



# УПРАВЛЕНИЕ ГОРНЫМ ДАВЛЕНИЕМ

## 1. Основные понятия

**Горное давление** – силы, возникающие в массиве горных пород вблизи выработок в результате действия гравитации (силы тяжести) и тектонических процессов.

**Проявления горного давления** – механические процессы (смещения, деформации, разрушения, формирование нагрузок на крепь, целики), происходящие в массиве горных пород при ведении горных работ, как реакция на нарушение исходного (природного) напряженного состояния массива.

**Управление горным давлением** – технологические приемы, процессы и мероприятия по минимизации проявлений горного давления в выработках.

**Способы управления горным давлением** на предприятиях корпорации «Казахмыс»:

- поддержание открытого выработанного пространства целиками (на рудниках Жезказгана);
- закладка выработанного пространства (на Орловском руднике Жезкентского ГОКа);
- погашение выработанного пространства обрушением вмещающих пород (при повторной разработке рудников Жезказгана);
- временное поддержание выработанного пространства в период очистной выемки отбитой замагазинированной рудой (на Белоусовском, Иртышском рудниках филиала ВостокКазмедь).

## 2. Природное напряженное состояние массива горных пород

### 2.1. Гравитационные напряжения в массиве

Сила тяжести на глубине  $H$  создает в массиве горных пород с удельным весом  $\gamma$  вертикальные напряжения, равные  $\gamma H$ . Фактически это давление от собственного веса столба пород от поверхности до глубины  $H$ . Под действием собственного веса массив сжат по вертикали. Именно поэтому при ведении открытых горных работ вокруг карьеров наблюдаются поднятия земной поверхности на 10-20 мм за счет разгрузки массива при снятии веса вскрышных пород.

Вертикальное сжатие собственным весом за счет поперечных деформаций с коэффициентом Пуассона  $\nu$  приводит к появлению в массиве горизонтальных напряжений бокового распора, равных  $\nu/(1-\nu) \cdot \gamma H$ . Для большинства горных пород коэффициент Пуассона  $\nu \sim 0,2$ . Тогда коэффициент бокового распора (соотношение горизонтальных и вертикальных напряжений) равен  $\nu/(1-\nu) \sim 0,25$ . Это означает:



*Если массив нагружен только одной активной силой – гравитацией (силой тяжести, собственным весом), то максимальными по величине в нем являются вертикальные напряжения  $\sigma_H$ , а горизонтальные напряжения во всех направлениях равны и примерно в 4 раза меньше, чем вертикальные.*

## 2.2. Горизонтальные тектонические напряжения в массиве

За счет современных тектонических процессов (отголосками этих процессов являются землетрясения, постоянно происходящие во всем мире) в земной коре существует вторая активная сила – горизонтальные тектонические напряжения. Из-за сложного геологического строения недр величину и направление действия тектонических напряжений можно установить только с помощью специальных измерений или по проявлениям горного давления в выработках.

Измерениями во всем мире установлено:

- *величины тектонических напряжений могут превышать вертикальное гравитационное давление толщи пород в 3-7 раз;*
- *тектонические напряжения в массиве горных пород распределяются неравномерно: даже в пределах одного месторождения могут встречаться участки с высоким и низким уровнями напряжений;*
- *величины горизонтального сжатия массива в разных направлениях в плане могут различаться в несколько раз;*
- *наибольшие величины тектонических напряжений наблюдаются в верхних слоях земной коры, где ведутся горные работы; на большой глубине (более 1,5-2,0 км) уровень тектонических приближается к гравитационному давлению*

Таким образом, исходное природное напряженное состояние массива определяется независимым действием двух активных сил:

- ✓ гравитации, создающей вертикальное давление собственного веса толщи пород и горизонтальные напряжения бокового распора, не превышающие 25% от вертикальных;
- ✓ горизонтальных тектонических напряжений, неравномерно распределенных по площади и по направлениям действия в плане.

Поэтому в начале разработки новых шахтных полей всегда существует неопределенность: в каком исходном напряженном состоянии находится массив? По мере развития горных работ по сумме признаков – проявлений горного давления в выработках можно составить достаточно полное представление о природном поле напряжений в массиве, где ведется разработка залежей.



2.3. Природное напряженное состояние массива Жезказганского месторождения изучалось в 70-80-х годах методом разгрузки шахтных условий в различных точках в пределах всего месторождения. Установлено, что (рис. 1):

- вертикальные гравитационные напряжения  $\gamma H$  в массиве по абсолютной величине являются минимальными;
- максимальными по величине являются горизонтальные тектонические напряжения  $\sigma_1$ , ориентированные параллельно простиранию флексурных зон; они превышает вертикальное давление  $\gamma H$  в  $2 \div 7$  раз;
- вкрест простирания флексур в природном массиве действуют промежуточные по величине горизонтальные напряжения  $\sigma_2$ ; их величина колеблется в пределах  $(1,5 \div 2,8) \gamma H$ .

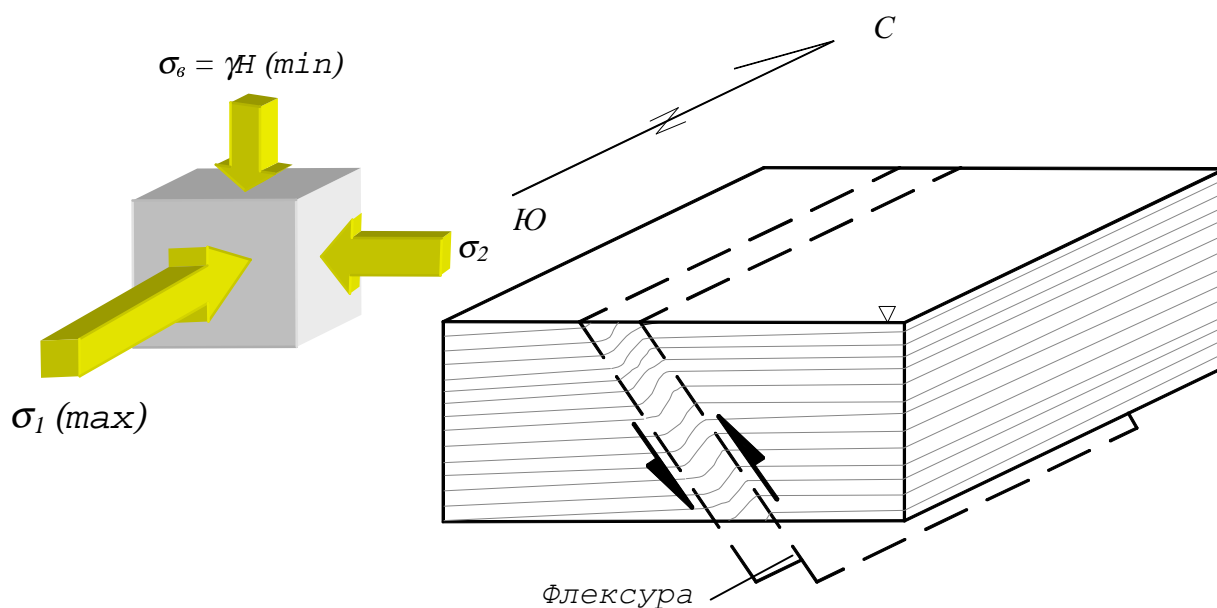
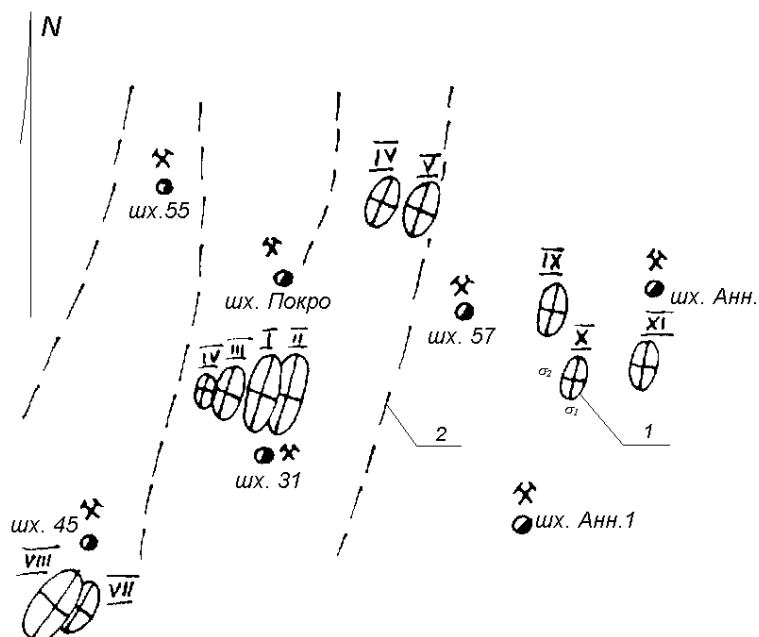


Рис. 1. Характер исходного природного напряженного состояния массива Жезказганского месторождения

Если основные особенности природного поля напряжений сохраняются на всей площади Жезказганского месторождения, то величины действующих горизонтальных напряжений варьируют в широких пределах. Это связано с неравномерностью трещиноватости массива. Чем выше интенсивность трещиноватости, тем меньше модуль упругости массива и ниже уровень действующих в массиве природных тектонических напряжений. На рис. 2 схематично представлены результаты определения природных горизонтальных напряжений на площади Жезказганского месторождения.

Рис. 2. Результаты определения природного поля напряжений на Жезказганском месторождении: 1 – эллипсы, характеризующие соотношение горизонтальных напряжений; 2 – флексурные зоны



#### 2.4. Виды природного напряженного состояния на других рудниках

Часто для удобства величину максимальных горизонтальных напряжений выражают через вертикальное гравитационное давление  $\gamma H$  в виде коэффициента бокового давления:  $\lambda = \sigma_1 / (\gamma H)$ .

*Примечание.* Не надо путать коэффициент бокового давления и коэффициент бокового распора. Коэффициент бокового давления в массиве может быть и больше и меньше 1 в зависимости от уровня тектонических напряжений. Коэффициент бокового распора всегда меньше 1 и зависит только от коэффициента Пуассона горных пород. Коэффициенты бокового давления и бокового распора равны между собой только в одном случае: если в массиве нет тектонических напряжений, и горизонтальные напряжения создаются только за счет вертикального давления толщи пород.

Соотношения природных горизонтальных и вертикальных напряжений на других месторождениях, разработку которых ведет корпорация «Казахмыс», показано на рис. 3.

На **Орловском месторождении** (рис. 3а), разработку которого ведет Жезкентский ГОК, мощные наклонные залежи богатых полиметаллических руд окружены «рубашкой» гидротермально измененных, неустойчивых пород. По сумме признаков, наблюдаемых в горных выработках Орловского рудника, установлено, что природное напряженное состояние массива является гидростатическим с  $\lambda = 1$ . Это означает, что до начала горных работ действующие в массиве вертикальные и горизонтальные напряжения равны между собой (как в покоящейся жидкости).

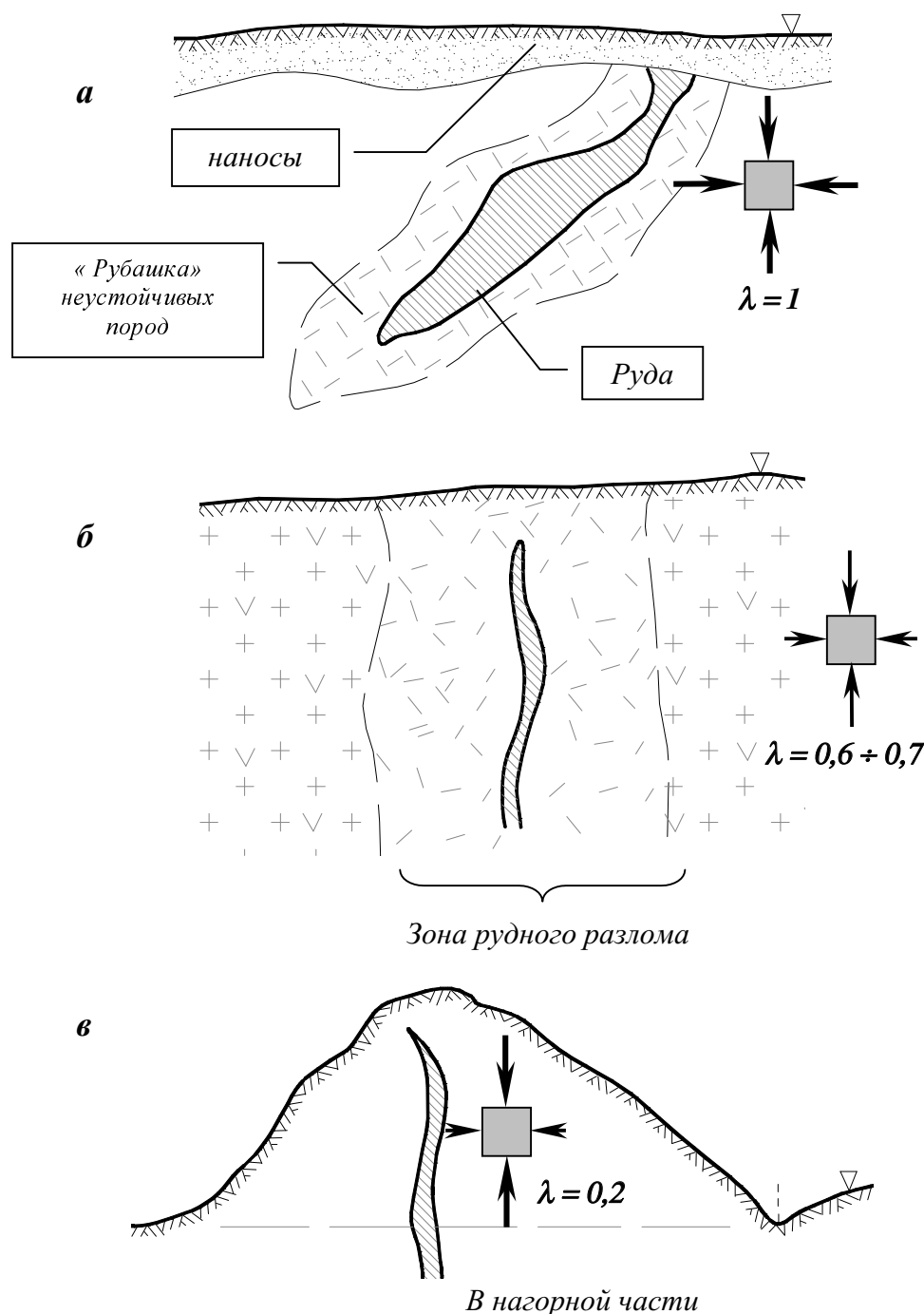


Рис. 3. Виды напряженного состояния массива на рудниках корпорации «Казахмыс»

**Иртышское месторождение** полиметаллических руд (рис. 3б) представлено крутопадающими залежами, расположенными в зоне крупного тектонического разлома мощностью до нескольких сотен метров. Расчетами установлено, что коэффициент бокового давления в природном состоянии массива равен  $\lambda = 0,6 \div 0,7$ . Т.е. вкрест простирания рудных залежей в массиве присутствуют тектонические напряжения, но их величина не столь значительна, как, например, на Жезказганском месторождении.

**Юбилейно-Снегирихинское месторождение** (рис. 3в), разработку которого ведет филиал ВостокКазмедь, является месторождением нагорного типа (расположено в горах и вскрыто штольнями). В нагорной части выше уровня дна долин в массиве



отсутствуют тектонические напряжения, а горизонтальное давление определяется только боковым распором от действия собственного веса толщи пород. При среднем коэффициенте Пуассона пород  $\nu = 0,16$  уровень горизонтальных напряжений характеризуется  $\lambda = \nu/(1-\nu) = 0,2$ . В дальнейшем, при опускании горных работ ниже дна долин в массиве появятся тектонические напряжения.

### **3. Проявления горного давления при проходке подготовительных выработок**

#### **3.1. Формы разрушения выработок**

Проходка выработок, которыми залежи готовятся к очистной выемке, является первой стадией горных работ. В зависимости от природного напряженного состояния массива, в котором ведется проходка, проявления горного давления в виде разрушений контура выработок могут быть различными. Рассмотрим возможные варианты форм разрушения выработок.

**В массиве отсутствуют горизонтальные тектонические напряжения**, а максимальными по величине являются вертикальные напряжения  $\gamma H$ . Данное напряженное состояние массива характеризуется коэффициентом бокового давления  $\lambda < 1$ . В этом случае максимальной деформацией является вертикальное сжатие выработки. Поэтому после перераспределения исходных напряжений в бортах выработки формируются зоны концентрации напряжений, а в кровле и в почве – зоны их разгрузки (рис. 4а). Если действующие напряжения достигнут прочности массива на сжатие (на большой глубине или при малой прочности массива), то разрушение выработки будет происходить в бортах, как это показано на рис. 4а.

**Максимальными по величине в массиве являются горизонтальные тектонические напряжения**, которые превышают гравитационное давление толщи пород  $\gamma H$ . Это означает, что коэффициент бокового давления  $\lambda > 1$ . За счет горизонтального сжатия максимальной деформацией является сближение боковых стенок выработки. При этом зоны концентрации напряжений образуются в кровле и в почве выработки, а зоны разгрузки – в бортах (рис. 4б). Поэтому зоны разрушения будут локализованы в кровле и в почве выработки. После обрушения раздавленных пород контур выработки приобретает вид шатра (породам, раздавленным в почве выработки некуда обрушаться, поэтому они остаются в почве). Часто разрушение пород в кровле выработок при наличии в массиве высоких тектонических напряжений происходит в резкой динамической форме (стреляний).

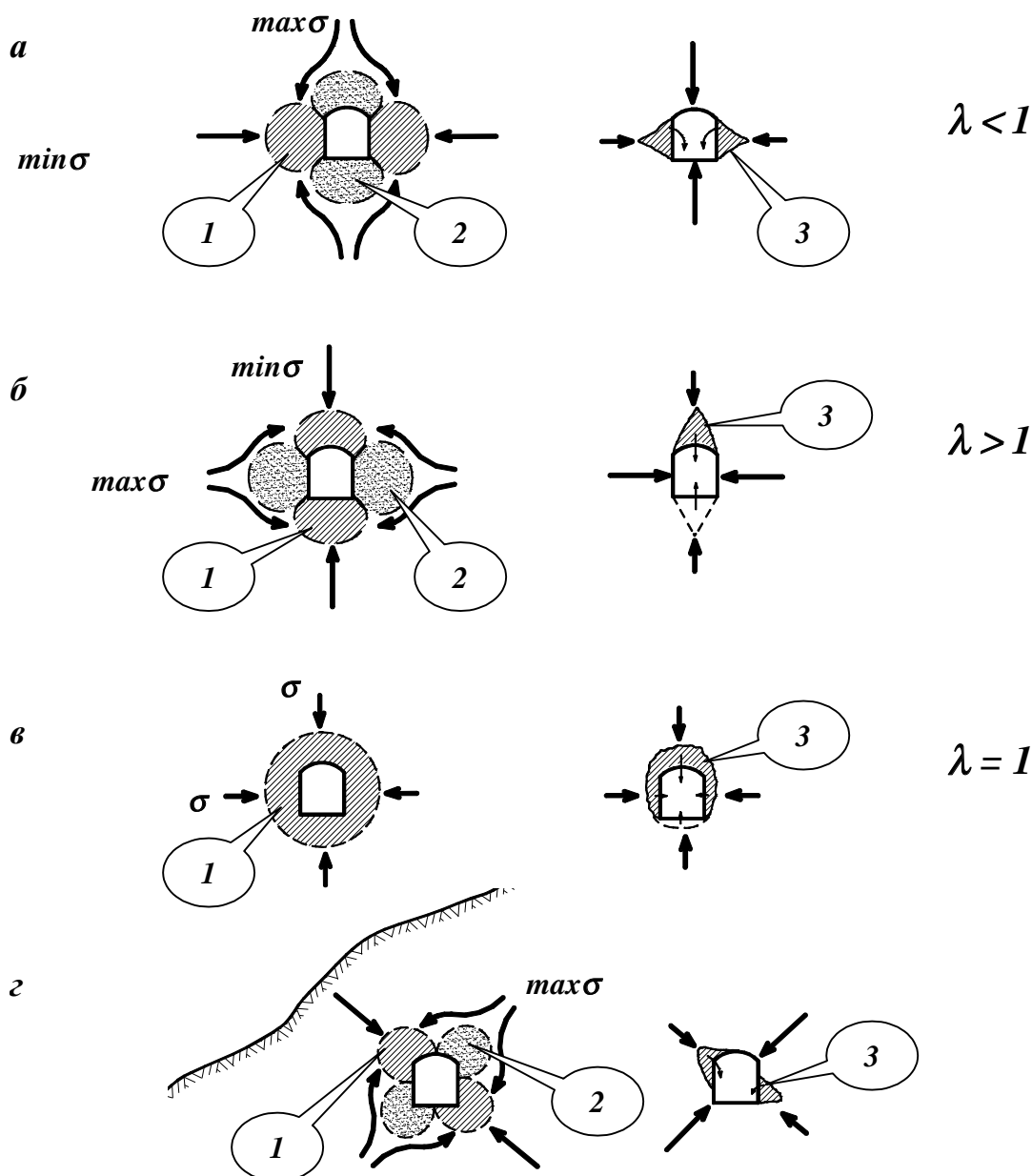


Рис. 4. Формы разрушения выработок при различных напряженных состояниях массива. Зоны: 1 – концентрации напряжений; 2 – разгрузки напряжений; 3 – разрушений контура.

**Исходное напряженное состояние массива является гидростатическим**, т.е. вертикальные и горизонтальные напряжения равны между собой и составляют  $\gamma H$  (т.е.  $\lambda = 1$ ). Деформации контура выработки в этом случае во всех направлениях будут примерно одинаковыми, а зона концентрации напряжений охватывает весь периметр выработки (рис.4в). Максимальные напряжений, действующие на контуре выработки после перераспределения, равны  $2\gamma H$  \* (т.е. коэффициент концентрации равен 2). Поэтому на большой глубине разрушение выработки будет происходить равномерно по всему контуру.

\* Примечание. По условию достижения действующими напряжениями, равными  $2\gamma H$ , прочности массива на сжатие  $\sigma_m$  легко определить понятие «большая глубина». Для этого надо задать условие:  $2\gamma H \geq \sigma_m$ . Отсюда получаем значение «большой глубины»:  $H_0 \geq \sigma_m / (2\gamma)$ . На «больших глубинах» выработки должны проходиться с несущей крепью.



**При проходке выработок под горными склонами** максимальные напряжения ориентированы примерно параллельно склону. Поэтому расположение зон концентрации и разгрузки напряжения оказывается повернутым, как это показано на рис.4г. Разрушаясь, контур выработки приобретает несимметричную форму.

<b>Совет геомеханика</b>	<i>Проходя по выработкам, наблюдай: где происходят разрушения и отслоения пород (в кровле? в бортах?). Если выработка разрушается в кровле, то максимальное давление в массиве горизонтально и действует вкрест оси выработки. Если разрушаются борта выработки, то это проявление вертикального давления, а горизонтальное давление в массиве меньше. Если и борта и кровля выработки разрушаются примерно одинаково, то это признак равного давления со всех сторон. Наблюдай. Это тебе пригодится!</i>
--------------------------	---

### 3.2. Устойчивость выработок разного направления

При наличии тектонических напряжений горизонтальное сжатие массива в разных направлениях в плане, как правило, различается в несколько раз. Например, на Жезказганском месторождении горизонтальное давление вдоль флексур в 2÷3 раза больше, чем вкрест флексур. Поэтому выработки, проходимые вкрест флексур (т.е. вкрест направления действия в массиве максимальных тектонических напряжений) разрушаются с образованием в кровле шатрового свода, а выработки, проходимые вдоль простирания флексур сохраняют устойчивость (т.к. они проходятся вкрест направления меньшего горизонтального давления).

Таким образом, устойчивость выработок зависит от направления их проходки относительно направления действия в массиве максимальных напряжений. Существует некоторый **критический угол  $\alpha_{кр}$**  между осью выработки и направлением максимального давления в массиве. Если угол  $\alpha$  между осью выработки и направлением действия в массиве максимальных напряжений (для условий Жезказганского месторождения это угол с направлением простирания ближайшей флексурной зоны) меньше критического  $\alpha_{кр}$ , то выработка сохраняет устойчивость. Если  $\alpha \geq \alpha_{кр}$ , то выработка с таким направлением проходки будет разрушаться.

Значение критического угла встречи оси выработки и максимальных напряжений  $\alpha_{кр}$  можно установить наблюдениями в шахте. Для этого необходимо найти выработку с изменяющимся направлением проходки (рис. 5а), в которой на некотором интервале кровля раздавлена горизонтальным давлением до шатрового свода. На маркшейдерский план надо вынести границы (начало  $A$  и конец  $B$ ) участка разрушения. Далее на плане необходимо выполнить следующие геометрические построения:

- найти центр  $O$ , из которого с радиусом  $R$  можно описать направление выработки в интервале  $AB$ ;
- соединить начало  $A$  и конец  $B$  участка разрушения с центром  $O$  прямыми линиями; получится угол  $AOB$ ;





- провести биссектрису угла  $AOB$ ; получим линию  $OC$ , которая является направлением действия в массиве максимальных напряжений  $\max\sigma$ ;
- найти критический угол встречи  $\alpha_{кр}$ , как угол между осью выработки в точках  $A$  и  $B$  и направлением действия в массиве максимальных напряжений  $\max\sigma$ .

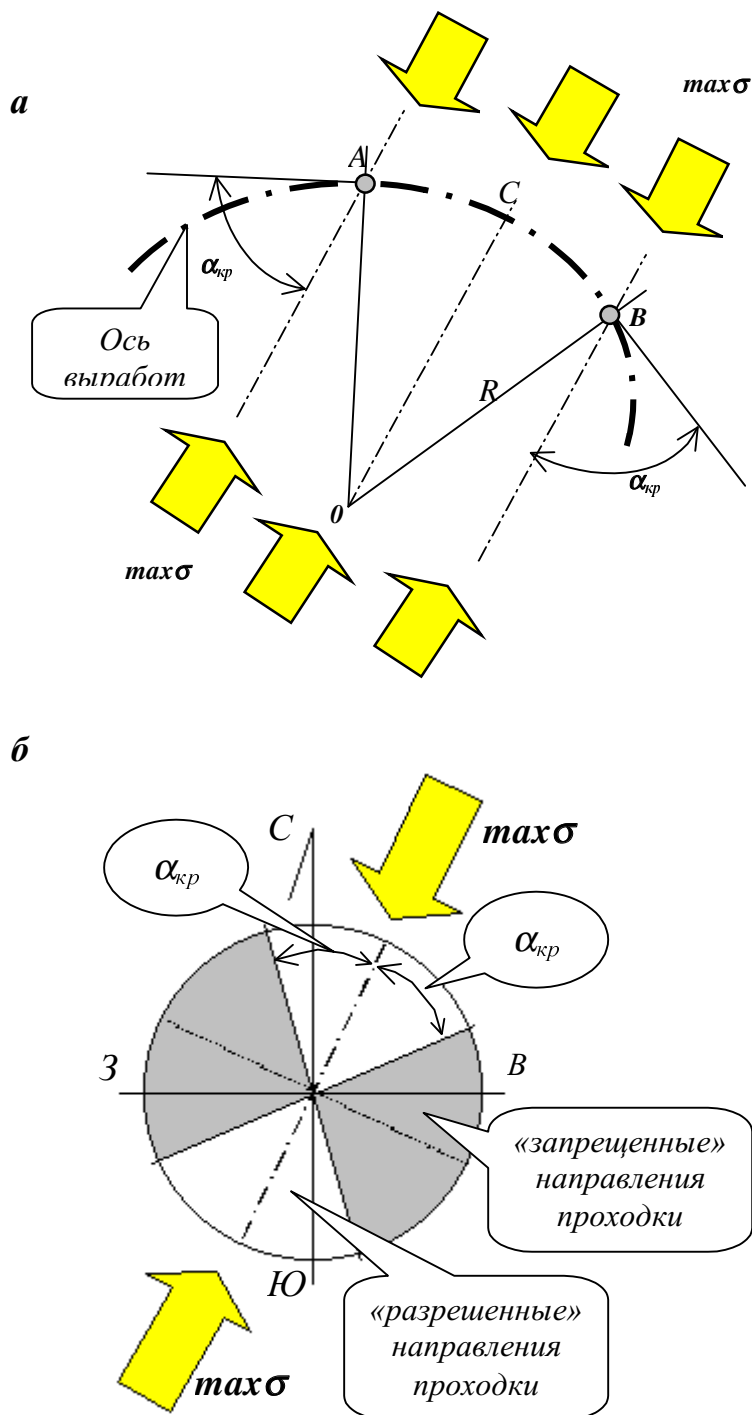


Рис. 5. Нахождение критического угла встречи между осью выработки и направлением действия в массиве максимальных напряжений (а) и диаграмма устойчивости выработок различного направления (б)



Полученный результат можно использовать, если построить **диаграмму устойчивости выработок** разного направления в плане (рис. 5б). Для этого нужно:

- провести окружность и нанести на нее стороны света (север, юг, восток, запад); полный круг окружности означает все возможные направления проходки выработок с азимутами от  $0^\circ$  до  $360^\circ$ ;
- нанести на диаграмму направление действия в массиве максимальных напряжений  $\max \sigma$ ;
- от направления  $\max \sigma$  в обе стороны отложить критический угол  $\alpha_{кр}$  и провести диаметры окружности;
- заштриховать сектора, для которых  $\alpha \geq \alpha_{кр}$ ; сектора с такими азимутами представляют собой «запрещенные» направления проходки; оставшиеся не заштрихованными сектора означают «разрешенные» направления проходки, в которых  $\alpha < \alpha_{кр}$ .

Построенная диаграмма означает следующее. Проходка выработок в «запрещенных» направлениях будет сопровождаться разрушениями кровли с образованием шатрового свода, возможно, в динамической форме – в виде стреляний. В «разрешенных» направлениях видимых проявлений горного давления не будет.

<b>Совет геомеханика</b>	<i>При появлении признаков раздавливания пород в кровле выработок, проходимых вкрест простирания флексур, поднимай вопрос об изменении направления проходки. Возможно, найдется вариант попасть в «разрешенное» направление.</i>
------------------------------	--

Поэтому при появлении признаков разрушения выработки в кровле необходимо найти критический угол встречи, построить диаграмму устойчивости и изыскать варианты изменения направления проходки, чтобы попасть в «разрешенный» сектор.

### 3.3. Закономерности проявлений горного давления на различных стадиях горных работ

Практический опыт ведения горных работ на глубоких горизонтах Жезказганском месторождении показал следующие закономерности проявлений горного давления:

✓ На стадии подготовки залежей - при проходке одиночных выработок наблюдается максимальная интенсивность динамических проявлений горного давления в виде стреляний, микроударов, толчков. Причем, не во всех выработках, а в основном, в выработках субширотного направления (близкого к направлению восток-запад), т.е. в тех, которые проходятся вкрест направления действия в массиве максимальных тектонических напряжений.

✓ В начальной стадии очистных работ - при расколке разрезного штрека и образовании первых очистных камер и целиков динамические явления затухают, а основной формой проявления высокого горизонтального давления становится



заколообразование и интенсивные отслоения кровли камер, которые часто бывают внезапными и по всей площади камер.

✓ На стадии полного развития очистной выемки, когда пролет выработанного пространства достигает ширины панели и во много раз превышает выемочную мощность залежи, горизонтальное давление теряет разрушающую силу и становится положительным фактором, повышающим устойчивость кровли камер. Именно поэтому после разрушения отдельных междукамерных целиков (МКЦ) кровля камер не обрушается. На данной стадии основной формой проявления горного давления становится деформирование и разрушение МКЦ под действием вертикальной нагрузки, приходящейся на них после отработки камер.

✓ На стадии повторной разработки процессы деформирования и разрушения МКЦ за счет перераспределения вертикального давления с извлеченных МКЦ на оставшиеся становятся более активными. Горизонтальный зажим толщи пород тектоническими напряжениями затрудняет ее обрушение. Погашение выработанного пространства обрушением налегающих пород становится возможным только при большой площади обнажения неподдерживаемой кровли.

Данная тенденция постепенного затухания динамических проявлений горного давления по мере развития горных работ свидетельствует, что основной причиной удароопасности является высокий уровень тектонических напряжений в массиве горных пород. Причем, максимальные тектонические напряжения действуют горизонтально в субмеридиональном направлении. Именно поэтому выработки, совпадающие с этим направлением, сохраняют устойчивость, а выработки перпендикулярного направления - разрушаются. Расположение зон разрушения в кровле, в почве, в забое свидетельствует о максимальном сжатии в горизонтальном направлении тектоническими напряжениями.

<b>Совет геомеханика</b>	<i>Если при подготовке залежи (панели) выработки субширотного направления (вкрест простирания флексур) разрушались в кровле с образованием шатрового свода, то в начале очистных работ следует ожидать интенсивных отслоений кровли камер, особенно – в передовых (рис. 6а). Чтобы сделать проявления горного давления минимальными, держи и подвигай забои камер по одной линии вдоль действия в массиве максимальных тектонических напряжений (рис. 6б).</i>
------------------------------	--

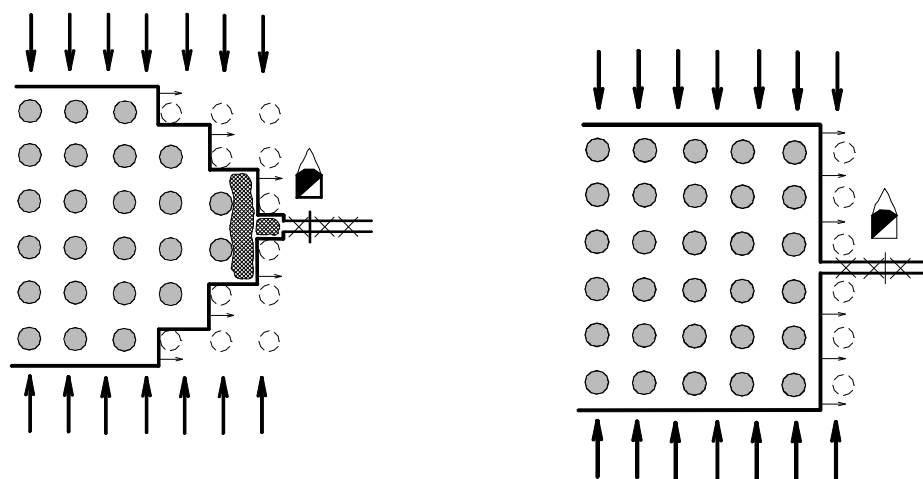


Рис. 6. Отслоения кровли в передовых камерах (а) и рациональная конфигурация фронта очистной выемки (б) при действии в массиве высоких тектонических напряжений

### 3.4. Устойчивость штреков во флексурных зонах

Флексуры представляют собой зоны тектонических подвижек, которые происходили под действием вертикальных перемещений блоков кристаллического фундамента в толще осадочных пород в период, когда рыхлые пески, супеси, глины были не до конца литофицированы в крепкие скальные песчаники, алевролиты, аргиллиты, с которыми мы имеем дело сейчас, а были пластичными полускальными породами.

В процессе формирования флексур происходили межпластовые и внутрипластовые проскальзывания слоев между собой, которые оперялись более мелкими секущими трещинами, согласными с направлением поверхностей сдвига. В настоящее время флексуры – это наиболее сильно нарушенные зоны массива, в которых интенсивно развиты крупные крутопадающие зеркала скольжения с бороздами скольжения, заполненные глиной трения, жильными минералами (чаще всего, кальцитом), а также множество мелких секущих трещин. Причем, подавляющее число зеркал скольжения и трещин имеет

простираение, согласное с простираем флексуры. За счет сильной структурной нарушенности тектонические напряжения во флексурных зонах существенно ниже, чем на пологих участках месторождения.

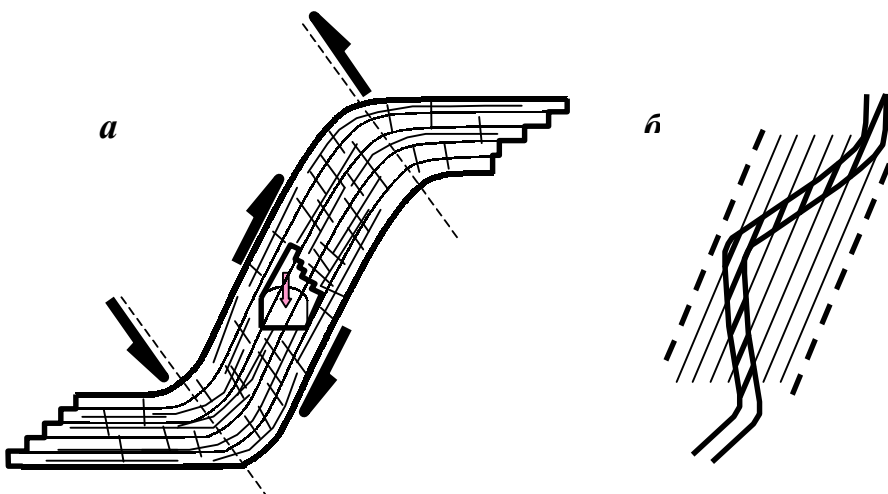


Рис. 7. Форма разрушения штреков во флексуре (а) и обеспечение устойчивости проходкой штрека зигзагом (б)

Проходка штреков по простираению флексурных зон сопровождается интенсивными вывалами блоков пород из кровли и бортов



(рис. 7а). Основной причиной обрушений являются наклонные и крутопадающие зеркала скольжения, по которым практически отсутствует сцепление и очень маленькое трение. Осложняет ситуацию совпадение простирания крупных трещин и зеркал скольжения с осью штрека. За счет этого крутопадающие поверхности ослабления массива подсекаются и обнажаются в кровле и бортах на всей протяженности штрека в десятки и сотни метров. Удержать такую кровлю анкерной крепью очень трудно, а часто и просто невозможно (при больших углах падения флексуры).

В то же время с устойчивостью ортов, пересекающих флексуры вкрест простирания, проблем не возникает. Дело в том, что те же крутопадающие поверхности скольжения и крупные трещины подсекаются на протяжении не длины, а ширины орта в пределах первых метров. При таких обнажениях устойчивость массива, раздробленного крутопадающими и секущими трещинами на блоки, в кровле орта обеспечивается на счет их заделки в бортах орта.

<b>Совет геомеханика</b>	<i>Если при проходке штрека по простиранию флексуры происходят интенсивные вывалы блоков из кровли и борта со стороны лежащего бока, то для обеспечения безопасности проходку штрека надо вести не прямо по простиранию флексуры, а зигзагом от лежащего бока к висячему. Чем больше угол поворота зигзага от простирания флексуры, тем лучше будет кровля, тем проще ее крепить, тем безопаснее под ней работать.</i>
------------------------------	--

#### **4. Управление горным давлением при разработке пологих и наклонных залежей камерно-столбовой системой**

Подземная разработка Жезказганского месторождения ведется тремя системами:

- камерно-столбовой системой со шпуровой отбойкой на пологих и наклонных залежах средней и большой мощности – примерно 85% от всего объема добычи;
- системой подэтажных штреков со скважинной отбойкой во флексурных зонах – порядка 5% объема;
- системой с управляемым самообрушением налегающих пород при повторной разработке целиков – около 10%.

Т.е. основной объем подземной добычи руды приходится на камерно-столбовую систему разработки.

##### 4.1. Принцип управления горным давлением

Управление горным давлением при камерно-столбовой системе разработки осуществляется **поддержанием открытого выработанного пространства и всей налегающей толщи до поверхности рудными целиками, оставляемыми в выработанном пространстве на длительный срок.** Основные параметры системы



разработки – сетка оставления целиков, их размеры (ширина или диаметр), пролеты очистных камер в свету должны обеспечить

- ✓ безопасность горных работ в открытом выработанном пространстве;
- ✓ условия для эффективного применения высокопроизводительного самоходного добычного оборудования;
- ✓ минимальные потери и разубоживание руды.

Общая схема подхода к определению рациональных параметров системы разработки (т.е. таких параметров, при которых одновременно выполняются все перечисленные требования) состоит в следующем:

1) находят допустимые пролеты очистных камер, при которых кровля с заданным коэффициентом запаса сохраняет устойчивость; т.к. горные работы ведутся в открытом выработанном пространстве под обнаженной кровлей, то коэффициент запаса прочности принимается равным 3;

2) выбирают форму поддерживающих целиков (ленточную или столбчатую с круглым или прямоугольным сечением) и шаг сетки оставления целиков в выработанном пространстве; размер сетки целиков определяется, как допустимый пролет очистных камер в свету плюс ширина целика;

3) выбирают конструкцию системы разработки из следующих возможных вариантов: сплошная отработка залежей небольших размеров без деления на выемочные единицы; камерно-столбовая система с делением на выемочные единицы барьерными (ленточной формы) или массивными (круглой или прямоугольной формы) целиками;

4) в зависимости от принятой конструкции системы разработки определяют нагрузку, которую должны выдерживать целики с заданным коэффициентом запаса прочности; для междукammerных целиков (МКЦ) проектный коэффициент запаса прочности принят равным 2, для барьерных (БЦ) и массивных (МЦ) целиков – 3;

5) по проектной нагрузке на целик и заданному коэффициенту запаса находят диаметр круглых МКЦ, МЦ и ширину ленточных БЦ.

#### 4.2. Допустимые пролеты очистных камер

Определение размеров устойчивых обнажений пород в кровле очистных выработок является чрезвычайно сложной задачей, не имеющей до настоящего времени приемлемого аналитического решения. Наиболее надежным способом определения параметров устойчивых обнажений служат производственные эксперименты. Сущность таких экспериментов заключается в постепенном увеличении пролетов камер до предельных, устанавливаемых по критическому состоянию кровли (до первого обрушения кровли или до заданной величины ее прогиба).

Подобными экспериментами и практикой горных работ установлено, что на Жезказганском месторождении устойчивыми являются пролеты камер:



- 15 м, если кровля представлена серыми песчаниками;
- 12÷13 м, если кровля сложена красноцветными породами.

На Белоусовском руднике при разработке пологих участков залежей камерно-столбовой системой устойчивые пролеты камер по многолетнему практическому опыту составляют 7÷8 м.

Локальные отслоения кровли, происходящие из-за структурной нарушенности массива трещинами, предотвращаются креплением кровли. В зависимости от категории устойчивости кровля очистных камер может крепиться анкерной или комбинированной (анкера плюс торкретбетон) крепью. Тип крепи, ее плотность (шаг установки), длина анкеров и толщина слоя торкретбетона, допустимое отставание крепи от забоя определяются инструкцией по креплению.

#### 4.3. Сетка расположения целиков

Промышленная разработка Жезказганского месторождения началась на верхних горизонтах в 30-х годах прошлого века с нерегулярным оставлением МКЦ. Вопрос, где оставлять целик, с каким диаметром и с каким пролетом отрабатывать камеру, оставлялся на усмотрение горного мастера. Он решал эти вопросы на месте, сообразуясь с собственным опытом и визуальной оценкой устойчивости кровли. После отработки камерных запасов многие из ранее оставленных целиков извлекались в выборочном порядке. Зачастую, даже после разрежения сетки целиков и увеличения пролетов вдвое кровля сохраняла свою устойчивость. Так пополнялся опыт о допустимых пролетах обнажения кровли.

Позднее, многие десятилетия разработка Жезказганского месторождения велась, в основном, с оставлением столбчатых междукamerных целиков круглого сечения по сетке 20×20 м. С переходом горных работ на большие глубины из-за увеличения горного давления и проектных размеров МКЦ перешли на сетку 22×22 м, чтобы пролеты камер в свету были не менее 12 м.

При отработке запасов предохранительных целиков под охраняемыми объектами на земной поверхности оставляют междукamerные целики ленточной формы. Сетка оставления ленточных целиков определяется допустимым пролетом камеры плюс ширина целика.

При разработке перекрывающихся в плане залежей на расположение МКЦ накладывается еще одно ограничение: при малой мощности породного междупластья (меньше 30 м) МКЦ на перекрывающихся залежах должны быть соосны (т.е. оси целиков должны располагаться попарно по одной вертикальной линии). Это требование выполняется, если принять для всех перекрывающихся залежей единый размер сетки целиков. Поэтому и в настоящее время при разработке перекрывающихся залежей МКЦ оставляют по сетке 20×20 м. На одиночных залежах сетка целиков может быть расширена до  $(l + d)$ , где  $l$  – устойчивый пролет



камеры в свету (15 м или 12 м в зависимости от типа пород кровли);  $d$  – диаметр МКЦ.

На Белоусовском руднике, где породы кровли имеют среднюю устойчивость (т.е. допускают обнажение кровли на площади до 400 м<sup>2</sup>), столбчатые МКЦ на пологих участках залежей оставляют по сетке 10×10 м.





#### 4.4. Принципы определения нагрузки на целики

Существует несколько подходов к определению нагрузок на целики. Каждый из них отражает какую-то одну особенность процесса нагружения МКЦ. И только соединив эти принципы в один комплексный подход, можно находить нагрузки на целики в различных геомеханических ситуациях.

**Нагружение МКЦ в режиме заданной нагрузки от веса налегающей толщи** реализуются на обширных залежах (при больших пролетах подработки налегающей толщи  $L$ ) при малой глубине разработки  $H$ . Традиционно данные условия нагружения формализуются соотношением  $L / H \geq 1$  (т.е. пролет выработанного пространства больше или равен глубине). Если все целики одинаковые (чего на практике никогда не бывает), то нагрузка  $N$  на столбчатый целик определяется весом пород на площади  $S$ , которую он поддерживает (рис. 8а):

$$N = \gamma HS.$$

Чтобы найти действующие в целике вертикальные напряжения  $\sigma$ , надо разделить нагрузку  $N$  на площадь  $F$  поперечного сечения МКЦ:

$$\sigma = N/F = \gamma HS/F.$$

Если столбчатые МКЦ располагаются по сетке  $20 \times 20$  м, то площадь  $F$ , поддерживаемая одним целиком (грузовая площадь), равна  $400 \text{ м}^2$ . Если на глубинах более 400 м МКЦ оставляются по сетке  $22 \times 22$  м, то  $F = 484 \text{ м}^2$ .

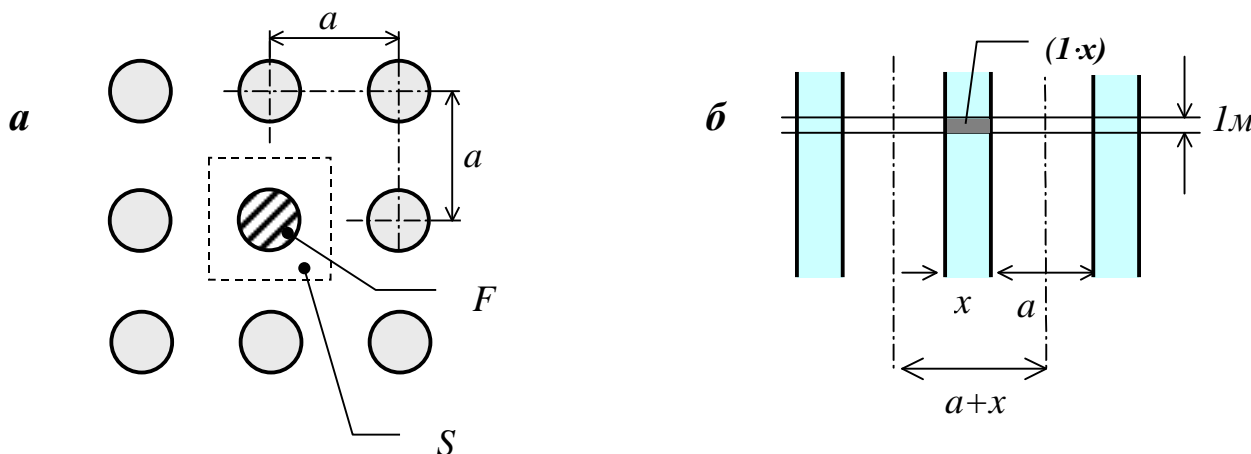


Рис. 8. Принцип определения площадей кровли, поддерживаемых столбчатыми (а) и ленточными (б) междуканнерными целиками

Для ленточных целиков шириной  $x$  нагрузку  $N$ , приходящуюся на 1 пог.м длины целика (рис. 8б) определяют по формуле:

$$N = \gamma H(a + x) \cdot l.$$

Тогда действующие в целиках вертикальные напряжения находят по формуле:

$$\sigma = N/(l \cdot x) = \gamma H(a + x)/x.$$



На залежах с ограниченными пролетами  $L$  на большой глубине  $H$  (при  $L / H < 1$ ) **нагружение МКЦ происходит в режиме заданных вертикальных смещений** от прогиба кровли и поднятия почвы выработанного пространства (рис. 9а). Оседание кровли и поднятие почвы  $\Delta''$  происходит в результате разгрузки вертикального гравитационного давления  $\gamma H$  на обнаженных поверхностях кровли и почвы отработанных очистных камер. Сближение (конвергенция) кровли и почвы ( $\Delta' + \Delta''$ ) на границах выработанного пространства можно принять нулевым. Максимальные смещения происходят в центре выработанного пространства.

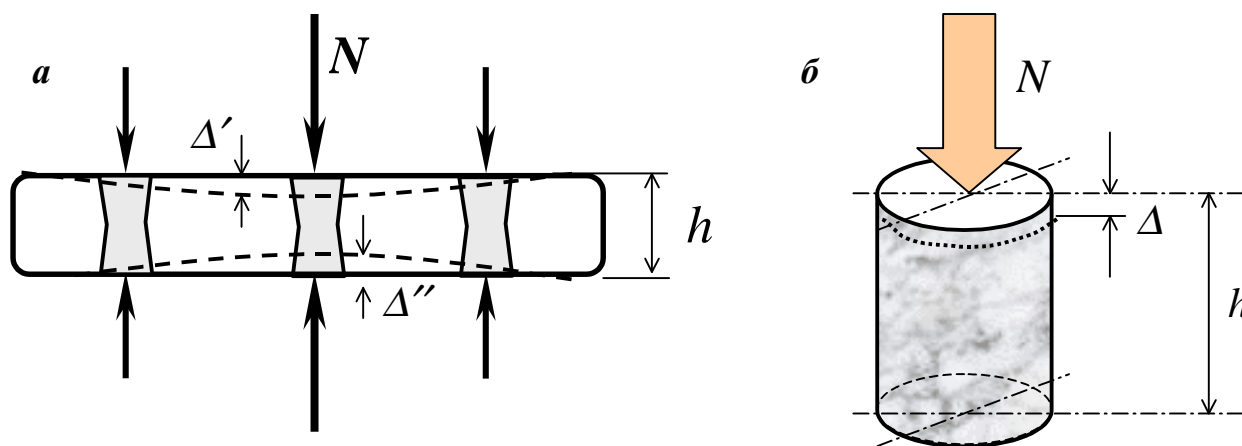


Рис. 9. Схемы к расчету нагрузок на МКЦ по принципу совместности деформаций целиков и вмещающих пород

Смещения вмещающих пород деформируют целики. Они сжимаются по вертикали и расширяются в горизонтальных направлениях. **Поэтому** вертикальное сжатие целика  $\Delta$  (абсолютная деформация, равная уменьшению его высоты  $h$ ) равно сближению кровли и почвы  $\Delta = \Delta' + \Delta''$ . **Поэтому** вертикальное сжатие целика приводит к возникновению нагрузки  $N$  на него. **Поэтому** нагрузки  $N$  на целики в центральной части выработанного пространства (где самые большие смещения вмещающих пород) больше, чем на границе с массивом (где конвергенция кровли и почвы минимальны).

Чтобы разобраться с этим, надо знать закон упругого деформирования (закон Гука). Он гласит: относительные деформации  $\varepsilon$  твердого тела прямо пропорциональны действующим в нем напряжениям  $\sigma$ , а коэффициентом пропорциональности является модуль упругости  $E$ :

$$\sigma = E\varepsilon.$$

Относительная деформация  $\varepsilon$  есть отношение  $\varepsilon = \Delta / h$ . В соответствии с законом Гука, чем больше действующие напряжения  $\sigma$  и меньше модуль упругости  $E$ , тем больше относительная деформация  $\varepsilon$ .

Представим МКЦ в виде упругого цилиндра высотой  $h$  с поперечным сечением  $F$  (рис. 9б). Действующие в целике напряжения можно найти, разделив нагрузку на



целик на его площадь:  $\sigma = N / F$ . Тогда для целика закон Гука примет вид:  $N / F = E \cdot \Delta / h$ . Или:

$$N = \Delta \cdot EF / h.$$

Величину  $EF / h$  называют жесткостью целика и обозначают  $G$ . Тогда нагрузку на МКЦ можно определять по формуле:

$$N = \Delta \cdot G$$

Последняя формула очень важна. Она означает следующее. Нагрузка на целик  $N$  прямо пропорциональна величине сжатия  $\Delta$  и его жесткости  $G$ . Следствиями этого являются:

- неравномерность нагружения целиков по площади выработанного пространства; центральные целики, наиболее удаленные от кромки массива или барьерных, массивных целиков, воспринимают на себя большую нагрузку, чем периферийные, в том числе и находящиеся вблизи забоя, т.к. смещения вмещающих пород больше в центре очистного пространства (рис. 9);
- прямая зависимость нагрузки на целик от его жесткости; чем жестче МКЦ (больше его площадь и меньше высота), тем большую нагрузку он воспринимает; если два рядом стоящих целика имеют разную жесткость, то большую нагрузку несет более жесткий МКЦ, у которого больше сечение и (или) меньше высота (рис. 10).

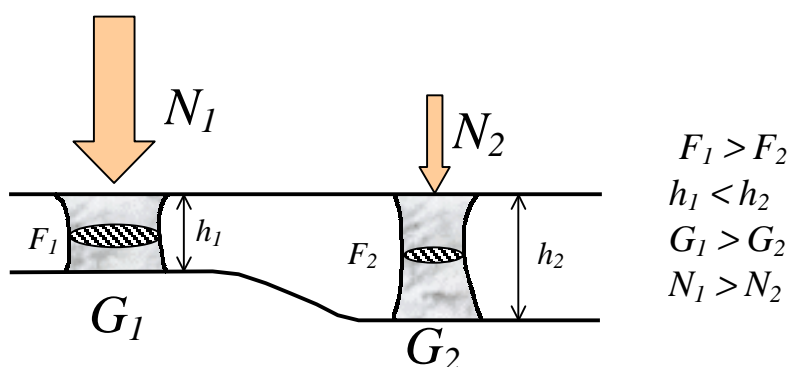


Рис. 10. Соотношение нагрузок на целики разной жесткости

#### Советы геомеханика

- Будь особенно аккуратен с целиками в центре панели. Они несут большую нагрузку.
- Не стремись увеличивать сечение целиков сверх проектного. Они станут более жесткими, и будут воспринимать большую нагрузку.



#### 4.5. Коэффициент нагрузки на целики

Никто и никогда не оперирует с абсолютными величинами нагрузок на целики. Это неудобно. Чтобы нормировать величины нагрузок на целики  $N$  по глубине  $H$  и по площади кровли  $S$ , поддерживаемой одним МКЦ, используют коэффициент нагрузки  $K_n$ , равный

$$K_n = N / (\gamma HS).$$

Коэффициент нагрузки показывает, какую часть от полного веса налегающей толщи на площади  $S$  несет данный целик. Это безразмерная величина. Она может быть и меньше 1 и больше 1. Если целик воспринимает полный вес толщи пород до поверхности, то  $K_n = 1$ . Такое происходит при больших пролетах выработанного пространства  $L$  на малой глубине  $H$  (при  $L / H \geq 1$ ), а все оставленные целики одинаковы. Условие  $L / H \geq 1$  называют **условием полной подработки налегающей толщи**. Если целики разные (так оно и есть на практике), то у более жестких целиков  $K_n > 1$ , а у менее жестких (более податливых)  $K_n < 1$  даже в условиях полной подработки налегающей толщи.

Существуют компьютерные программы, которые позволяют рассчитывать распределение нагрузок между целиками по принципу совместности деформаций целиков и вмещающих пород. На рис. 11 в качестве примера показано расчетное распределение нагрузок между МКЦ в панели на глубине 300 м, поддерживаемой 6×15 рядов целиков, оставленных по сетке 20×20 м, при равных модулях упругости руды и вмещающих пород. Обобщенная эпюра нагрузок имеет вид некоторого свода с максимальными значениями в центре выработанного пространства. МКЦ, примыкающие к границе выработанного пространства, нагружены значительно меньше (на 30% - в середине длины панели, на 70% - в углах).

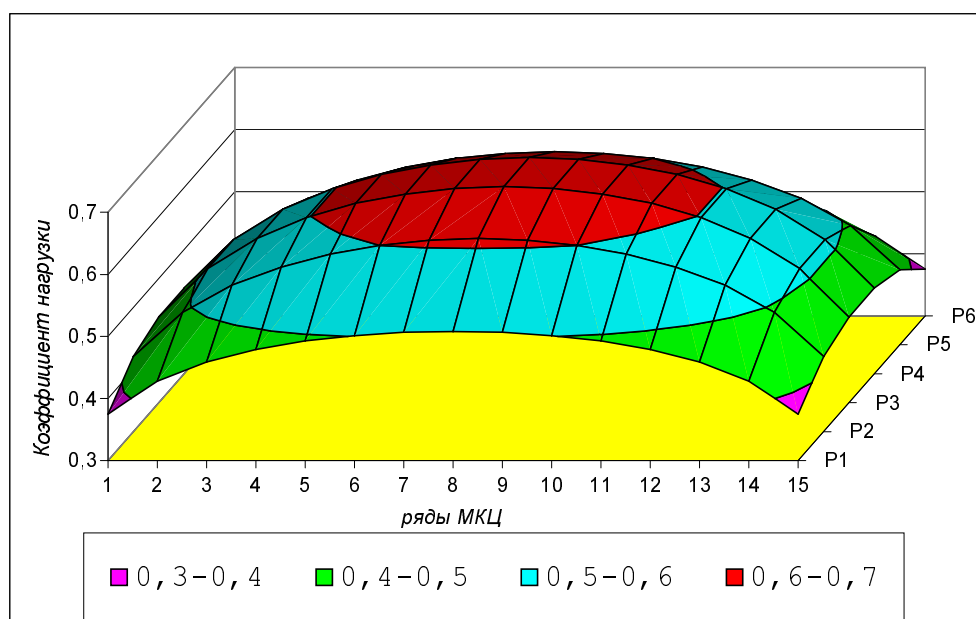


Рис. 11. Расчетное распределение нагрузок на целики в панели



Для проектирования первичной разработки залежей камерно-столбовой системой по данным геологической разведки (зачастую, недостаточно полным) при расчетах диаметров МКЦ используют средний коэффициент нагрузки на всю совокупность целиков в панели, который представляет собой отношение суммарной нагрузки на все целики к полному весу толщи пород над площадью выработанного пространства.

При проектировании повторной разработки фактические размеры всех оформленных целиков известны по маркшейдерским данным. Для расчетов устойчивости МКЦ необходимо определять фактические коэффициенты нагрузок на каждый целик с учетом места его расположения в выработанном пространстве и жесткости. Современные программные средства позволяют делать это.

Как показали расчеты, нагруженность МКЦ определяются большим количеством факторов, основными из которых являются:

- соотношение модулей упругости массивов вмещающих пород  $E_n$  и руды  $E_p$ ;
- размеры выработанного пространства в плане, которые удобно представлять в виде эквивалентного пролета  $L_3 = a \cdot b / (a^2 + b^2)^{0,5}$ , где  $a, b$  – длина и ширина панели;
- форма МКЦ в виде соотношения высоты  $h$  к диаметру  $d$ ;
- жесткость МКЦ  $G = EF/h$ .

Очень важным фактором является соотношения модулей упругости вмещающих пород и руды. На рис. 12 в логарифмическом масштабе показана зависимость среднего коэффициента нагрузки на МКЦ в панели с эквивалентным пролетом 128 м

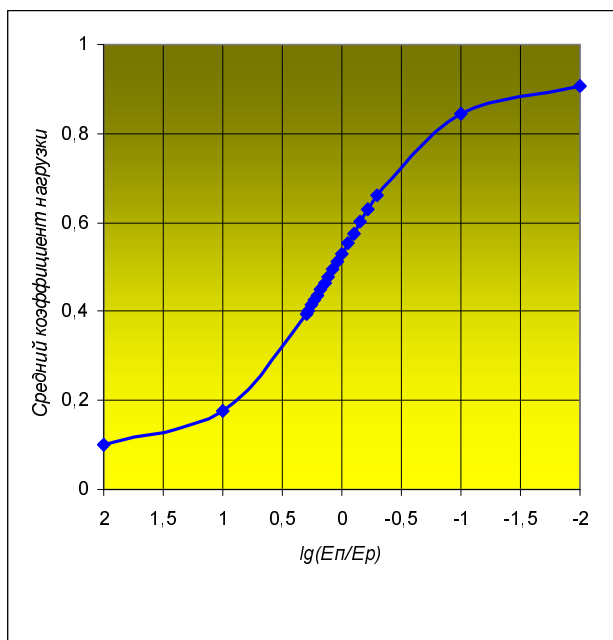


Рис. 12. Зависимость средней нагруженности МКЦ в панели от соотношения жесткостей налегающей толщи и руды

(6×15 рядов целиков, форма которых описывается соотношением  $h/d=0,9$ ) при соотношениях  $E_n/E_p$ , изменяющихся от 0,01 до 100.

В тех случаях, когда массив вмещающих пород обладает существенно большей жесткостью, чем руда, средняя нагруженность МКЦ составляет 10÷30% от полного веса пород до поверхности. Это связано с малой величиной прогиба «жесткой» толщи пород на контуре выработанного пространства. В условиях, когда вмещающая толща имеет существенно более низкие упругие свойства («мягкая» толща), чем руда, средняя нагруженность МКЦ увеличивается до 70÷90%, приближаясь полному весу столба пород до поверхности.



Массив Жезказганского месторождения представлен перемежающимися слоями (примерно, в равных долях) серых рудных и безрудных песчаников и красноцветных пород (красных песчаников, алевролитов, аргиллитов). Модуль упругости красноцветных пород, в среднем, в 2 раза ниже, чем у серых песчаников. Тогда эквивалентный модуль упругости слоистой толщи вмещающих пород составит 75% от модуля упругости серых песчаников. В этом случае средняя нагруженность МКЦ в панели типовых размеров приближается к 60% от давления полного веса пород до поверхности (см. рис. 12).

По результатам расчетов величины нагрузок на МКЦ в панели находятся в практически прямой линейной зависимости от эквивалентного пролета выработанного пространства. Кроме того, весьма существенное влияние оказывает форма целиков: чем меньше жесткость целиков (больше высота или меньше диаметры), тем ниже нагрузка на них.

#### 4.6. Управление горным давлением барьерными целиками

Чтобы снизить нагрузки на МКЦ, обширные залежи с большим размахом оруденения в плане разделяют на отдельные выемочные единицы – панели. Между ними оставляют жесткие барьерные целики (БЦ) ленточной формы. Их ширина 20÷30 м в зависимости от глубины и мощности залежи. Шаг оставления БЦ колеблется в пределах 100÷200 м, обычно составляя 150 м.

Суть идеи управления горным давлением барьерными целиками заключается в следующем. На обширных залежах можно создать **условия неполной подработки налегающей толщи** (т.е.  $L / H < 1$ ) за счет оставления целиков разной жесткости. Широкие барьерные целики обладают повышенной жесткостью и несущей способностью. Поэтому они способны воспринять на себя большую нагрузку. В этом случае нагрузки на МКЦ будут определяться не полным весом пород до поверхности, а только его частью. Коэффициент нагрузки на МКЦ будет меньше 1, т.к. часть нагрузки с них перераспределится на БЦ (рис. 13а). Оставление БЦ позволяет уменьшить сечение МКЦ и потери руды в них.

Ширину БЦ рассчитывают на поддержание веса всей толщи пород до поверхности на всей площади панели. Т.е. поддерживаемой площадью при расчете нагрузки на БЦ является площадь панели. Другой функцией барьерных целиков является локализация обрушений в случае разрушения МКЦ в пределах отдельных панелей. Поэтому при расчете их ширины используется коэффициент запаса прочности 3. МКЦ рассчитываются с коэффициентом запаса 2.

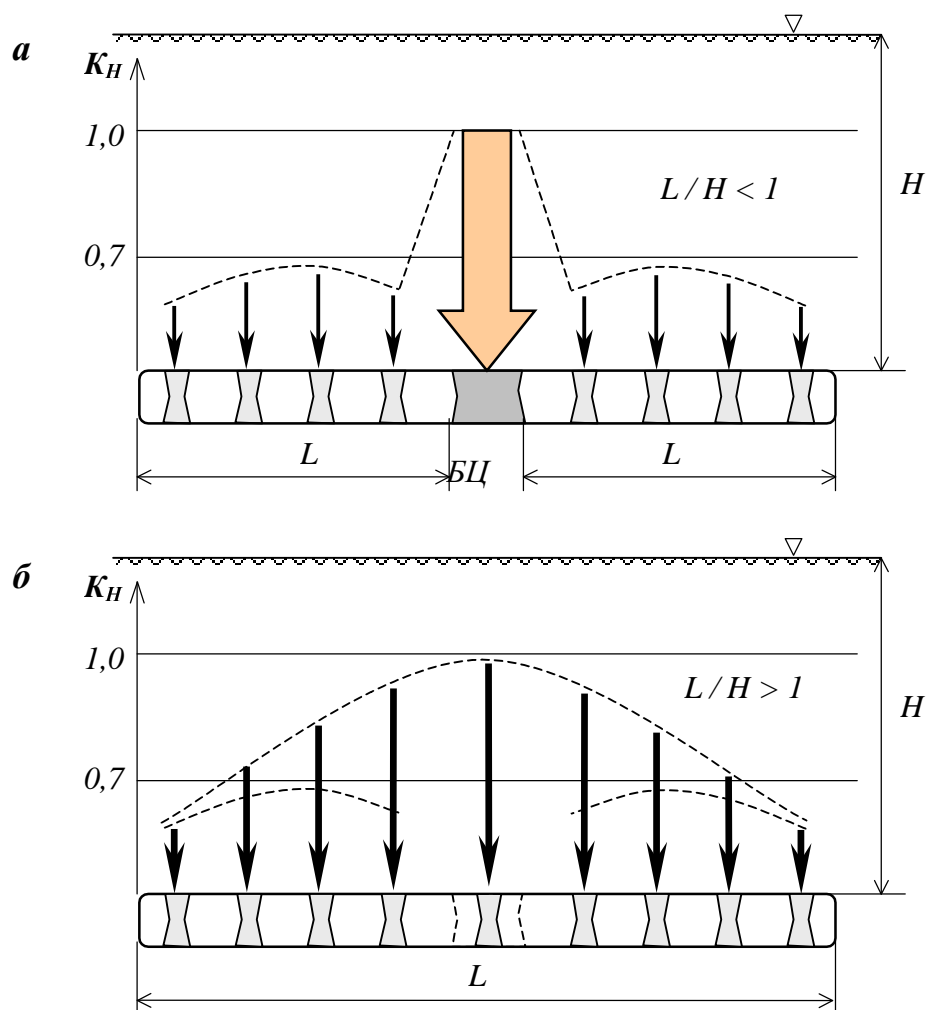


Рис. 13. Нагрузка на БЦ (а) и ее перераспределение при его отработке (б)

Если отработать БЦ до размеров столбчатых МКЦ, то меняются условия нагружения всех целиков. Возникают условия полной подработки (т.е.  $L / H \geq 1$ ), в которых нагрузки на центральные МКЦ приближаются к полному весу столба пород (рис. 13б). Если оставленные МКЦ не рассчитаны на такое давление, то они будут раздавлены.

**Совет  
геомеханика**

Прежде чем отработать барьерный целик (даже частично, даже просто прорезать), просчитай последствия. Имей в виду, междукammerные целики могут не выдержать. А в них может быть больше металла, чем в барьерном. Проектировщики это учитывают, когда определяют место БЦ. Хотя у них было гораздо меньше информации, чем у тебя.

#### 4.7. Перераспределение горного давления при почвоуступной отработке мощных залежей

Если мощность залежи больше 8 м, то ее отработку ведут почвоуступным забоем. В этом случае в панели одновременно имеются и низкие МКЦ, оформленные подсечкой на высоту одного слоя, и высокие МКЦ, оформленные после отработки уступа на высоту двух слоев.

Низкие целики, оформленные только на половину проектной высоты, но рассчитанные на конец отработки запасов на всю мощность залежи, обладают избыточной жесткостью. Поэтому нагрузка на них превышает проектную. Однако они не разрушаются, т.к. из-за малой высоты обладают несущей способностью, также превышающей проектную (рис. 14).

Нагрузка на высокие целики, оформленные двумя слоями на всю мощность залежи, после отработки уступа снижается до проектного уровня. Объемный вид расчетного распределения нагрузок между целиками при отработке уступа показан на рис. 15. Забой уступа постоянно подвигается, поэтому распределение нагрузок постоянно меняется.

В наиболее тяжелых условиях находятся целики, оформленные только подсечкой (первым слоем), в момент оформления их вторым слоем при отработке уступа. Они не только нагружены большим давлением, но и по всей высоте двух слоев подвергаются сейсмическому воздействию взрывных работ при отбойке руды в уступе. Именно в этот момент МКЦ получают наибольшие повреждения от суммарного воздействия высокого горного давления и взрывных работ. А так как забой уступа подвигается по всей панели, то в таких экстремальных условиях на разных стадиях оказываются все целики. Поэтому после отработки второго слоя состояние всех МКЦ оказывается весьма ослабленным.

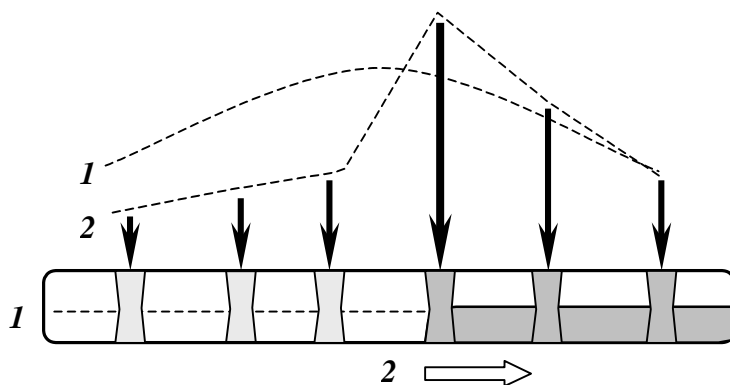


Рис. 14. Перераспределение нагрузок между МКЦ при отработке уступа: 1 – эюра распределения нагрузок после отработки первого слоя (подсечки); 2 – в процессе отработки второго слоя (уступа)

#### Советы геомеханика

- Будь особенно аккуратен, оформляя целики при отработке уступа. Они несут максимальную нагрузку среди всех целиков в панели. Отбивая руду в уступе, очень легко их разбить взрывом. Побереги его. Он тебе еще понадобится.
- Если после отработки уступа в почве осталась руда, то прежде, чем радоваться и отрабатывать еще один слой, поинтересуйся: на какую мощность рассчитаны целики? Возможны неожиданности.



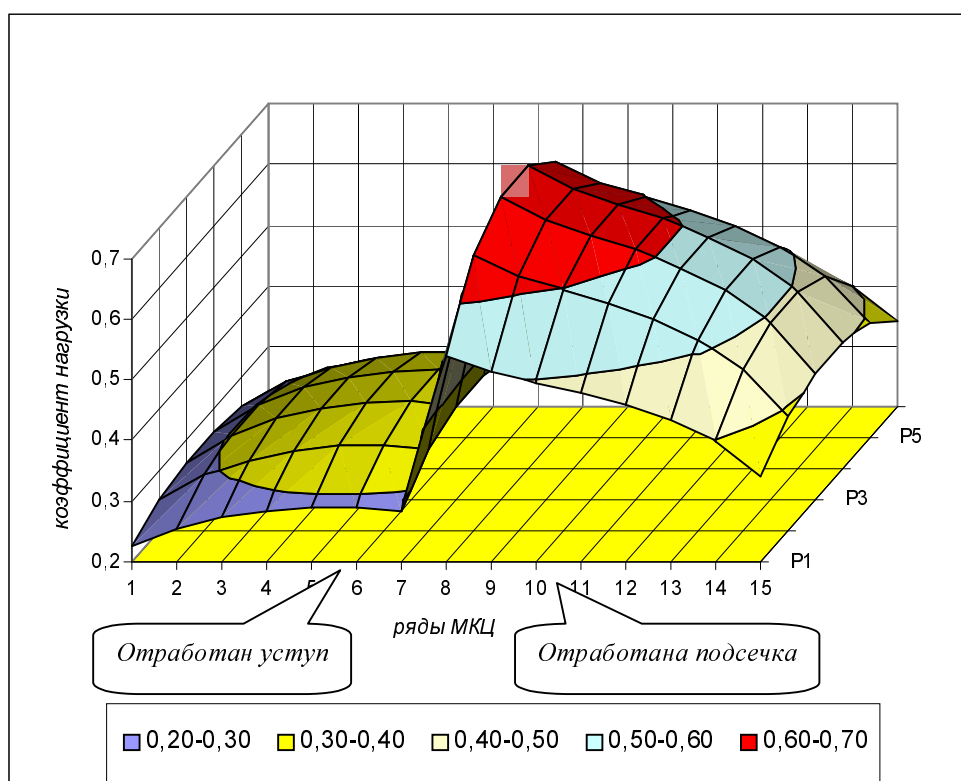


Рис. 15. Волна перераспределения горного давления при почвоуступной отработке мощных залежей

#### 4.8. Проявления горного давления при отработке сближенных залежей

Характерная особенность Жезказганского месторождения заключается в многоярусности оруденения: выделяются двадцать шесть слоев серых рудных песчаников, объединенных в девять рудоносных горизонтов.

При разработке перекрывающихся в плане залежей появляется новый конструктивный элемент системы – междокамерная потолочина («мост» - *профессиональный жаргон*), представленная породами междупластья. По мощности породного междупластья  $h_m$  различают:

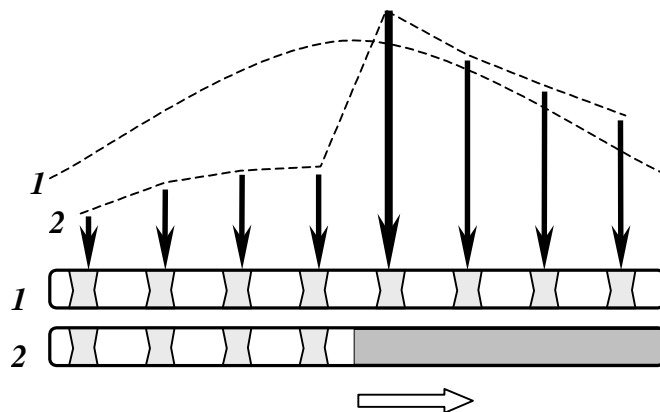
- перекрывающиеся залежи (мощность породного прослоя более 30 м);
- сближенные залежи (мощность междупластья от 30 м до 6 м);
- весьма сближенные залежи (мощность междупластья меньше 6 м).

На перекрывающихся залежах при  $h_m \geq 30$  м не требуется соблюдать соосность МКЦ. На сближенных залежах при  $h_m < 30$  м целики должны быть соосны.

В процессе отработки сближенных залежей имеются и одиночные целики на верхней залежи, и связки из соосных МКЦ на участках, где отработаны и верхняя и нижняя (под мостом) залежи. Жесткость связки из двух целиков существенно ниже, чем жесткость одиночно целика. Поэтому при ведении горных работ на сближенных залежах всегда происходит процесс перераспределения нагрузок между целиками (рис. 16), полностью аналогичный тому, что имеет место при отработке мощных залежей почвоуступным забоем.

Рис. 16. Волна перераспределения нагрузок между целиками при отработке сближенных залежей, перемещающаяся с продвижением забоя под мостом на нижней залежи:

1 – эпюра распределения нагрузок на МКЦ после отработки верхней залежи; 2 – то же в процессе отработки нижней залежи.



Появление нового, весьма уязвимого конструктивного элемента - междокамерной потолочины (моста) между соосными целиками на сближенных залежах резко снижает надежность управления горным давлением. Это связано с множеством причин, по которым мост между камерами может обрушиться. На рис. 17 показаны типовые схемы обрушений потолочин и последствия, к которым это приводит.

Провалы потолочины по крутопадающим трещинам (рис. 17 а, б) достаточно редки, т.к. этому препятствует боковой зажим массива горизонтальными напряжениями.

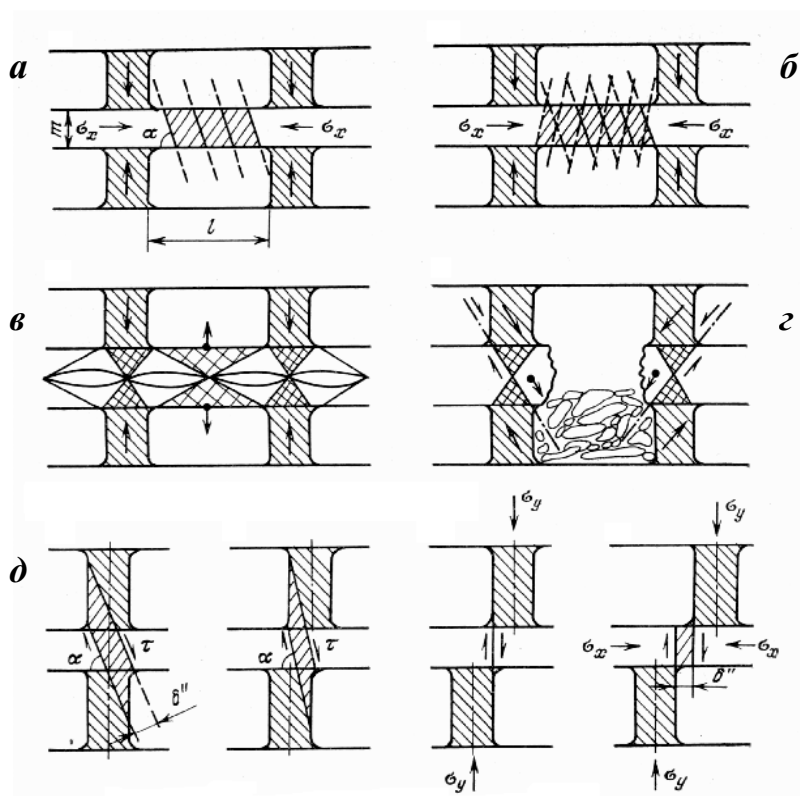


Рис. 17. Формы обрушений междукамерных потолочин: а, б – провалы по одной, двум системам трещин; в, г – раздавливание потолочины соосными целиками и последующее срезание МКЦ в провал; д – срезание потолочины при разной несоосности целиков

Если целики и на верхней и на нижней залежах достаточно жесткие а междупластье сложено слабыми красноцветными породами, то большое давление на связку МКЦ может раздавить потолочину, как жесткими пуансонами (рис. 17 в). Признаком начала такого раздавливания междупластья служат отслоения кровли на нижней залежи (вывалы из моста), происходящие на большой площади вокруг жестких (с большим сечением и малой высотой) целиков. Раздавливанию потолочины способствует скопление воды на почве верхней залежи. Породы междупластья увлажняются, набухают (что может вызвать даже прирост нагрузок на целики) и снижают свою прочность. После образования провала моста ближайшие к нему МКЦ оказываются сдвоенной высоты плюс большой пропласток слабых красноцветных пород в середине. Как правило, такие целики срезаются в провал (рис. 17 г).

При несоосном расположении целиков междукамерная потолочина просто срезается целиками (рис. 17 д). Кроме того, несущей частью является только перекрытая часть сечений МКЦ на сближенных залежах.

#### Советы геомеханика

- Отрабатывая нижнюю залежь, наблюдай, как ведут себя целики на отработанной верхней залежи.
- Не допускай скопления воды на почве потолочины.
- Поинтересуйся у маркшейдера, как он обеспечивает соосность целиков.
- Начались отслоения потолочины – жди серьезных неприятностей.



#### 4.9. Напряженное состояние и прочность целиков

Кровля над междукamerным целиком оседает неравномерно: у боковых поверхностей МКЦ смещения больше, в середине целика – меньше. Поэтому распределение вертикальных напряжений в МКЦ вблизи с контактами с вмещающими породами также неравномерно. Если целик находится в упругом состоянии (т.е. действующие в нем напряжения еще не достигли его прочности), то наибольшие вертикальные напряжения действуют в периферийной части сечения, а в центральной части наблюдается минимум вертикальных напряжений.

Согласно принципу Сен-Венана, по мере удаления от контактов к середине высоты целика неравномерность вертикальных напряжений по сечению целика сглаживается. В центральной по высоте части высоких целиков, у которых высота  $h$  превышает диаметр  $d$  в 2 и более раз ( $h/d \geq 2$ ), вертикальные напряжения распределяются по сечению равномерно.

Вертикальное сжатие целика под нагрузкой приводит к его боковому расширению в поперечных (по отношению к направлению действия нагрузки) направлениях. Центральная по высоте часть целика находится на максимальном удалении от контактов с кровлей и почвой. Поэтому поперечные деформации целика наиболее полно реализуются именно в середине его высоты. Периметр целика за счет поперечного расширения увеличивается. Это приводит к появлению в периферийной части сечения растягивающих горизонтальных напряжений в центральной по высоте части целика. Именно поэтому **середина высоты целика является его наиболее слабым сечением**. Это проявляется в том, что первые признаки разрушения появляются в середине высоты МКЦ, а при дальнейшем развитии максимальные разрушения будут развиваться также в середине высоты.

На контактах с кровлей и почвой поперечным деформациям МКЦ препятствуют силы сцепления и трения с вмещающими породами. Поэтому вблизи кровли и почвы в целиках за счет ограничения поперечных деформаций возникают сжимающие горизонтальные напряжения, величина которых сопоставима с действующими вертикальными напряжениями. Это означает, что **вблизи контактов с вмещающими породами в целиках возникают зоны объемного сжатия конусообразной формы**.

В зонах объемного сжатия вблизи контактов руда обладает повышенной прочностью, превышающей прочность при одноосном сжатии (в центральной по высоте части целика) почти в 2 раза. Поэтому разрушение целика развивается в середине высоты целика, а не вблизи контактов.

<b>Совет геомеханика</b>	Наблюдая за состоянием МКЦ, в первую очередь обращай внимание на середину высоты целиков. Это их наиболее слабое сечение. Первые признаки разрушения должны появляться там.
------------------------------	---



Конфигурация зон объемного сжатия зависит от формы целика (отношения высоты к диаметру  $h/d$ ) и контактных условий на границах с вмещающими породами. На рис. 18 заштрихованными показаны зоны объемного сжатия в целиках различной формы. В тонких, высоких целиках ( $h/d \geq 2$ ) зоны объемного сжатия занимают незначительную часть целика вблизи контактов с вмещающими породами; центральная по высоте часть целиков находится практически в условиях одноосного сжатия. В более широких целиках с  $h/d \sim 1$  зоны объемного сжатия у кровли и почвы смыкаются в середине высоты; в условиях одноосного сжатия находится только периферийная часть целика. В широких и низких целиках, у которых  $h/d < 0,5$ , зоны объемного сжатия занимают большую часть объема.

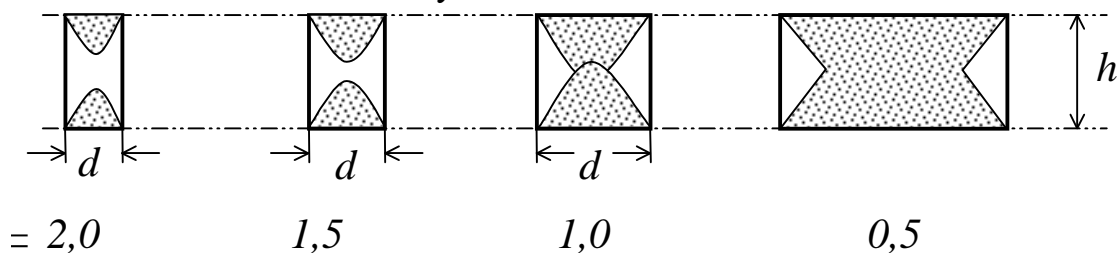


Рис. 18. Конфигурации зон объемного сжатия в целиках разной формы

Угол подъема зон объемного сжатия определяется контактными условиями. Различают два типа контактных условий:

- Нормальные, которые характеризуются полным сцеплением с нормальным трением (реализуется на контактах руды с серыми песчаниками, массивными красноцветами);
- Слабые, на которых существует только малое трение и практически отсутствует сцепление (контакты представлены зеркалами скольжения, трещинами с заполнением жильными минералами, тонкоплитчатыми красноцветами).

Чем лучше контакт (больше силы сцепления и трения), тем круче поднимается зона объемного сжатия в целике; чем слабее контакт (нет сцепления, маленькое трение) – тем ниже высота зоны объемного сжатия.

Описанные выше закономерности напряженного состояния целиков приводят к тому, что прочность МКЦ  $\sigma_{\text{ц}}$  (предельные напряжения, при которых происходит разрушение целика, как конструкции) зависит от его формы, которую описывают соотношением  $h/d$ .

Специальными экспериментами в лабораториях установлено, что, чем больше отношение  $h/d$ , тем меньше прочность целика  $\sigma_{\text{ц}}$  по сравнению с прочностью массива руды  $\sigma_{\text{м}}$  (рис. 19). Можно записать:

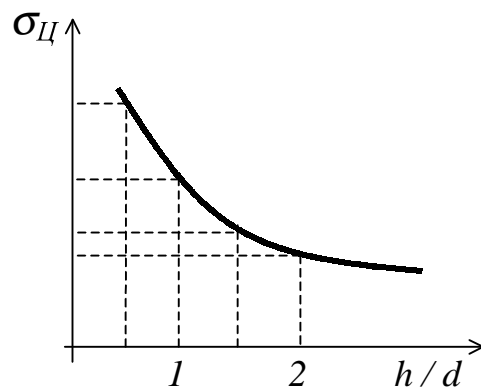


Рис. 19. Зависимость прочности целика от его формы по результатам лабораторных экспериментов



$$\sigma_{\eta} = \sigma_m \cdot K_k / (h/d) = \sigma_m \cdot K_k \cdot d/h,$$

где  $K_k$  – коэффициент контактных условий. Величину  $d/h$  называют коэффициентом формы целика  $K_{\phi}$ .

При расчетах целиков коэффициент контактных условий принимают равным:

- $K_k = 1$  – при нормальных контактах;
- $K_k = 0,7$  – при слабых контактных условиях.

Прочность трещиноватого массива руды  $\sigma_m$  определяют по прочности руды в образцах по данным испытаний керн (без трещин) на сжатие в лабораторных условиях с учетом коэффициента структурного ослабления массива трещинами  $K_w$ :

$$\sigma_m = \sigma_0 \cdot K_w$$

Прочность руды в образце по данным исследований ИГД им. Д.А. Кунаева составляет:

- $\sigma_0 = 205 \text{ МПа}$  - для Анненского района;
- $\sigma_0 = 216 \text{ МПа}$  - для Акчий-Спасского района.

Коэффициент структурного ослабления при расчетах целиков принимают равным:

- $K_w = 0,63$  – для нормальных горно-геологических условий;
- $K_w = 0,40$  – для сложных горно-геологических условий.

Под несущей способностью целика  $P$  понимают предельную нагрузку, которую он может выдержать до разрушения. Она получается, если умножить прочность целика  $\sigma_{\eta}$  на площадь поперечного (несущего) сечению  $F$ :

$$P = \sigma_{\eta} \cdot F$$

Коэффициент запаса прочности целиков представляет собой отношение несущей способности целика  $P$  к воспринимаемой им нагрузке  $N$ :

$$n = P/N.$$

Получается интересное соотношение несущей способности целиков с их жесткостью и нагрузкой на них:

***Чем больше жесткость целика,  
тем больше нагрузка на него,  
тем больше его несущая способность.***

Такое соотношение величин называют положительной корреляционной связью. В данном случае связь нагрузки на целики и их прочности обусловлена тем, что обе величины среди многих параметров зависят, не в последнюю очередь, от площади поперечного сечения и высоты целиков.



Следствиями данной связи являются следующие закономерности:

- ✓ Нагрузки на целики и их прочности в зависимости от размеров МКЦ колеблются в очень широких пределах. А коэффициент запаса прочности целиков изменяется в гораздо более узких границах.
- ✓ Это означает, что совокупность МКЦ в выработанном пространстве представляет собой систему параллельно работающих конструктивных элементов с активным резервированием, т.е. нагрузка с более слабых (уязвимых) целиков перераспределяется на более мощные (устойчивые) элементы.
- ✓ При разрушении целиков уменьшается их сечение, а, следовательно, и жесткость. Нагрузка на разрушающийся целик снижается, перераспределяясь на соседние более жесткие (устойчивые) целики. После деформирования целика и снижения нагрузки на него процесс его разрушения может остановиться. В этом случае говорят: «Целик ушел из-под нагрузки» (*профессиональный жаргон*).
- ✓ Поэтому в панелях достаточно обычно встретить целики с начальными признаками разрушения в окружении устойчивых целиков. Случаи полного разрушения одиночных целиков крайне редки (как правило, связаны с крупными тектоническими нарушениями).
- ✓ Если в окружении разрушающегося целика не окажется МКЦ с достаточно большим резервом прочности, разрушение первого целика будет развиваться только с развитием разрушений в соседних целиках. Возникает так называемая «цепная реакция» разрушения МКЦ (подробнее об этом см. п. 4.10).

#### 4.10. Разрушения МКЦ

Оценка фактического состояния целиков на практике ведется методом визуального обследования. Опытом ведения горных работ на Жезказганском месторождении установлено, что процесс разрушения МКЦ развивается в течение длительного времени. **Стадии разрушения** хорошо фиксируются визуально (рис. 20 а). Каждая стадия разрушения на маркшейдерских планах обозначается своим условным знаком. По результатам визуального обследования состояние МКЦ относят к одной из следующих категорий:

- Целик сохраняет устойчивость без начальных признаков разрушений.
- В МКЦ появились признаки разрушения (отдельные трещины, заколы на боковых поверхностях).
- Целик частично разрушен (с боковых поверхностей целика произошли сколы, отслоения, сечение МКЦ уменьшилось на 10%).
- МКЦ находится в предельном состоянии (целик приобретает форму песочных часов или обелиска, происходит раскрытие имеющихся систем

трещин; площадь сечения уменьшилась до 30 % от проектной).

- Целик потерял несущую способность или полностью разрушен (МКЦ рассечен системой трещин с образованием отдельных крупных глыб; площадь поперечного сечения менее, чем 30 % от проектного).

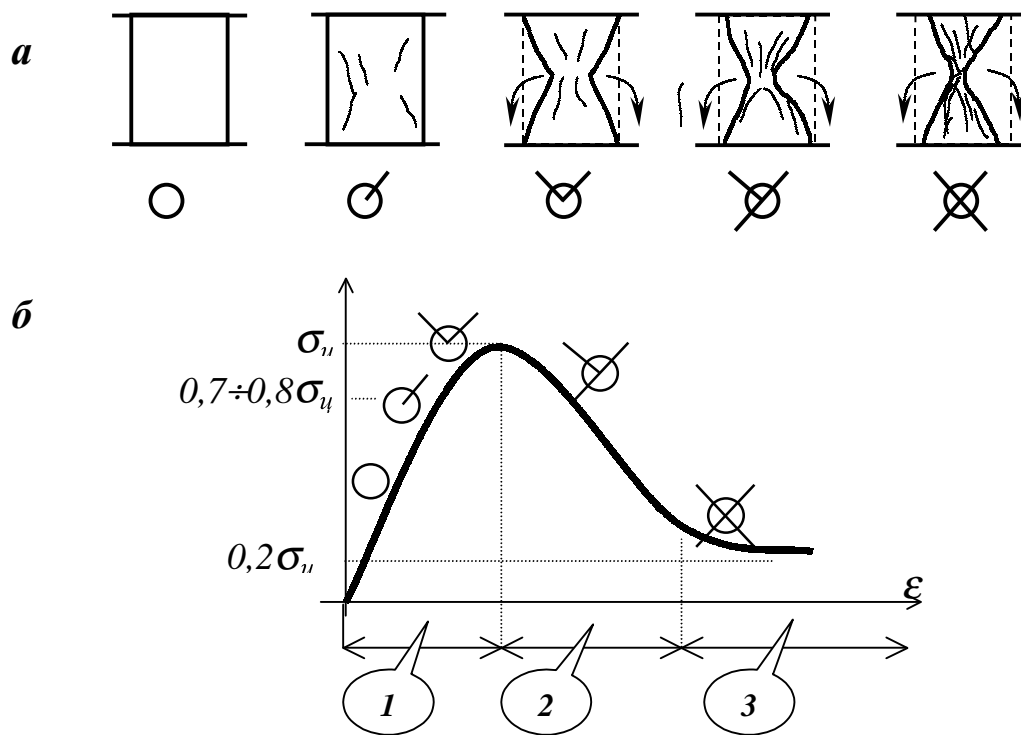


Рис. 20. Категории и условные знаки разрушения МКЦ (а) в последовательности (слева направо): устойчивые, с признаками разрушения, частично разрушенные, потерявшие несущую способность, полностью разрушенные целики;

б – полная диаграмма деформирования МКЦ со стадиями: 1 – упругого деформирования до предела прочности целика  $\sigma_u$ ; 2 – запредельное деформирование разрушающегося целика; 3 – деформирование целика в режиме остаточной прочности на уровне  $0,2 \sigma_u$

Чтобы соотнести категории разрушения целиков со стадиями их деформаций, рассмотрим полную диаграмму деформирования МКЦ (рис. 20 б).

Упругая стадия деформирования 1 (до достижения предела прочности целика  $\sigma_u$ ) характеризуется нарастающим сопротивлением МКЦ. На этой стадии целик еще сохраняет устойчивость.

При приближении к пределу прочности (начиная, примерно, с  $0,7 \div 0,8 \sigma_u$ ) в целике появляются признаки разрушения (первые трещины). Когда действующие напряжения достигнут предела прочности целика  $\sigma_u$ , целик начинает разрушаться, переходя в категорию частично разрушенного. В данном состоянии целик способен воспринять на себя максимальную нагрузку.

Дальнейшее разрушение целика происходит в стадии запредельных деформаций 2. На данной стадии деформирование МКЦ сопровождается снижением нагрузки на



него. При этом целик переходит из категории частично разрушенного в категорию потерявшего несущую способность.

При переходе МКЦ в последнюю категорию полностью разрушенного начинается его деформирование в стадии остаточной прочности 3. Данная стадия характеризуется минимальным сопротивлением целика дальнейшим деформациям. Полностью разрушенные МКЦ на стадии остаточной прочности несут нагрузку, которая составляет порядка 20% от предельной.

**Формы разрушения МКЦ** зависят от контактных условий с кровлей и почвой, а также от наличия в них других поверхностей ослабления. Типичные формы разрушения МКЦ на пологих залежах показаны на рис. 21.

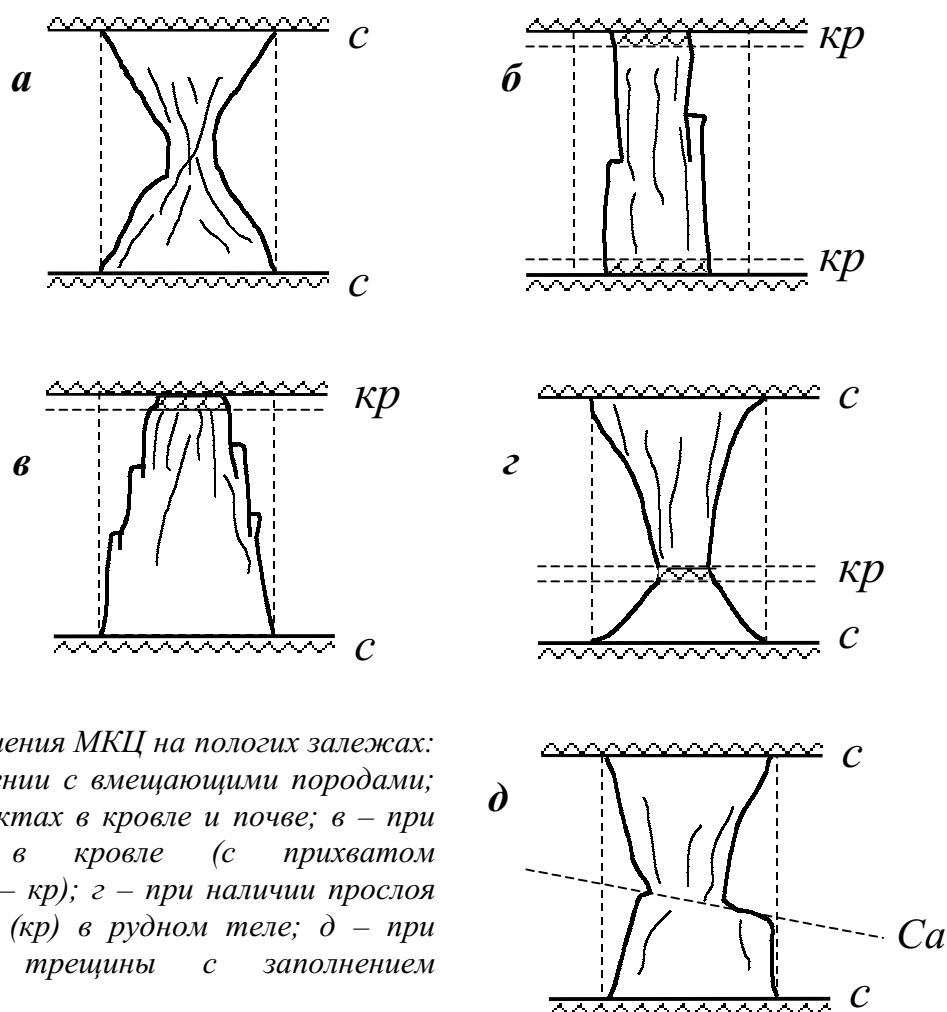


Рис. 21. Формы разрушения МКЦ на пологих залежах: а – при полном сцеплении с вмещающими породами; б – при слабых контактах в кровле и почве; в – при слабом контакте в кровле (с прихватом красноцветных пород – кр); г – при наличии прослоя красноцветных пород (кр) в рудном теле; д – при наличии наклонной трещины с заполнением кальцитом (Са)

При полном сцеплении целика с вмещающими породами разрушение МКЦ происходит по наклонным поверхностям с образованием характерной формы песочных часов с минимальной площадью в наиболее слабом сечении - в середине высоты целика (рис. 21 а). Не разрушенными остаются только зоны объемного сжатия вблизи контактов. При нормальных контактных условиях МКЦ имеют наибольшую несущую способность.

При слабых контактах с вмещающими породами в кровле и почве зоны объемного



сжатия в целике практически не образуются. Поэтому разрушение МКЦ происходит путем отрыва крупных блоков по вертикальным трещинам при поперечных деформациях (рис. 21 б). За счет горизонтального проскальзывания по слабым контактам все сечения по высоте целика оказываются одинаково слабыми. Несущая способность МКЦ при слабых контактах с вмещающими породами на 30% ниже, чем при нормальных контактных условиях.

Если отработка руды ведется с прихватом пород в кровле, то за счет раздавливания красноцветов слабый контакт возникает у целика с кровлей, по которому поперечные деформации происходят в виде проскальзывания. Расчетным (наиболее слабым) сечением МКЦ становится этот контакт, от которого развиваются наклонные трещины отрыва и происходят вывалы блоков руды (рис. 21 в). Несущая способность МКЦ с такими несимметричными контактными условиями на 15÷20% ниже, чем при нормальных контактных условиях.

Если рудное тело содержит внутрипластовые включения пустых пород меньшей прочности, то расчетное сечение целика по высоте определяется положением прослоя. Разрушение таких неоднородных целиков начинается с выдавливания прослоя красноцветов и отрыва прилегающих к нему блоков руды (рис. 21 г).

Если в МКЦ имеются крупные наклонные трещины с заполнением жильными минералами или зеркала скольжения с глиной трения, то за счет проскальзывания по данным поверхностям ослабления трещины отрыва в целике развиваются примерно по нормали к ним (рис. 21 д). Поэтому, разрушаясь, целики приобретают несимметричный вид. Наиболее часто такой характер разрушения имеют МКЦ на участках, прилегающие к флексурным зонам, где начинается постепенное погружение или поднятие слоев.

<b>Советы геомеханика</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• На стадии проектирования очень трудно предсказать характер контактных условий. При ведении горных работ тип контактов и наличие внутрипластовых поверхностей ослабления в целиках можно установить точно. Поинтересуйся, правильно ли они учтены в проекте? Возможно, потребуется корректировка размеров целиков в сторону их увеличения или уменьшения.</li><li>• Прихватывая породы кровли (и/или почвы), ты существенно ослабляешь целик. Постарайся обойтись без этого.</li><li>• Если природа подложила в руду пропласток красноцветов (рис. 21 г), попробуй крепить боковую поверхность целиков поясами анкеров выше и ниже породного прослоя.</li><li>• На прифлексурных участках, где начинается постепенное погружение (поднятие) слоев, столбчатые МКЦ будут весьма уязвимы (рис. 21 д). Лучше оформлять ленточные целики, ось которых должна быть перпендикулярна простиранию флексуры.</li></ul>
-------------------------------	--

Характерной особенностью Жезказганского месторождения является доминирующее

развитие в массиве крутопадающих трещин, простирающие которых согласно простирацию флексур. Доминирующее развитие одной системы трещин обуславливает неравномерность развития процесса их разрушения в различных направлениях. Вкрест простираения основных крутопадающих трещин разрушение МКЦ происходит в 3 раза интенсивнее, чем по простирацию. Это приводит к тому, что поперечное сечение разрушающегося целика приобретает форму овала, вытянутого вдоль простираения основной системы трещин (рис. 22).

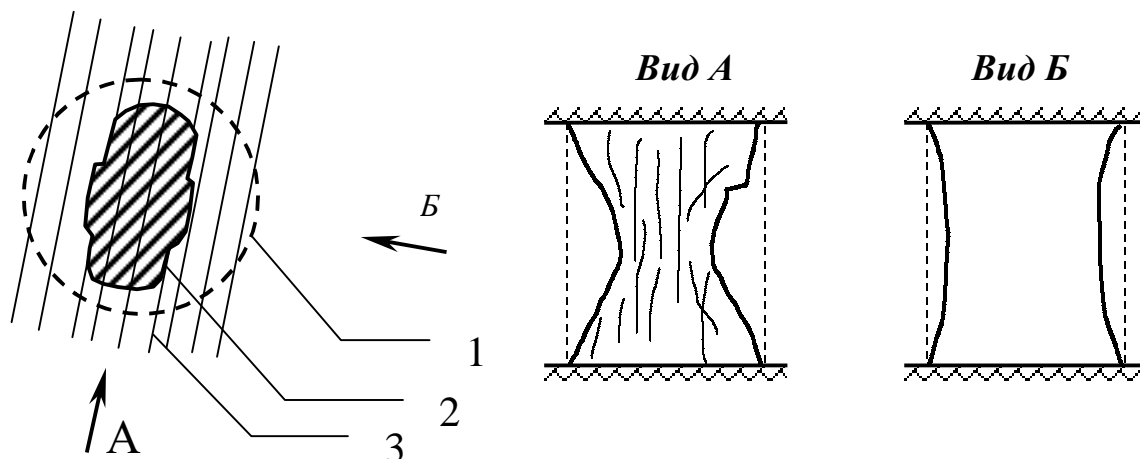


Рис. 22. Связь разрушения МКЦ с основной системой крутопадающих трещин:  
1 – начальное сечение МКЦ; 2 – сечение целика после разрушения; 3 – доминирующая система крутопадающих трещин, согласных с простираением флексурных зон

### Совет геомеханика

Чтобы узнать фактическое состояние целика, на него необходимо смотреть по направлению простираения основной системы крутопадающих трещин, т.е. вдоль простираения флексур (А). Если на целик смотреть с перпендикулярных направлений (Б), то можно ничего не увидеть.

При разрушении МКЦ нагрузка с них перераспределяется на оставшиеся целики, сохраняющие устойчивость (рис. 23). В некоторых условиях разрушение нескольких МКЦ в результате формирования опорного давления может вызвать разрушение примыкающих целиков.

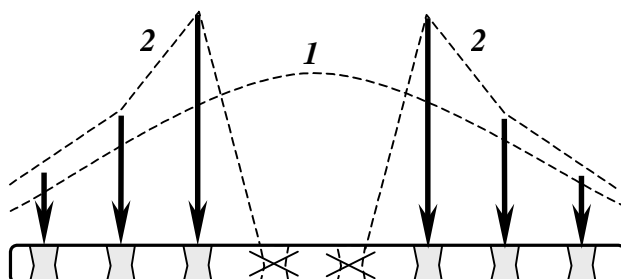


Рис. 23. Эпюры распределения нагрузок до (1) и после (2) разрушения целиков

Максимальная концентрация опорного давления приходится на МКЦ, расположенные на границе зоны обрушения. Если запаса прочности данных целиков недостаточно, чтобы выдержать перераспределившуюся на них нагрузку, то процесс разрушения распространяется на следующий ряд МКЦ и т.д.



Для определения границ распространения лавинообразного разрушения МКЦ используют понятие граничного коэффициента запаса прочности  $n'$ . Целики, примыкающие к зоне обрушения и обладающие фактическим запасом прочности  $n$  меньшим, чем граничный  $n'$ , вовлекаются в процесс разрушения. Граница распространения цепной реакции разрушения МКЦ оконтуривается по целикам, фактический запас прочности которых  $n$  больше граничного  $n'$ .

По соотношению фактического и граничного коэффициентов запаса прочности всю совокупность целиков по степени опасности их разрушения можно разделить на 3 категории:

*I* - уже разрушенные (полностью или частично) МКЦ, запас прочности которых на какой-то стадии горных работ после истечения срока их долговечности оказался меньше 1;

*II* - МКЦ, имеющие небольшой запас прочности ( $1 < n < n'$ ), которые могут вовлечься в цепную реакцию и оказаться разрушенными; т.е. в эту категорию входят целики, которые в принципе могут быть разрушены горным давлением;

*III* - МКЦ, имеющие достаточно большой запас прочности ( $n > n'$ ), чтобы остановить цепную реакцию и локализовать очаг разрушения МКЦ (целики этой категории в принципе не могут быть разрушены горным давлением).

Расчетами установлено, что в случаях самопроизвольного разрушения МКЦ граничный коэффициент запаса прочности  $n'$  меньше 2 (проектного). Это связано с тем, что частично разрушенные целики сохраняют некоторую несущую способность в предельном состоянии, хотя и меньшую, чем в предельном состоянии.

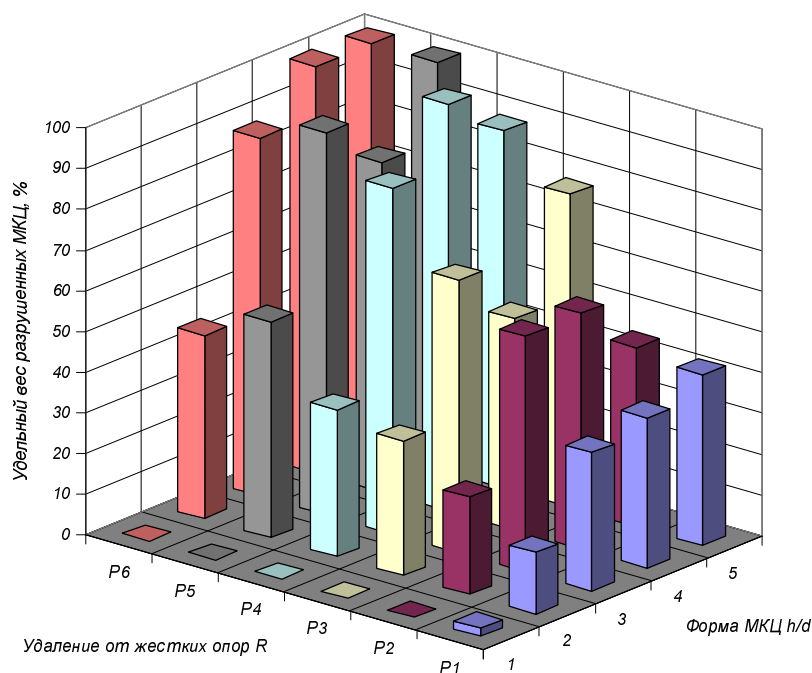
Условия разрушения целиков можно оценить методом статистического анализа фактических данных. Богатая практика Жезказганского месторождения предоставляет для этого обширные материалы, достаточные для получения статистически устойчивых выводов в широком диапазоне горно-геологических условий.

Статистический подход к определению условий возникновения цепной реакции разрушения МКЦ используется только тот факт, что часть целиков разрушилась и попала в контур зоны обрушения, а другая часть целиков оказалась не разрушенной (несмотря на то, что они попали в зону опорного давления) и остановила зону обрушения. Разделив между собой эти группы целиков (разрушенные, попавшие в зону обрушения и не разрушившиеся, остановившие обрушение и оконтуривающие его), получаем условие неразрушаемости целиков.

В полях шахт 45, Покро, 55, 57 были описаны геометрические размеры и расположение в выработанном пространстве 1,5 тысяч междукамерных целиков, находящиеся в ослабленных районах и в зонах обрушений. Фактическая устойчивость этих МКЦ определена геомеханиками шахт визуальным обследованием. Собранные данные были разделены на группы по форме целиков



(соотношению высоты к диаметру  $h/d$ ) и месту их расположения в выработанном пространстве, которое характеризовалось расстоянием до ближайшей жесткой опоры (кромка массива, барьерный или массивный целики), выраженным в рядах МКЦ.



Данный фактор назвали рядностью целика  $R$ . Например, первый ряд МКЦ вдоль барьерного целика имеет  $R=1$ , второй ряд –  $R=2$  и т.д.

В каждой группе подсчитан удельный вес целиков, полностью разрушенных и потерявших несущую способность, от общего числа МКЦ, попавших в группу. Полученные результаты показаны на рис. 24.

Рис. 24. Наблюдаемая на практике частота разрушения МКЦ в зависимости от их формы и места расположения в выработанном пространстве

Полученные результаты можно интерпретировать следующим образом:

- В условиях Жезказганского месторождения практически не наблюдается разрушения МКЦ, имеющих соотношение высоты к диаметру  $h/d \leq 1$ , вне зависимости от места расположения целика в выработанном пространстве. Т.е. низкие и широкие МКЦ практически не разрушаются горным давлением.
- МКЦ с  $h/d = 1 \div 2$  получают значительные повреждения (частично разрушаются или теряют несущую способность) при расположении их в пятых-шестых рядах от жестких опор.
- В первом ряду от жестких опор получают значительные повреждения высокие тонкие МКЦ с  $h/d \geq 3$ .
- Практически всегда полностью разрушаются МКЦ с  $h/d \geq 4$ , расположенные в четвертом ряду и далее от жестких опор.

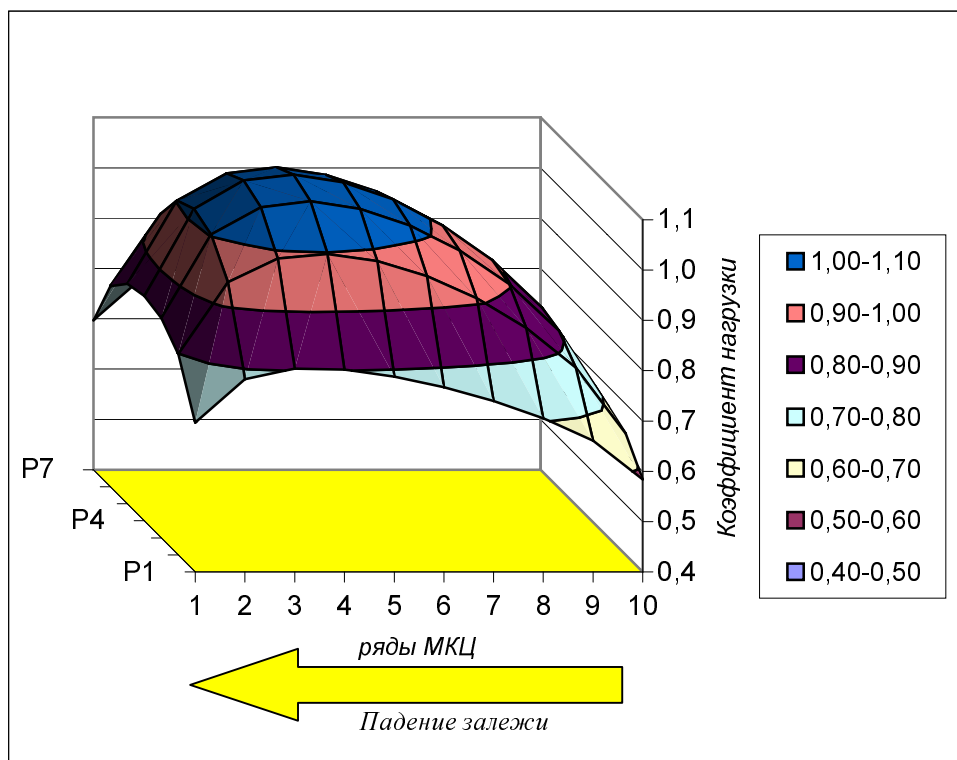
#### 4.11. Особенности нагружения и разрушения МКЦ на наклонных залежах

Особенностью наклонных залежей является постепенное увеличение глубины горных работ. Поэтому распределение нагрузок на МКЦ в панелях оказывается



несимметричным. На рис. 25 показано расчетное распределение нагрузок на МКЦ в одиночной панели, в которой оформлено  $7 \times 10$  рядов целиков. Длинная сторона панели ориентирована по падению залежи. Угол падения -  $30^\circ$ . Коэффициент бокового давления  $\lambda$  в природном поле напряжений – 2 (для условий Анненского рудника). Средняя глубина горных работ - 300 м. Соотношение модулей пород вмещающей толщи и руды - 0,75. Высота МКЦ - 10 м, сечение -  $78 \text{ м}^2$ .

Рис. 25. Нагруженность МКЦ на наклонной залежи



Результаты расчетов выражены в виде коэффициентов нагрузки, представляющих собой отношение:  $K_n = N/\gamma H S$ , где  $N$  - нагрузка на целик;  $\gamma H$  - гравитационное давление налегающей толщи с объемным весом  $\gamma$  на глубине  $H$ ;  $S$  - площадь кровли, поддерживаемая одним МКЦ.

Коэффициент нагрузки показывает, какую часть от полного веса налегающей толщи несет данный целик. По результатам расчетов распределение нагрузок на МКЦ в рядах по падению залежи несимметрично: на больших глубинах давление на целики больше, чем в верхней части панели.

Сопоставлением результатов расчетов для горизонтального и наклонного залегания установлено, что средняя нагруженность МКЦ на наклонных залежах  $K_n'$  может быть найдена по формуле:

$$K_n' = 0,5 \cdot K_n \cdot (1 + \lambda + (1 - \lambda) \cos 2\alpha),$$

где  $\lambda$  - коэффициент бокового давления в природном поле напряжений;  $\alpha$  - угол падения залежи;  $K_n$  - средний коэффициент нагрузки на МКЦ в аналогичной панели при горизонтальном залегании.

При боковом давлении в массиве  $\lambda \gamma H$ , превышающем вертикальное  $\gamma H$  (т.е.  $\lambda > 1$ ), средняя нагруженность МКЦ на наклонных залежах становится больше, чем на

горизонтальных залежах. И чем круче падение, чем больше боковое давление в природном массиве, тем эта разница становится больше.

За счет наклона и бокового давления на контактах целиков с вмещающими породами возникают не только нормальные (сжимающие) напряжения  $\sigma$ , но и касательные (сдвигающие, срезающие) напряжения  $\tau$ . **Важно иметь в виду**, что в зависимости от величины коэффициента бокового давления  $\lambda$  в природном поле напряжений знак касательных напряжений  $\tau$  может быть и положительным, и отрицательным. Знак показывает направление действия касательных напряжений  $\tau$ . **При  $\lambda < 1$**  касательные напряжения на контактах МКЦ с вмещающими породами имеют положительный знак, **при  $\lambda > 1$**  – отрицательный (рис. 26). **При  $\lambda = 1$**  касательные напряжения на контактах МКЦ с вмещающими породами равны нулю при любом угле падения залежи. Также касательные напряжения обращаются в нуль при горизонтальном залегании рудного тела вне зависимости от величины  $\lambda$ . В обоих последних случаях на МКЦ действуют только нормальные напряжения  $\sigma$ .

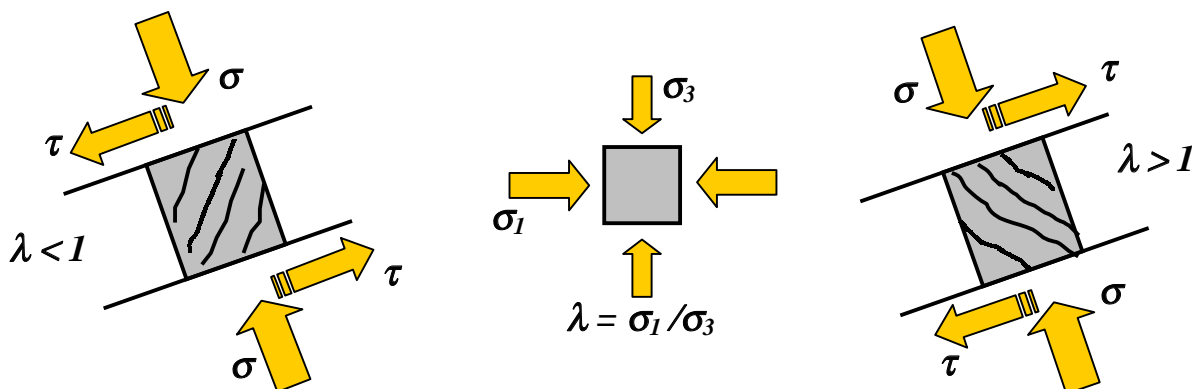


Рис. 26. Связь направлений действия касательных напряжений и характера разрушения МКЦ с величиной бокового давления в массиве горных пород

При изменении знака касательных напряжений меняется характер разрушения целиков. При  $\lambda < 1$  (вертикальные напряжения в нетронутом массиве больше горизонтальных, т.е. отсутствуют тектонические напряжения) в целиках образуются трещины сбросового типа. При  $\lambda > 1$  (вертикальные напряжения в нетронутом массиве меньше горизонтальных за счет тектонических напряжений) разрушение целиков идет по трещинам взбросового типа (рис. 26). По направлениям трещин, образующихся при разрушении МКЦ, можно диагностировать характер природного поля напряжений: определить направление действия в массиве максимального главного напряжения (вертикально или горизонтально).

Воспользуемся этим правилом, чтобы оценить величину  $\lambda$  в поле Анненского рудника по наблюдениям за характером разрушения МКЦ.



В процессе ведения горных работ на Анненском руднике наблюдались частичные разрушения МКЦ. Причем, чаще всего эти разрушения наблюдались с самого начала горных работ при небольших обнажениях кровли и при наличии барьерных целиков.

Таким образом, в процессе отработки залежей Анненского рудника обнаружилась общая проблема оформления и обеспечения устойчивости столбчатых междукammerных целиков, связанная с наклонным залеганием слоев, характером трещиноватости массива и напряженного состояния МКЦ.

Основные системы трещин в поле Анненского рудника представлены:

- пологопадающими послойными трещинами, согласными с падением пачки слоев;
- крутопадающими секущими трещинами с простиранием примерно параллельно простиранию флексур;
- крутопадающими секущими трещинами с простиранием примерно перпендикулярно простиранию флексур.

Падение секущих трещин примерно перпендикулярно падению послойных пологопадающих трещин. При оформлении МКЦ по вертикали с боковых стенок по имеющимся трещинам происходят *отслоения крупных блоков руды со стороны падения залежи в нижней части целика, а со стороны восстания – с верхней части целика* (рис. 27), т.е. *наблюдаемый на практике характер разрушения МКЦ соответствует случаю  $\lambda > 1$ .*

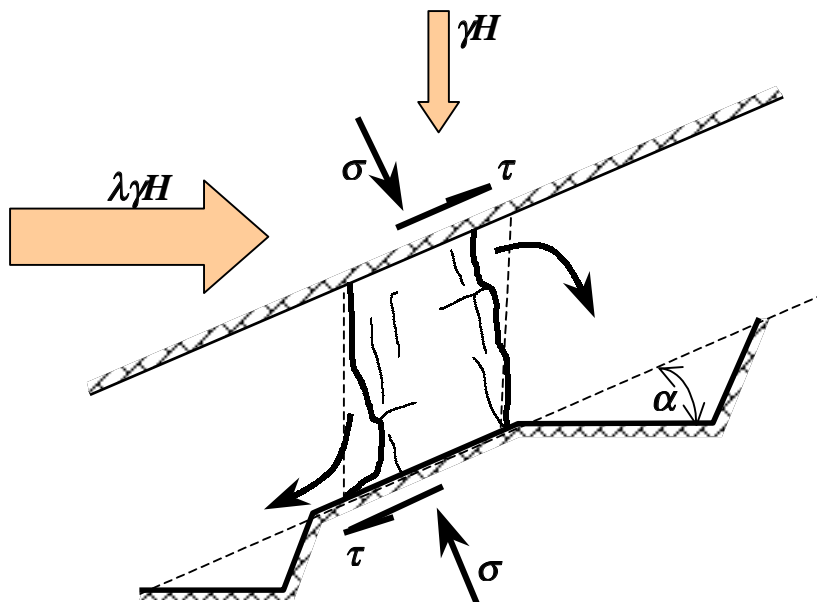


Рис. 27. Характер разрушения МКЦ на наклонных залежах Анненского рудника

В итоге, МКЦ, оформленные вертикально, естественным образом за счет структурных особенностей массива и сложного напряженного состояния приобретают форму с боковыми поверхностями, наклоненными примерно по нормали к падению. При этом целики теряют 30-40% своего несущего сечения и переходят в категорию частично разрушенных.



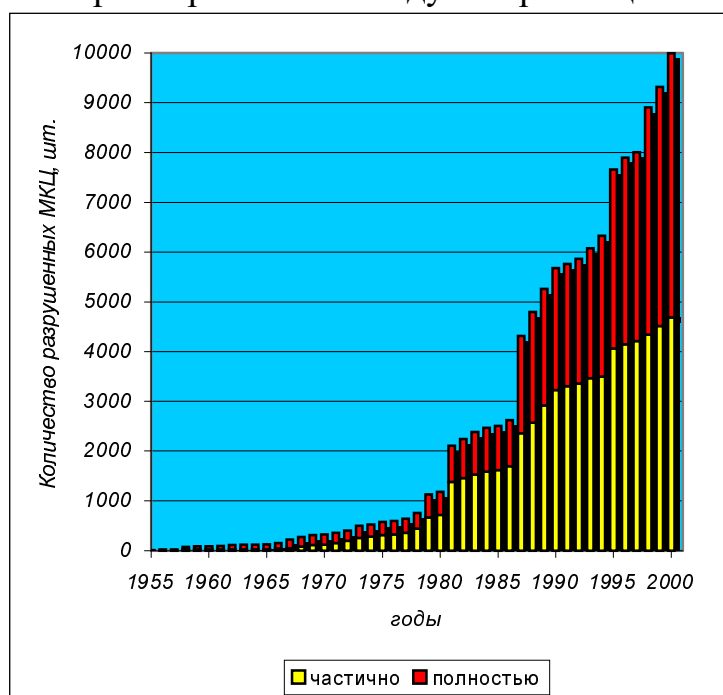


## 5. Управление горным давлением при повторной разработке залежей

### 5.1. Геомеханический смысл повторной разработки

Вся история промышленной эксплуатации Жезказганского месторождения камерно-столбовой системой разработки связана с накоплением объема выработанного пространства, поддерживаемого все возрастающим числом целиков. Увеличивалась площадь подработки, росло число перекрытий отработанных залежей, постоянно снижалась площадь неотработанного рудного и породного (несущего) массива. С течением времени, а также под влиянием горных работ в междуканальных целиках накапливаются хрупкие разрушения. На отработанных площадях появляются группы МКЦ с различной интенсивностью разрушения вплоть до полного. Постепенное ухудшение геомеханической обстановки на месторождении выражалось в росте числа разрушенных междуканальных целиков (рис. 28), площадей и объемов обрушенных пород.

Рис. 28. Динамика накопления разрушенных МКЦ на Жезказганском месторождении за весь период эксплуатации



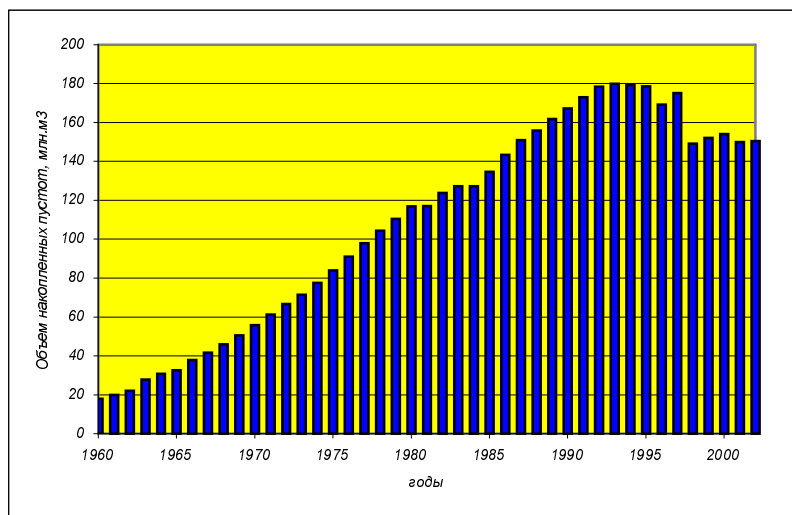
В середине 90-х годов в геомеханической обстановке на Жезказганском месторождении начали происходить качественные изменения. Они выражались в появлении новых эффектов и явлений, которые ранее не наблюдались. К таким явлениям можно отнести:

- объединение отдельных ослабленных участков, где фактическое состояние целиков не соответствует проектным требованиям, в крупные ослабленные районы;
- обрушения налегающей толщи на больших площадях стали сопровождаться техногенными землетрясениями на поверхности и воздушными ударами в шахтах.

Количественной показателем происшедших качественных изменений в геомеханической обстановке на Жезказганском месторождении может служить динамика накопления объема открытого выработанного пространства (рис. 29). Впервые за весь период эксплуатации многолетняя тенденция накопления объемов открытых выработанных пространств сменилась их уменьшением за счет обрушений.



Рис. 29. Накопление пустот при разработке Жезказганского месторождения камерно-столбовой системой разработки



Данные явления показывали, что геомеханическая ситуация на Жезказганском месторождении становилась критической. Наблюдавшаяся тенденция постоянного ухудшения геомеханического состояния требовала отказа от дальнейшего поддержания выработанных пространств и перехода к их планомерному погашению путем обрушения налегающей толщи в ходе повторной разработки. Выходом из сложившейся критической ситуации стал переход к новой концепции дальнейшей разработки месторождения.

**Новая концепция дальнейшей разработки Жезказганского месторождения** предусматривает три основных положения:

- ✓ отработку новых залежей продолжать камерно-столбовой системой, которой в данных горно-геологических условиях нет приемлемой альтернативы по производительности очистной выемки и себестоимости добычи руды;
- ✓ одновременно с первичной разработкой новых участков месторождения камерно-столбовой системой вести погашение накопленных выработанных пространств обрушением налегающей толщи в ходе повторной разработки;
- ✓ под объектами на земной поверхности, перенос которых или невозможен, или не целесообразен, вести закладку пустот сухой породой или хвостами обогатительных фабрик.

*Совмещение во времени двух стадий (первичной и повторной) разработки обусловлено необходимостью обеспечить рентабельность предприятий в условиях неблагоприятной конъюнктуры цен на цветные металлы на мировом рынке. Дело в том, что за весь период эксплуатации Жезказганского месторождения в потери списано почти 130 млн. т руды. Практически половина (46%) потерь руды сосредоточена в десятках тысяч столбчатых междуканальных целиков. Содержание меди в целиках почти в 2 раза превышает содержание в оставшихся балансовых запасах, разработка которых в настоящее время продолжается камерно-столбовой системой разработки. Таким образом, повторная разработка МКЦ представляет существенный ресурс для восполнения сырьевой базы действующих рудников, продлевая срок их эксплуатации.*

Геомеханический смысл повторной разработки целиков с обрушением налегающей толщи заключается в следующем. При образовании в земных недрах пустот (выработанного пространства) в окружающем массиве накапливается потенциальная



энергия упругих деформаций. Количество запасенной в массиве дополнительной энергии прямо пропорционально:

- крепости пород,
- глубине горных работ
- объему созданного выработанного пространства.

Если за весь период эксплуатации Жезказганского месторождения камерно-столбовой системой разработки было образовано выработанное пространство суммарным объемом порядка 200 млн.м<sup>3</sup>, то при средней глубине горных работ 200 м общую энергию, закаченную в массив горных пород, можно оценить величиной порядка 10<sup>15</sup> Дж.

*Пока целики сохраняют устойчивость и поддерживают налегающую толщу, закаченная в массив энергия концентрируется, в основном, в них в виде энергии упругих деформаций сжатия. При разрушении МКЦ накопленная упругая энергия деформаций частично расходуется на их дробление и излучение сейсмических колебаний, а другая часть энергии перераспределяется в налегающую толщу в виде энергии деформаций. Когда плотность накопленной энергии в налегающей толще достигает предельной величины (так называемой, энергетической прочности, имеющей по нашим оценкам порядок 10<sup>4</sup> Дж/м<sup>3</sup>), система переходит в неустойчивое состояние. Происходит динамическая перестройка структуры массива - обрушением налегающей толщи с излучением энергии в виде сейсмических волн, ощущаемых в горных выработках и на поверхности как землетрясения.*

*При обрушении налегающей толщи накопленная в массиве упругая энергия расходуется на разрушение (дробление и разрыхление) массива. При сдвижении разрушенных пород в выработанное пространство на величину выемочной мощности сила тяжести совершает работу, пропорциональную объему обрушенных пород и величине их перемещения (высоте выработанного пространства). В итоге, общая энергия массива снижается. Таким образом, если рассматривать первичную разработку месторождения камерно-столбовой системой с накоплением объема пустот, как процесс накопление упругой энергии в массиве, то при повторной разработке с обрушением налегающей толщи происходит обратный процесс диссипации (рассеивания) этой энергии. Поэтому:*

*Основной геомеханический смысл обрушения налегающей толщи заключается в разгрузке массива горных пород от накопленной в нем упругой энергии. Следовательно, повторную разработку следует рассматривать не только, как способ восполнения сырьевой базы, но и как средство нормализации геомеханической обстановки на месторождении.*



## **5.2. Технология извлечения МКЦ из открытого выработанного пространства и принцип управления горным давлением**

Первые промышленные эксперименты по извлечению МКЦ на малых глубинах проводились еще в 50-х годах. В 70-х годах испытывалась технология повторной разработки с возведением искусственных (бетонных) МКЦ. В 80-х годах для отработки целиков ИГД им. Д.А. Кунаева предложил технологию повторной разработки с полевой подготовкой и управляемым самообрушением налегающих пород. Промышленные испытания на шахтах 55, 57 показали, что потери и разубоживание руды при извлечении МКЦ из-под обрушенных пород через полевые выработки достигают 35-36%, а большой объем ГПР по породе ( $60-90 \text{ м}^3/1000\text{т}$ ) позволяет данной технологии сохранить рентабельность только на залежах большой мощности с содержанием металла в руде более 2%.

Для залежей средней мощности с рядовым содержанием металла Р.Б. Юн предложил технологию повторной разработки МКЦ из открытого выработанного пространства с обрушением налегающей толщи. Первый промышленный эксперимент по извлечению МКЦ высотой и диаметром до 10 м из открытого выработанного пространства проведен на глубине 100 м в панели 61 шахты 57. Он доказал безопасность и эффективность такой технологии в условиях Жезказганского месторождения. Направленная отбойка всего МКЦ веерами скважин за один взрыв, обеспечивая хорошее дробление при минимальном разлете руды, позволяет также управлять процессом обрушения за счет перебура скважин через целик в кровлю. Однако разубоживание руды оказалось достаточно высоким - до 38%.

*Для широкомасштабного внедрения повторной разработки МКЦ необходимо было увеличить производительность бурения в 2-3 раза, чтобы сбалансировать по производительности процессы отбойки и отгрузки руды и повысить тем самым интенсивность повторной разработки, а также снизить разубоживание руды обрушенными породами кровли.*

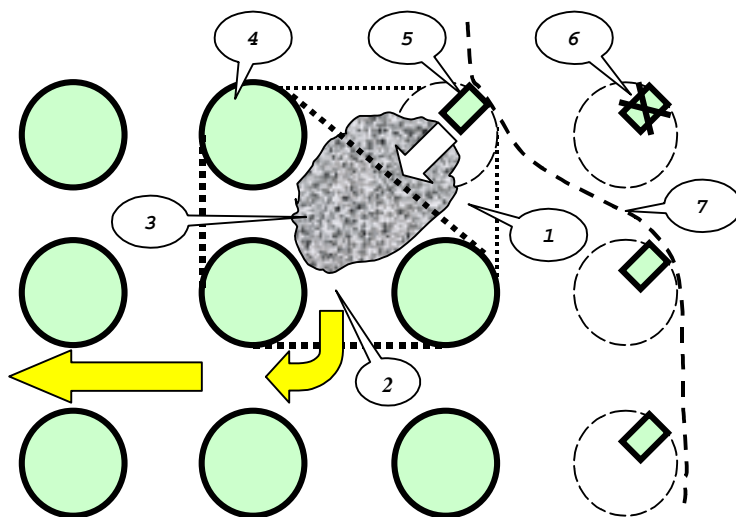
*Для этого А.Б. Юном было предложено:*

- перейти к шпуровой отбойке МКЦ с гидравлическим способом бурения;
- для поддержания консоли не обрушенных пород на пролете одной камеры при отбойке МКЦ оставлять временный сигнальный целик, который разрушается горным давлением после отгрузки отбитой руды и подвигания забоя на следующие ряды МКЦ.

Принцип поддержания призабойного пространства показан на рис. 30. Оставление временных сигнальных целиков позволяет поддерживать непосредственную кровлю призабойного пространства в устойчивом состоянии. Погрузка руды ведется, в основном, в зоне жесткого поддержания кровли между тремя МКЦ проектных размеров и частично в области временного поддержания кровли сигнальным целиком. Руда отбивается направленным взрывом в зону погрузки. Запасы руды из сигнальных целиков не извлекаются. Поэтому их размеры должны быть минимальными из расчета временной устойчивости сигнальных целиков на период погрузки в течение нескольких суток. При извлечении следующего ряда МКЦ оставленные сигнальные целики разрушаются горным давлением. При выемочной мощности 10 м площадь сигнального целика не должна превышать  $4-6 \text{ м}^2$ .



Рис. 30. Технология извлечения МКЦ с поддержанием призабойного пространства сигнальными целиками. Области: 1 – временного поддержания кровли сигнальным целиком; 2 – жесткого поддержания кровли; 3 – погрузки отбитой руды. Целики: 4 – проектных размеров; 5 – сигнальный; 6 – погашенный; 7 – граница зоны обрушения кровли (погашенное выработанное пространство).



Существующее оборудование не позволяет обрушить запасы МКЦ диаметром 10-15 м за один прием. Поэтому был предложен вариант шпуровой отбойки таких МКЦ в две стадии. За счет этого достигается широкий фронт буровых работ, что позволяет добиться максимальной производительности повторной разработки и, тем самым, сократить время нахождения людей вблизи границы обрушения. При двухстадийной отбойке в отрабатываемой панели между границей зоны обрушения и МКЦ проектных размеров оформлены три ряда целиков: ряд сигнальных целиков; ряд наполовину отработанных целиков - вторая стадия отбойки; ряд целиков в первой стадии отбойки. Извлечение МКЦ ведется в отступающем порядке рядами по ширине панели.

*Безопасность горных работ в специфических условиях погашения выработанного пространства обрушением налегающей толщи обеспечивается следующими мероприятиями:*

- механизированной оборкой заколов с целиков и кровли с помощью агрегата ОКНТ-2А, телескопический рабочий орган которого навешен на ковш погрузчика Caterpillar 980F, с максимальной высотой оборки до 11,5 м и рабочим усилием до 6000 кг;
- технологическими перерывами в процессе ведения горных работ длительностью до 3 суток на период посадки налегающей толщи до момента стабилизации геомеханической ситуации в панели, что определяется визуальными наблюдениями из подходов выработок и инструментальным контролем состояния налегающей толщи региональной сейсмической системой РРТС.

Данные варианты технологии извлечения МКЦ со шпуровой отбойкой руды в одну и две стадии с оставлением сигнальных целиков прошли промышленные испытания на Южно-Жезказганском руднике на глубинах 300-400 м. По итогам промышленных испытаний установлены следующие основные технико-экономические показатели технологии:

- производительность повторной разработки панели по руде - 180÷200 тыс.т/год;
- производительность труда по забойной группе - 32 м<sup>3</sup>/чел.см.;
- потери 17%;



- разубоживание – 11%;
- удельный расход ВВ – 0,4 кг/м<sup>3</sup>;
- выход горной массы – 2,9 м<sup>3</sup>/м.

Производительность труда при извлечении МКЦ по предложенным технологическим схемам на 40% превышает производительность при отработке балансовых запасов камерно-столбовой системой разработки, которая на ЮЖР составляет по забойной группе 23 м<sup>3</sup>/чел.см. Это достигнуто за счет роста производительности труда бурильщиков в 2,2 раза, т.к. при отбойке целиков выход руды с одного шпура составляет 28 т, а при отбойке руды из массива – 12 т, а также за счет исключения процесса крепления кровли с удельным расходом крепи: железобетонных штанг – 20 шт/1000 т и торкретбетон – 32 м<sup>2</sup>/1000 т.

*Экономические преимущества повторной разработки заключаются в том, что более богатую руду добывают с меньшими затратами, чем при первичной разработке оставшихся балансовых запасов камерно-столбовой системой. При повторной разработке МКЦ из открытого выработанного пространства исключаются затраты:*

- ✓ на погашение геологоразведочных работ в размере 0,32 \$/т (данные запасы не числятся на государственном балансе, они возвращаются из потерь),
- ✓ на горно-подготовительные работы – 0,6 \$/т (все подходные и вентиляционные выработки уже пройдены при первичной разработке),
- ✓ на крепление кровли очистных выработок (кровля уже закреплена) в сумме 0,32 \$/т и  
✓ на 30% снижены затраты на буровзрывные работы.

*Экономический расчет показал, что для Корпорации "Казахмыс" повторная разработка обеспечивает дополнительную прибыль в несколько миллионов долларов, что позволяет поддерживать рентабельность рудников в условиях неблагоприятной конъюнктуры цен на мировом рынке цветных металлов.*

### 5.3. Нагрузки на МКЦ при повторной разработке

При повторной разработке нагрузка с отработанных рядов целиков перераспределяется на окружающий массив, барьерные целики и оставшиеся панели МКЦ. В наиболее тяжелом состоянии оказываются МКЦ, находящиеся на границе зоны обрушения.

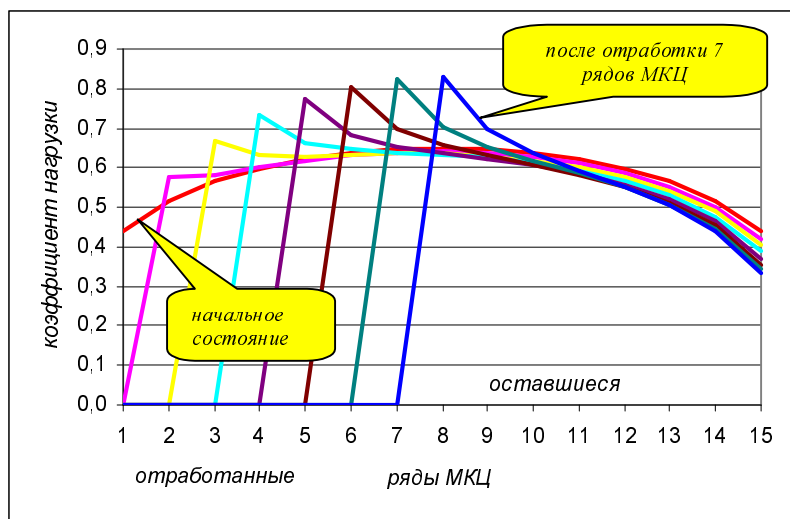


Рис. 31. Изменение нагрузок на центральный ряд целиков в ходе повторной разработки панели

На них действует максимальное опорное давление. На рис. 31





показано изменение нагрузок на центральные по ширине панели ряды МКЦ в процессе повторной разработки. По мере извлечения целиков нагрузки крайние к зоне обрушения ряды МКЦ увеличиваются, а на удаленные ряды – снижаются.

Закономерность распределения нагрузок на все целики в оставшейся части панели в объемном виде показана на рис. 32. Неравномерность их нагруженности по сравнению с начальным состоянием увеличивается.

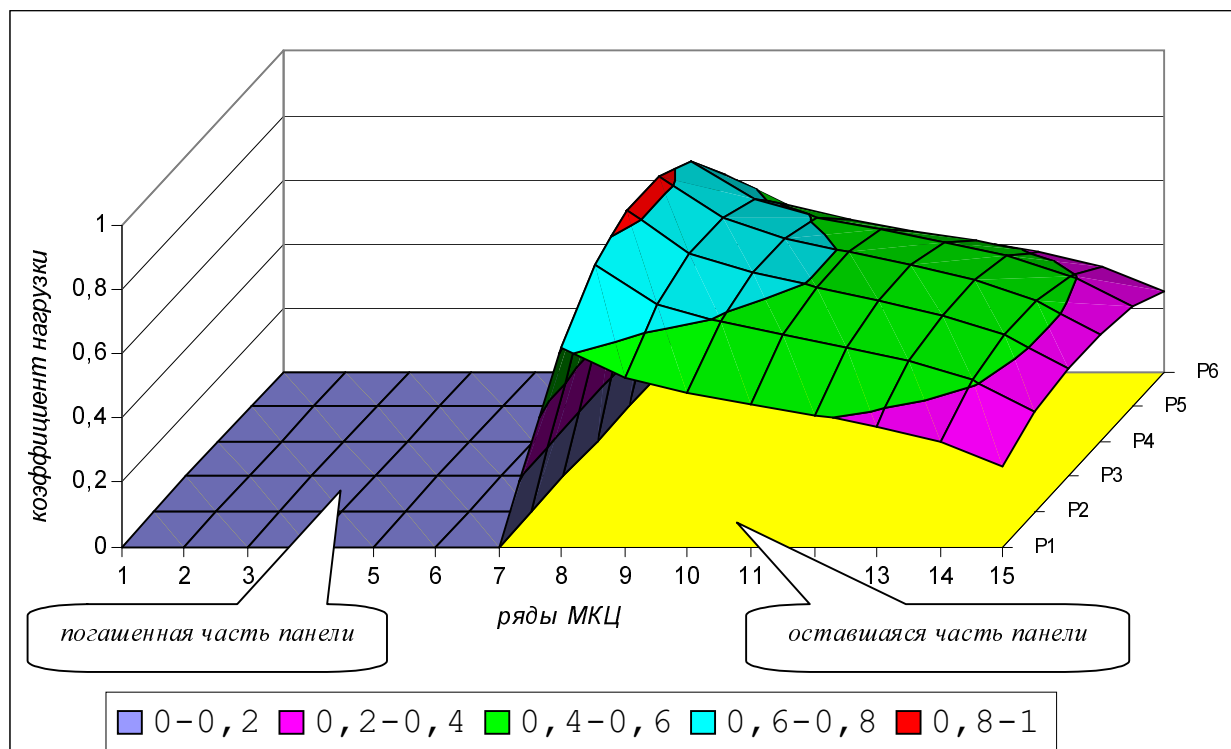


Рис. 32. Распределение нагрузок после извлечения 7 рядов МКЦ

МКЦ, находящиеся на границе зоны обрушения, пригружаются опорным давлением. На целики, расположенные в противоположном конце панели, нагрузки по сравнению с исходным состоянием снижаются. Более наглядно процесс перераспределения нагрузок между МКЦ в ходе повторной разработки панели можно показать в виде коэффициента концентрации  $K_k$ , который отображает изменение нагрузок от начальных, существовавших после отработки только камерных запасов (рис. 33).

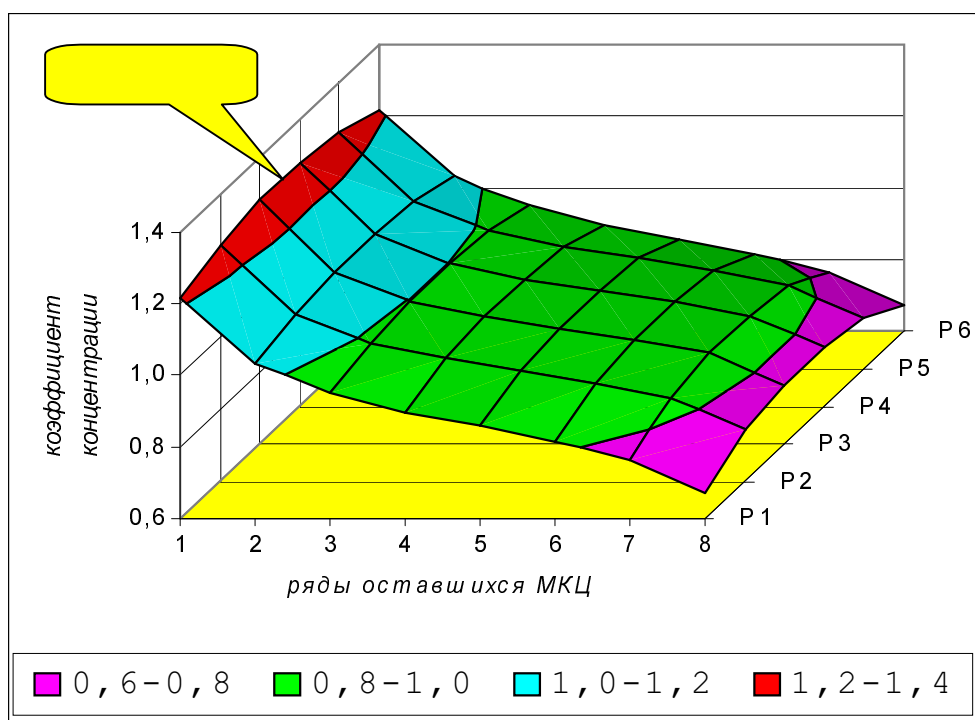


Рис. 33. Концентрация нагрузок на целики в оставшейся части панели после извлечения 7 рядов МКЦ

Максимальная концентрация давления  $\max K_k$  на 20-30% наблюдается на первый от обрушения ряд МКЦ. Менее существенный прирост нагрузок ощущают и следующие два ряда целиков. На более удаленные ряды МКЦ нагрузка снижается до 70% от начальной.

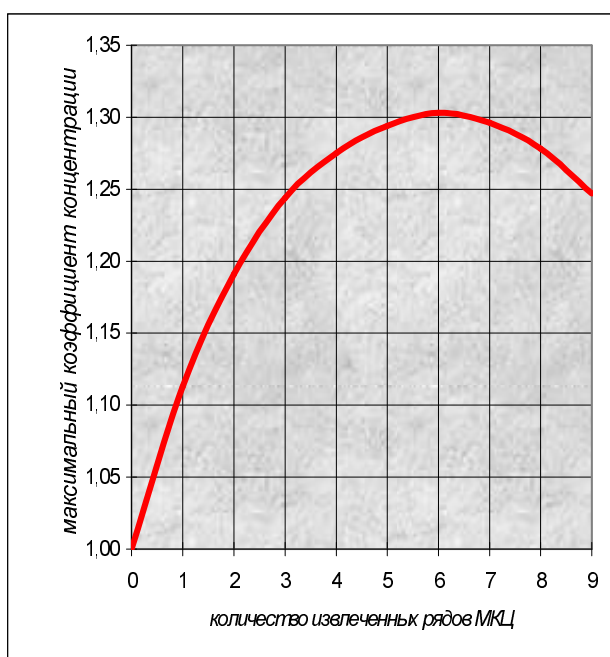


Рис. 34. Изменение максимального опорного давления по мере повторной разработки панели

По результатам расчетов наблюдается следующая закономерность изменения максимального коэффициента концентрации опорного давления по стадиям повторной разработки (рис. 34):

- в начальной стадии после извлечения каждого последующего ряда целиков максимальный коэффициент концентрации на крайний к зоне обрушения ряд МКЦ возрастает;
- концентрация опорного давления достигает своего максимума в центре панели после извлечения половины рядов МКЦ;
- в ходе доработки оставшейся половины панели максимум опорного давления на оставшиеся целики начинает снижаться за счет того, что фронт погашения приближается к границе





выработанного пространства.

### Советы геомеханика

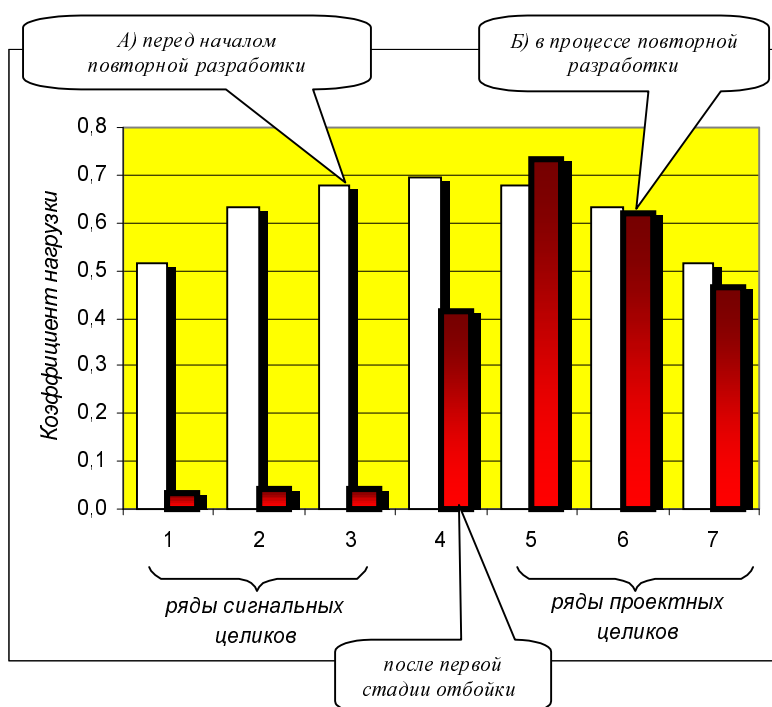
- Наблюдая за признаками разрушения целиков, в первую очередь обращай внимание на крайний ряд, прилегающий к погашенной части панели. Именно на него приходится максимальное опорное давление.
- Самая тяжелая ситуация - когда отработана половина панели. Чтобы проскочить эту ситуацию с минимальными потерями, постарайся в середине длины панели работать быстрее, интенсивнее. Потом, ближе к концу панели будет легче.

#### 5.4. Нагруженность и устойчивость целиков при двухстадийной отбойке

При двухстадийной отбойке в панели одновременно находятся целики трех типов:

- проектных размеров в рядах, еще не затронутых повторной разработкой;
- ряд наполовину отработанных МКЦ, сечение которых составляет порядка 50% от проектного после первой стадии отбойки;
- ряд сигнальных целиков сечением  $4 \div 6 \text{ м}^2$  после второй стадии отбойки.

Ряд наполовину отработанных целиков после первой стадии отбойки находится вблизи зоны обрушения. По месту его расположения на него должен приходиться максимум опорного давления. Однако и жесткость этого ряда целиков после первой стадии отбойки значительно снижена. Разобраться с распределением нагрузок на целики в ходе повторной разработки помогают расчеты на компьютерах по специальным программам.



На рис. 35 в виде коэффициентов нагрузки показано распределение горного давления на центральные ряды целиков до начала (А) и в процессе извлечения МКЦ в две стадии (Б) в панели, включающей  $6 \times 7$  рядов целиков, с выемочной мощностью 8 м на глубине 300 м.

Рис. 35. Нагруженность МКЦ при двухстадийной технологии их извлечения



По результатам расчетов получается следующее:

- ✓ после первой стадии отбойки нагрузка на оставшуюся часть МКЦ снижается на 30÷40% от первоначальной и не превышает  $0,4\gamma H$ ;
- ✓ после второй стадии отбойки оставленные сигнальные целики, находящиеся на границе зоны обрушения, воспринимают всего 2÷4% от полного веса толщи пород до поверхности; это означает, что сигнальный целик поддерживает только призабойное пространство с мощностью консоли непосредственной кровли не более 6÷12 м;
- ✓ в полученных результатах отразилась положительная корреляционная связь между жесткостью (соответственно, и нагрузкой на них) и прочностью целиков: более жесткие МКЦ принимают на себя большую нагрузку и одновременно обладают при этом большей прочностью;
- ✓ наличие в панели рядов МКЦ с различной жесткостью (МКЦ проектных размеров, не затронутые повторной разработкой, с высокой жесткостью, МКЦ после первой стадии отбойки пониженной жесткости, сигнальные целики малой жесткости) обеспечивает **более плавное протекание процесса перераспределения горного давления**, чем при одностадийной отбойке. Опорное давление на крайний ряд МКЦ проектных размеров (не затронутых повторной разработкой) при двухстадийной технологии их извлечения характеризуется коэффициентом концентрации не более 1,05, т.е. нагрузка на них увеличивается не более, чем на 5%. При одностадийной выемке опорное давление пригружает крайний к зоне обрушения ряд МКЦ до 30% от первоначальной (после первичной разработки) нагрузки;
- ✓ коэффициент запаса прочности наполовину отработанного целика, оставшегося после первой стадии отбойки, равен 1,5; такой запас прочности обеспечивает его устойчивость и безопасность работ, необходимых для второй стадии отбойки (бурение и зарядание шпуров) с учетом того, что время его существования составляет всего несколько рабочих смен;
- ✓ коэффициент запаса прочности сигнального целика находится на уровне 1, что обеспечивает, с одной стороны, временное поддержание консоли непосредственной кровли призабойного пространства на период погрузки отбитой руды, а с другой стороны, его разрушение горным давлением при продвижении фронта повторной разработки еще на один ряд МКЦ по длине панели.

**Советы  
геомеханика**

- После первой стадии отбойки нормативный запас прочности целика снижен с 2 до 1,5. Он может трещать. Оптимально, если интервал времени между первым и вторым подходами к целику будет минимальным. Не растягивай его.
- Задача сигнального целика – предупредить о начале посадки толщи. Сам он может поддерживать только 6-12 м породной консоли кровли. Не надо его разрушать взрывом. Как только в сдвигение придет вышележащая толщина, его раздавит горное давление.



### 5.5. Управление процессом обрушения налегающей толщи

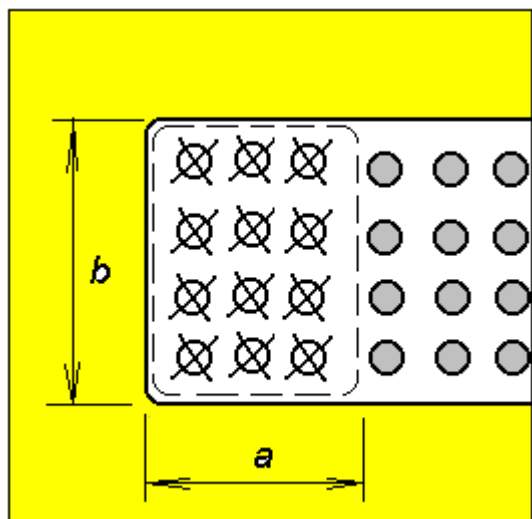
Один из самых сложных моментов в начальной стадии повторной разработки – это определить ситуацию, в которой следует предпринимать меры по принудительной посадке неподдерживаемой кровли, если она зависает. Дело в том, что после извлечения первых рядов целиков эквивалентный пролет неподдерживаемого выработанного пространства еще не достигает предельного и кровля зависает. Как показала практика опытно-промышленных работ на шахтах ЮЖР при малых эквивалентных пролетах принудительное обрушение кровли мало эффективно. Поэтому **проводить мероприятия по первичной посадке непосредственной кровли необходимо при эквивалентных пролетах, близких к предельному.**

Величину предельного пролета трудно определить расчетом, т.к. во-первых, прямых методов определения прочности массива на разрыв не существует и, во-вторых, прочность массива на растяжение может значительно колебаться в зависимости от типов пород, слагающих кровлю, глубины горных работ.

Поэтому более надежным является определение предельного пролета путем статистического анализа данных фактических обрушений кровли на рудниках Жезказганского месторождения. Для этого проанализированы геометрические параметры участков, где после разрушения группы МКЦ произошло обрушение кровли с образованием свода обрушения. Для всех участков определен эквивалентный пролет. Со среднеквадратичным отклонением 31 м **среднее значение эквивалентного предельного пролета, при котором происходит начальное самообрушение кровли с образованием свода обрушения, равно 78 м.** Высокая изменчивость данного параметра (коэффициент вариации 40%) отражает многообразие горно-геологических условий Жезказганского месторождения.

*Аналогичным образом были проанализированы условия начала обрушений кровли на участках, где велась повторная разработка МКЦ. На некоторых участках начальное обрушение кровли было инициировано принудительно путем взрывания скважин, перебуренных через целики в кровлю, на остальных – произошло самообрушение кровли в процессе взрывной отбойки МКЦ. Среднее значение эквивалентных пролетов, начиная с которых происходило начальное обрушение кровли на участках повторной разработки, равно 55 м (среднеквадратичное отклонение - 13 м; коэффициент вариации - 24%). Данная величина эквивалентного пролета составляет 70% от предельного.*

Таким образом, в ходе опытно-промышленных работ на основании практических данных установлено, что **мероприятия по принудительной посадке непосредственной кровли целесообразно проводить при эквивалентном пролете неподдерживаемого выработанного пространства 55±60 м, составляющем 70-75% от предельного.**



Извлечение МКЦ в ходе повторной разработки ведется в отступающем порядке рядами по ширине панели  $b$ . Пролет погашенного выработанного пространства по длине панели  $a$ , начиная с которого следует принимать меры по принудительной посадке кровли, можно определить, используя известный принцип эквивалентного пролета (рис. 36).

Эквивалентный пролет обнажения кровли определяется по известной формуле ВНИМИ:

$$l_0 = ab/(a^2 + b^2)^{1/2}$$

Чтобы найти пролет  $a$ , начиная с которого следует принудительно обрушать непосредственную кровлю, необходимо приравнять эквивалентный пролет к 55 м (70% от предельного). В таблице приведены расчетные параметры погашенных участков панелей, при которых, если кровля зависает, необходимо принимать меры по принудительной посадке налегающей толщи.

Ширина панели, $b$	60	80	100	120	140
Пролет $a$ , при котором необходимо принудительно обрушать кровлю	138	76	66	62	60
Количество рядов отработанных МКЦ	6	3	2	2	2

Наиболее эффективным способом, которым можно инициировать начало обрушения зависающей кровли, является взрывание веера восходящих скважин, перебуренных через целик в кровлю. Такой способ был использован при повторной разработке панели 31 север гор. 140 м шх. 65.

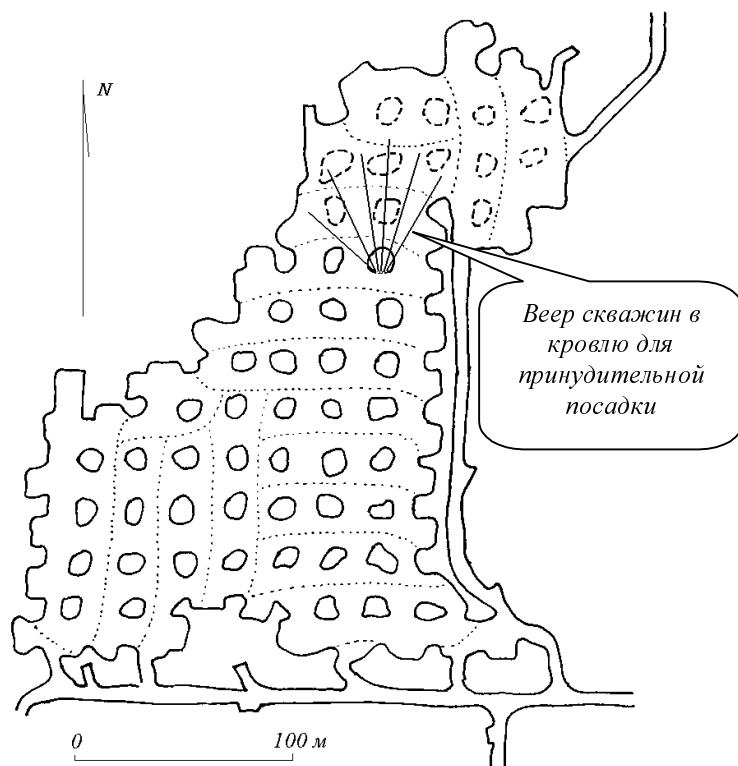


Рис. 37. Извлечение МКЦ в панели 31сев. гор. 140 м шх.65 с принудительной посадкой кровли в начальной стадии

Отработка МКЦ начата с более узкой северной части панели рядами по ширине панели, отступая с севера на юг (рис. 37). После отработки трех рядов целиков кровля зависала. Прилегающие целики восприняли на себя опорное давление, что проявлялось в эпизодических тресках в целиках. Через МКЦ № 57 станом Твин-Ринг в кровлю в северном направлении был пробурен веер скважин диаметром 55 мм на глубину 28 м с разворотом по горизонтали. Принудительная первичная посадка кровли была произведена взрывом веера скважин в кровле. Кровля в течение примерно двух суток обрушалась по всей погашенной части панели до забутовки выемочной мощности. После принудительной посадки кровли опорное давление на оставшиеся целики разгрузилось и больше признаков перехода МКЦ в предельное состояние не наблюдалось. В дальнейшем кровля обрушалась вслед за отбойкой МКЦ в течение 1 суток. Доставка руды производилась в рудоспуск № 69бис с производительностью 700 т в смену.