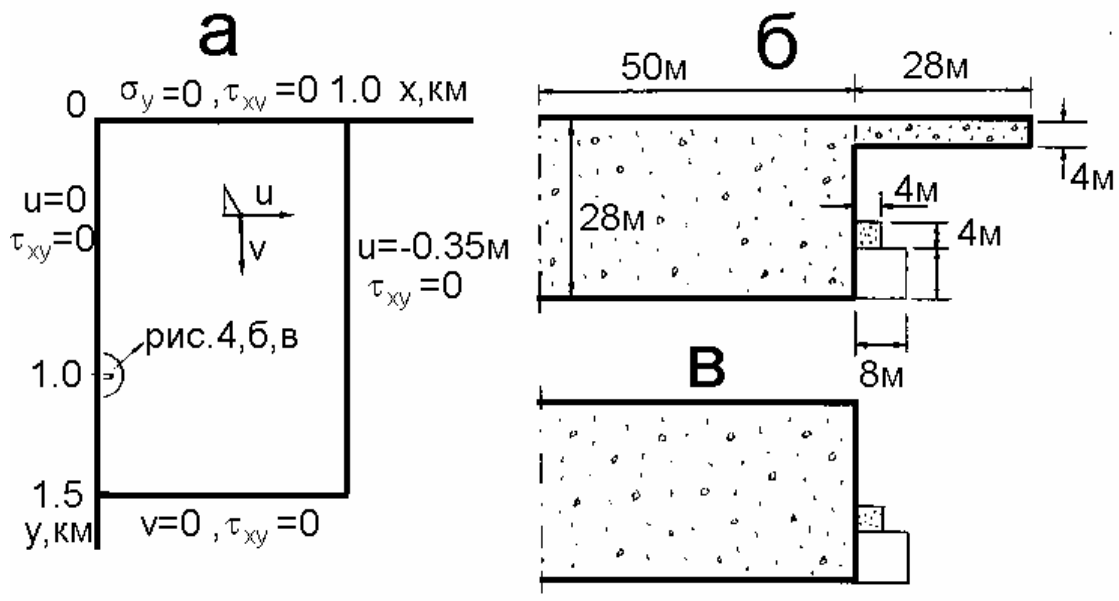


Рис.4. Расчетная область (а) и варианты создания комбинированной кровли очистной выработки при надработке залежи (б) и без нее (в).

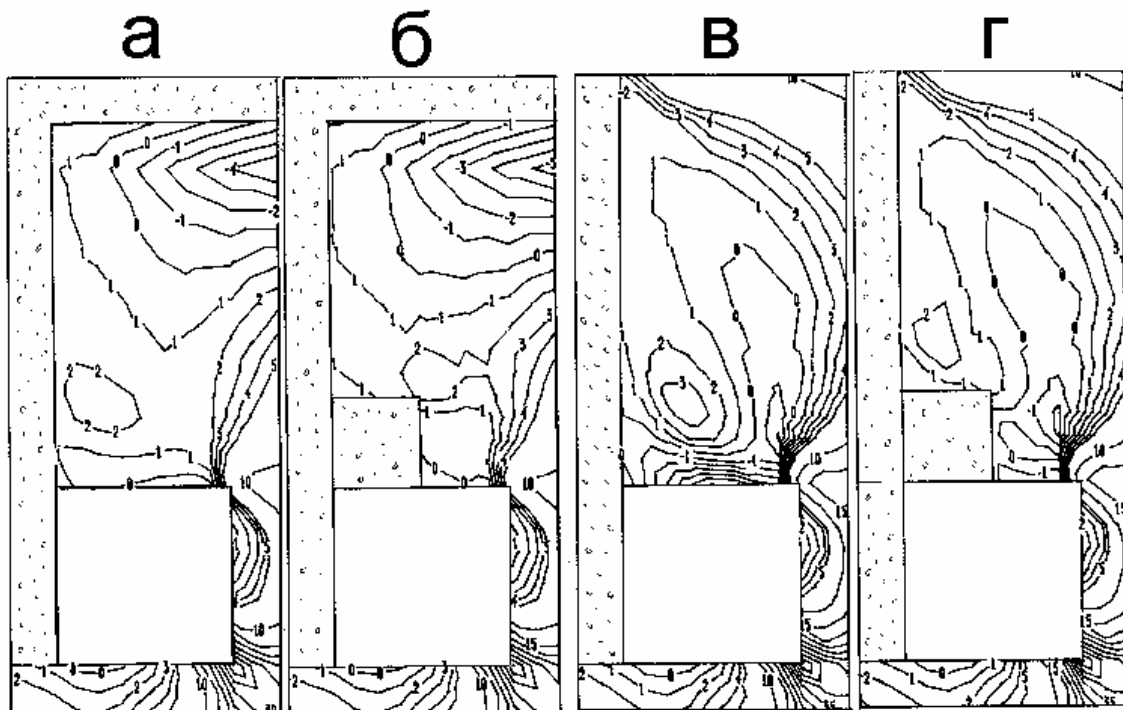


Рис.5. Изолинии минимальных главных напряжений в массиве горных пород вблизи фронта горных работ для рудной (а,в) и комбинированной (б,г) кровли очистной выработки под защитным перекрытием (а,б) и при его отсутствии (в,г).