

# КОМБИНИРОВАННЫЙ СПОСОБ ОТРАБОТКИ ГЛУБОКОЗАЛЕГАЮЩИХ МОЩНЫХ ПОЛОГИХ РУДНЫХ ЗАЛЕЖЕЙ С ЗАКЛАДКОЙ И ОБРУШЕНИЕМ<sup>2</sup>

С.Ю. Васичев, А.А. Неверов, Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, Россия

Изложены результаты геомеханической и технико-экономической оценки геотехнологии выемки мощных пологопадающих рудных месторождений с закладкой и обрушением, обеспечивающей безопасность и эффективность горных работ в условиях больших глубин

## Введение

Существующее состояние подземных горных работ при выемке мощных пологопадающих рудных месторождений, доля которых в мировой добыче составляет более 45%, характеризуется повышенным удельным весом (более 70%) систем разработки с закладкой выработанного пространства. Технологии с закладкой обеспечивают высокий уровень извлечения полезного ископаемого из недр, минимальные деформации подрабатываемого массива и создают сравнительно безопасные условия труда. Однако при добыче руд средней и малой ценности из-за повышенной себестоимости, отработка с закладкой не всегда обеспечивает положительную рентабельность и обуславливает необходимость поиска более дешевых и производительных способов выемки [1-5].

В этой связи вызывает интерес оценить условия и область применения разработанного в институте горного дела СО РАН перспективного способа добычи [6-7], с комбинацией классов систем разработки с закладкой и обрушением (рис. 1).

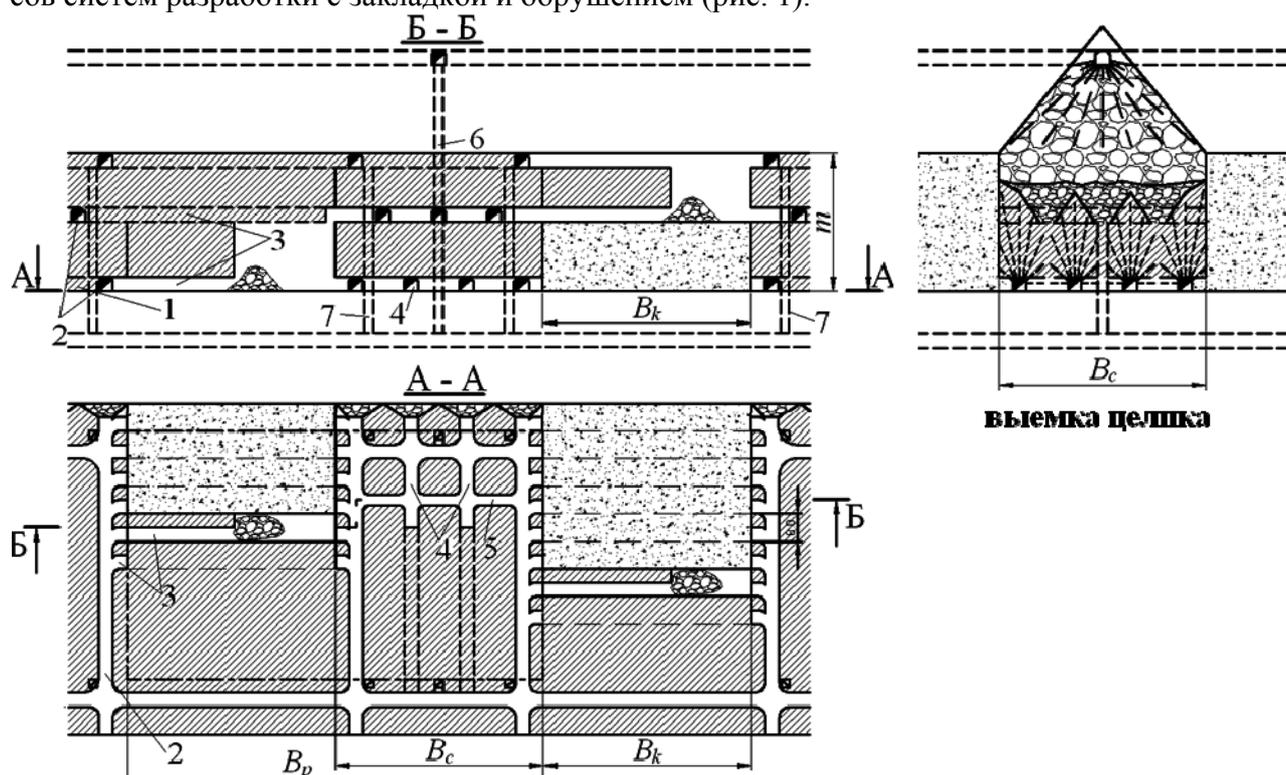


Рис. 1. Комбинированная система разработки с закладкой и обрушением: 1 – транспортный штрек; 2 – слоевой орт; 3 – разрезной штрек; 4 – буро-доставочный орт; 5 – сбойки; 6 – вентиляционно-ходовой восстающий; 7 – рудоспуск

Сущность способа заключается в разделении залежи на участки, обрабатываемые с твердеющей закладкой и обрушением. В первую очередь извлекаются запасы из камер, на месте

<sup>2</sup> Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 гг.»

которых формируются искусственные целики. Во вторую – после набора прочности закладочным массивом с отставанием обрабатываются временные рудные целики под обрушенными породами кровли в форме устойчивого свода равновесия шатрового типа. Высота свода определяется заполнением породами выработанного пространства на мощность залежи.

Подготовка панелей производится транспортными штреками, пройденными в границах обрабатываемого участка, слоевых ортов – в границах панели (временного целика), буродоставочных штреков (слоевых штреков выемочных лент), рудоспусков и выработок вентиляционно-закладочного горизонта (рис. 1). Подготовка временного целика к выемки предусматривает проведение в его границах подэтажных буродоставочных ортов и сбоек (заездов). Расстояние между ортами – 12-16 м, между сбоями – 12-15 м.

Выемка лент в панелях первой очереди осуществляется сплошной камерной системой разработки с закладкой с опережением нижнего подэтажа относительно верхнего. Панели имеют ширину 60 м и отделены одна от другой временными целиками такой же ширины. Погашение целика производится догоняющим фронтом системой подэтажного обрушения с торцовым выпуском руды из буродоставочных выработок. При этом опережение выемки верхнего подэтажа относительно нижнего составляет не более двойной ширины отбиваемого слоя. Принудительное обрушение пород кровли осуществляется только в пределах целика, без нарушения их над заложёнными камерами (лентами).

Одним из важных вопросов безопасного ведения очистных работ при этой геотехнологии является определение устойчивого состояния подработанной толщи, составляющей с чередующимися участками, заполненными обрушенными породами и закладкой, единую конструктивную систему. Установив закономерности взаимодействия налегающих пород и искусственного массива в различных горнотехнических ситуациях, и придав закладке необходимые свойства, можно целенаправленно воздействовать на устойчивость и риски надежного поддержания кровли.

### Постановка задачи

Моделирование и расчеты напряженно-деформированного состояния (НДС) конструктивных элементов технологии осуществляли методом конечных элементов (МКЭ) [8]. Для проведения численного эксперимента была выбрана двумерная упругая модель в условиях плоского деформированного состояния, где в отдельные слои с усреднёнными упругими и плотностными характеристиками были выделены вмещающие породы, рудная залежь и закладочный массив. В математической модели указанные слои моделировались как сплошные, упругие, изотропные, линейно-деформируемые, однородные материалы с физико-механическими свойствами представленными в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Физико-механические свойства массивов

Наименование	Объемный вес, кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент Пуассона	Модуль упругости (E), ГПа
Рудный залежь	4000	0.22	50
Вмещающие породы	2700	0.25	60
Закладочный массив	1900	0.33	5

Рассматривались три группы задач для условий тектонического ( $q = 2$ ) и динниковского (гравитационного –  $q = 0,33$ ) распределения исходного поля напряжений в нетронутом массиве. Первая группа – определение НДС в массивах при неотработанных рудных целиках и заложённых камерах. Вторая группа – тоже в результате выемки одного целика. Третья – при отработанных целиках. Условия на границе расчетной области определялись напряженным состоянием нетронутого массива. В задачах предположено, что закладка несет определенную нагрузку и имеет сцепление с рудным телом и вмещающими породами. Последнее позволяет принять ее низко модульным упругим материалом, обеспечивающим сплошность с окружающим массивом. В первом приближении можно считать, что отсутствуют какие-либо раз-

равные смещения по контактам закладки и вмещающих пород.

Основными геометрическими параметрами расчетных вариантов комбинированного способа добычи являются: рассматривается горнотехническая ситуация включающая три заложённых камер и два рудных целика; глубина разработки  $H = 600\text{--}1200$  м; мощность залежи  $m = 40$  м; ширина заложённых камер  $B_k = 60$  м; ширина временных рудных целиков  $B_c = 30\text{--}60$  м. Результаты расчетов приведены в виде картин изолиний компонент главных напряжений (МПа). За максимальное главное напряжение принималось  $\sigma_1$ , за минимальное –  $\sigma_3$ , растяжение – со знаком «минус».

### Анализ результатов исследований

На рис. 2 приведены фрагменты картин изолиний главных напряжений в элементах технологии в зависимости от величины бокового давления ( $q$ ) для первой группы задач при  $H = 800$  м,  $B_k = 60$  м,  $B_c = 40$  м.

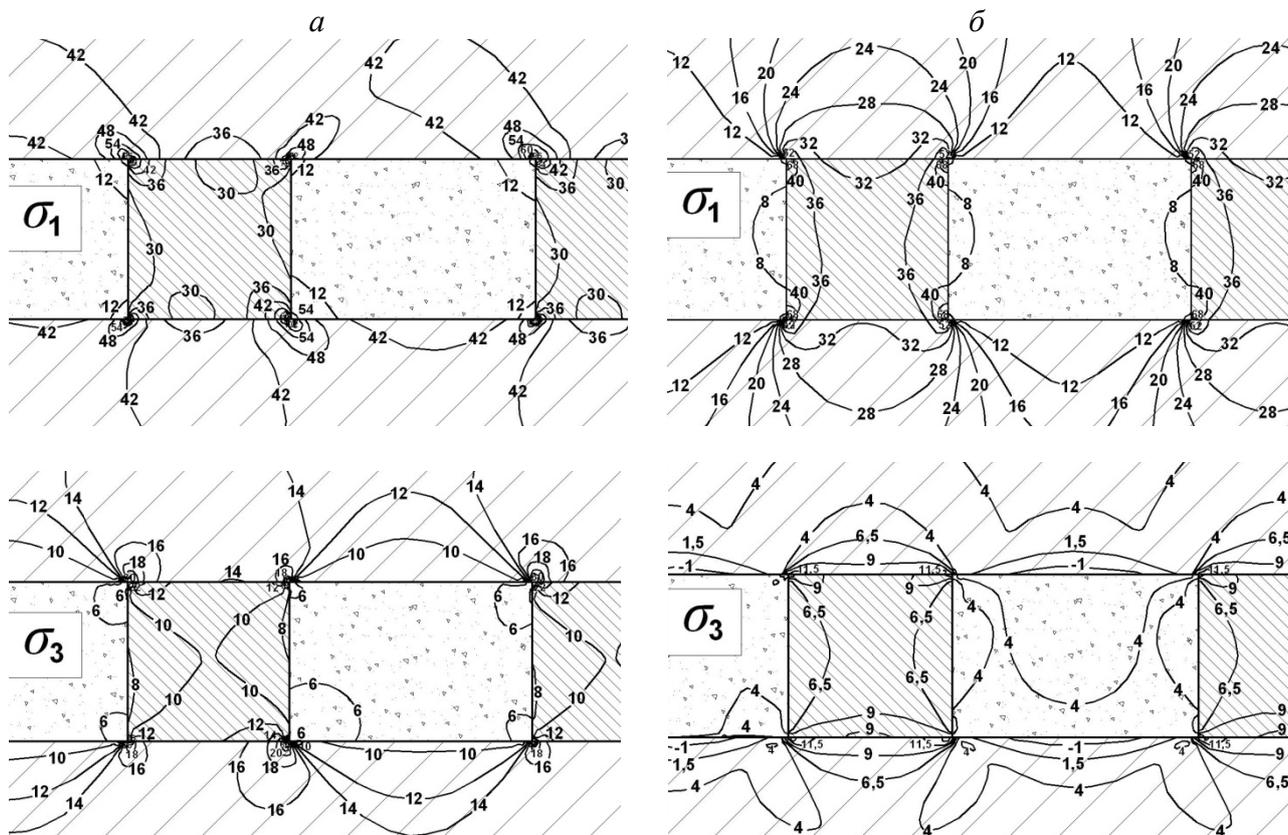


Рис. 2. Характер распределения главных напряжений в элементах геотехнологии для первой группы задач при  $H = 800$  м,  $B_k = 60$  м,  $B_c = 40$  м: а – при  $q = 2$ ; б –  $q = 0,33$

Из них следует, что искусственные целики не несут существенной нагрузки ( $\sigma_1$  до 8 МПа,  $\sigma_3$  до 4-6 МПа), так как испытывают состояние двухосного сжатия. В данном случае, основную пригрузку воспринимают временные рудные целики, которая с увеличением глубины разработки (600-1200 м) возрастает почти в 2 раза (рис. 3 а). Причем в условиях динниковского распределения напряжений в нетронутым массиве величина  $\sigma_1$  в их центральной части на 8-10% больше чем при  $q = 2$ . Аналогичная ситуация отмечается в искусственных закладочных опорах (рис. 3 б). Растягивающие усилия отмечается в породах кровли и почвы заложённых камер при  $q = 0,33$ , которые с глубиной увеличиваются до значений  $\sigma_3 = -2\text{--}5$  МПа (рис. 3 в). За счет высоких горизонтальных напряжений, действующих в массиве, при  $q = 2$  компонента  $\sigma_1$  в налегающей толще в 3,5-4,5 раза выше, чем в условиях  $q = 0,33$ . Поэтому зон с растягивающими нагрузками в тектонически напряженных массивах не возникает.

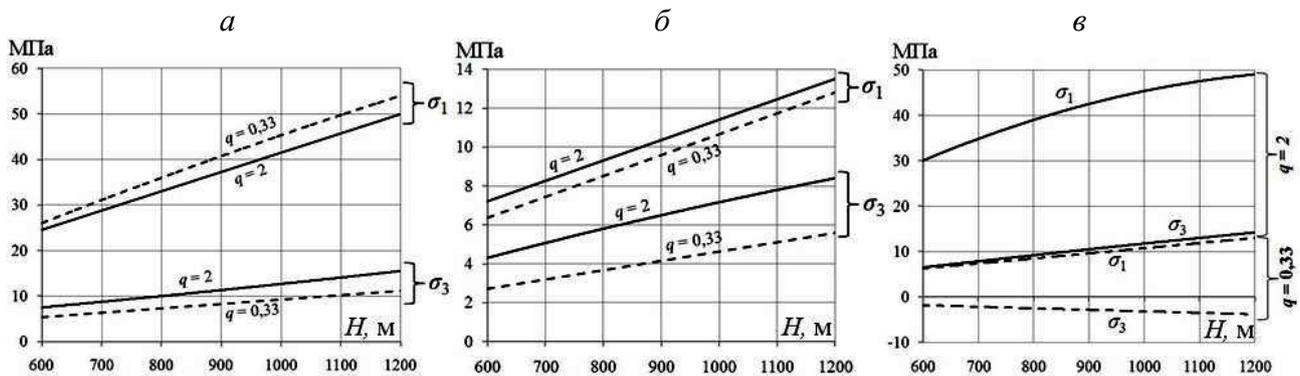


Рис. 3. Изменение главных напряжений для первой группы задач при  $B_k = 60$  м,  $B_c = 40$  м в зависимости от  $H$  и исходного поля напряжений: *a* – в центре временных рудных целиков между заложёнными камерами; *б* – в центре заложённых камер; *в* – в породах кровли над закладочным массивом

Выемка рудных целиков (III – группа задач), ведущая к увеличению пролета отработки и образующиеся между принудительно обрушенными шатровыми сводами породные участки (целики) в кровле опираются на искусственные закладочные массивы, в результате чего в последних отмечается существенный рост напряжений  $\sigma_1$ . При нагрузках 8-10 МПа (в условиях одноосного сжатия) прочность искусственных целиков, обусловленная цементным скелетом закладочного массива, будет исчерпана, вяжущие связи разрушатся, а наличие зон растяжения в породах кровли над закладочными массивами будут способствовать к потере их устойчивости. Поэтому в этих условиях следует ожидать плавного смещения налегающей толщи. Такая последовательность выемки создает более безопасные и контролируемые условия оседания кровли. Наиболее неблагоприятная ситуация складывается при  $q = 0,33$  в породах почвы под отработанными рудными целиками, где растягивающие напряжения достигают величин  $\sigma_3 = -8$  МПа.

Характер изменения напряжений в элементах технологии в зависимости от ширины временных рудных целиков ( $B_c$ ) и стадий разработки показан на рис. 4.

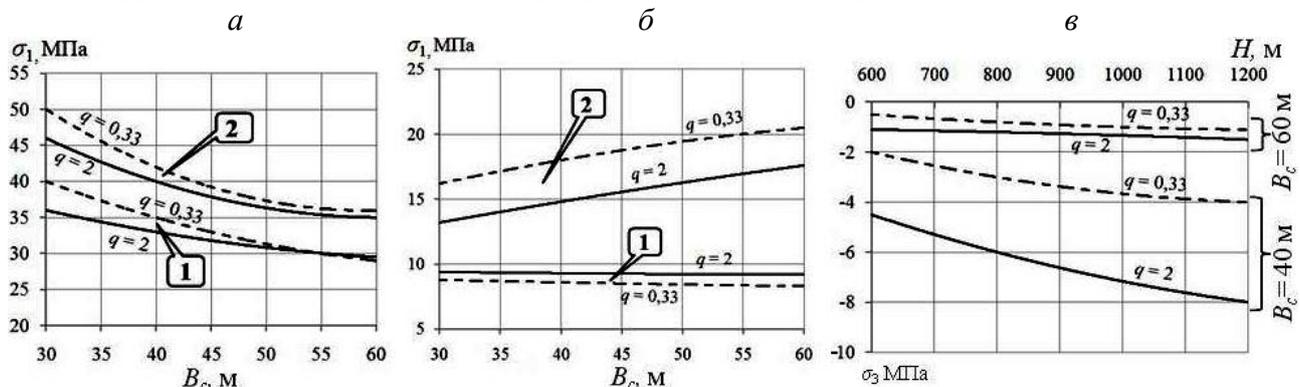


Рис. 4. Распределение напряжений в зависимости от  $B_c$ : *a* – в центре рудных целиков (при  $H = 800$  м,  $B_k = 60$  м), 1 – для I-й группы задач, 2 – II-й группы задач; *б* – в центре заложённых камер (при  $H = 800$  м,  $B_k = 60$  м), 1 – для I-й группы задач, 2 – III-й группы задач; *в* – в породах кровли над заложёнными камерами при отработанных целиках (III – группа задач)

Установлено, что уменьшение  $B_c$  с 60 до 30 м приводит к росту напряжений  $\sigma_1$  в их центральной части на 25-30 и 40% соответственно при  $q = 2$  и  $q = 0,33$ . Выемка одного рудного целика сопровождается увеличением давления  $\sigma_1$  в смежном на 20-30% (рис. 4 *a*). Погашение рудных целиков (см. рис. 4 *б*), как отмечалось выше, ведет к росту пролета отработки, вызывая тем самым дополнительную пригрузку закладочных массивов. При увеличении  $B_c$  с 30 до 60 м нагрузка  $\sigma_1$  в искусственных массивах повышается на 30 и 35% соответственно в условиях динниковского и тектонического распределения напряжений в нетронутым массиве. Сопоставляя полученные результаты НДС заложённых камер при наличии рудных целиков и в услови-

ях после их отработки видно, что рост давления в искусственных целиках составляет более чем 1,5-2,0 и 1,8-2,5 раза соответственно при  $q = 2$  и  $q = 0,33$  (рис. 4 б). Изменения растягивающих напряжений в породах кровли в зависимости от  $B_c$  для III – группы задач в тектонически напряженных массивах свидетельствуют, что их величины зависят от углов наклона свода обрушения (рис. 4 в). При  $B_c = 60$  м угол является менее крутым, чем в условиях  $B_c = 30-40$  м. В данном случае разгрузка кровли от действия высоких горизонтальных напряжений происходит в меньшей степени. Вследствие этого растягивающие усилия уменьшаются с  $\sigma_3 = -4 \div -8$  до  $\sigma_3 = -1 \div -1,5$  МПа. Наличие в кровле незначительных по величине растягивающих напряжений будет способствовать плавному перемещению налегающей толщи пород.

Для развития и промышленного освоения комбинированного способа добычи (КЗО) в условиях рудника «Октябрьский» (ОАО «Норильский никель») была выполнена сравнительная технико-экономическая оценка показателей эффективности применяемых в настоящее время на месторождении технологий:

1. Сплошная камерная система разработки с твердеющей закладкой:
  - мощность залежи до 20 м (СК);
  - мощность залежи более 20 м (СКП);
  - с подэтажами короткими секциями, мощность залежи более 20 м (СКПКС);
  - вариант «вертикальные блоки» (СКВБ);
  - трапециевидными камерами, мощность залежи до 20 м (СКТК);
2. Система разработки с выемкой камерами увеличенной ширины до 16 м (КС);
3. Слоевая система разработки с нисходящим порядком выемки и закладкой (СНГВ).

Анализ результатов расчета (табл. 2) показал, что комбинированная геотехнология с закладкой и обрушением, в сравнении с используемыми вариантами сплошной камерной и слоевой выемкой с полной закладкой выработанного пространства обеспечивает рост производительности труда рабочего по системе разработки более чем в 1,2-1,5 раза, снижение затрат на добычу 1-й тонны балансовых запасов на 20-40%, а также повышение интенсивности выемки минерального сырья в 1,2-1,8 раза (рис. 5) при общем незначительном ухудшении показателей полноты и качества извлечения запасов.

ТАБЛИЦА 2. Технико-экономические показатели

Система разработки	Объем ПНР, $\frac{м}{1000т}$ $\frac{м^3}{1000т}$	Потери, %	Разубоживание, %	Производительность, т/чел.-смен		Себестоимость, руб./т	
				забойного рабочего	по системе разработки	на 1 т добытой руды	на 1 т балансовых запасов
1	2	3	4	5	6	7	8
1. СК	$\frac{5,2}{82,8}$	6,5	8,5	51,4	46,6	608,1	625,5
2. СКП	$\frac{3,9}{61,8}$	4,3	8,0	53,4	49,4	549,6	575,8
3. СКПКС	$\frac{4,3}{63,9}$	4,4	8,0	53,0	48,9	558,8	585,4
4. СКВБ	$\frac{3,9}{45,0}$	4,1	9,4	60,6	55,9	493,3	526,5
5. СКТК	$\frac{4,4}{70,5}$	6,9	8,7	48,6	45,5	585,1	599,0
6. КС	$\frac{3,7}{61,1}$	7,1	7,8	56,1	51,1	549,5	554,2
7. СНГВ	$\frac{6,9}{120,9}$	2,7	5,5	45,3	40,0	735,9	765,1
8. КЗО	$\frac{3,4}{52,6}$	7,3	13,3	70,3	61,8	396,6	428,4

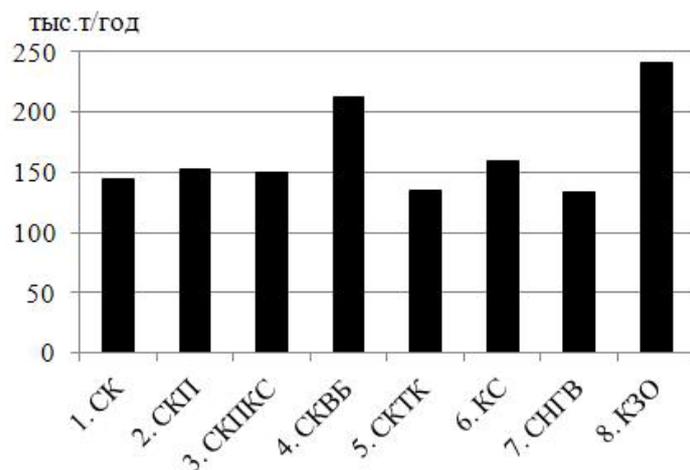


Рис. 5. Годовая производительность панели (фланга) при системах разработки

### Выводы

Гибкость предлагаемой технологии, высокая производительность и минимальные материально-трудовые затраты обеспечивают существенное технологическое и экономическое превосходство её над системами с полной закладкой выработанного пространства. Эффективность и безопасность горных работ определяется состоянием искусственных массивов обеспечивающих плавное смещение кровли над всем выработанным пространством позади очистного фронта выемки временных рудных целиков, создавая вероятность статического проявления горного давления и устойчивой шириной последних не допускающих формирование предельного пролета обнажения налегающей толщи пород.

Установлено, что в тектонически напряженных массивах безопасными параметрами временных рудных и искусственных целиков, являются  $B_k = B_c = 60$  м, На стадии добычных работ высокие горизонтальные напряжения позволяют поддерживать в устойчивом состоянии налегающий массив горных пород. Наличие шатрового свода равновесия приводит к разгрузке пород кровли от действия тектонических напряжений при  $q = 2$ , что является следствием возникновения растягивающих усилий, величина которых зависит от  $B_c$  и углов наклона свода.

### Список литературы

1. Борщ-Компоницец В.И. Горное давление при отработке мощных пологих рудных залежей / В.И. Борщ-Компоницец, А.Б. Макаров / М.: Недра, 1986.
2. Бронников Д.Н. Разработка руд на больших глубинах / Д.Н. Бронников, Н.Ф. Замесов, Г.И. Богданов / М.: Недра, 1982.
3. Фрейдин А.М. Повышение эффективности подземной разработки рудных месторождений Сибири и Дальнего Востока / А.М. Фрейдин, В.А. Шалауров, и др. / Монография – Новосибирск: Наука, 1992.
4. Фрейдин А.М. Современные способы разработки рудных залежей с обрушением на больших глубинах / А.М. Фрейдин, А.А. Неверов, С.А. Неверов, П.А. Филиппов / Монография. Рос. акад. наук, СО, Ин-т горного дела. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. – 151 с.
5. Назарова Л.А. Освоение камерной системы разработки с обрушением кровли на Николаевском руднике / Л.А. Назарова, А.М. Фрейдин, А.А. Неверов / ФТПРПИ. – 2005. – № 4.
6. Патент РФ № 1606667. Способ управления давлением // Фрейдин А.М., Какоило В.Н., Шалауров В.А., и др. – опубл. в БИ, 1990, № 42.
7. Неверов А.А. Геомеханическое обоснование комбинированного способа отработки пологих рудных залежей с закладкой и обрушением под охраняемыми объектами / А.А. Неверов, С.А. Неверов, Е.В. Денисова / Вестник Кузбасского гос. тех. университета, 2011 № 5. с. 31-36.
8. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975.