

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Разработка месторождений полезных ископаемых»

**Конспект лекций
по дисциплине
«ПРИКЛАДНАЯ МЕХАНИКА»**

Донецк

СОДЕРЖАНИЕ

Механика подземных сооружений как раздел горной науки.....	4
История развития курса.....	5
Структурно-механические особенности массивов горных пород	8
Геомеханические модели породных массивов.....	14
Напряженное состояние нетронутого горного массива.....	18
Напряженное состояние горных пород вокруг выработок.....	22
Оценка устойчивости горных выработок	28
Оценка устойчивости выработки в целом. Методика УкрНИМИ.....	28
Оценка устойчивости выработок по критерию устойчивости	28
Оценка устойчивости по предельной глубине	29
Оценка устойчивости пород кровли по предельному пролету	30
Оценка устойчивости пород почвы по расчетной ширине.....	31
Оценка устойчивости пород почвы по методике УкрНИМИ	31
Гипотезы горного давления.....	32
Гипотезы заданной нагрузки:	
1. Гипотеза Бирбаумера.....	32
2. Гипотеза Протодяконова	33
3. Гипотеза профессора Цимбаревича.....	36
Гипотезы заданной деформации:	
1. Гипотеза Феннера – Лабаса.....	37
2. Аналитико-экспериментальная гипотеза профессора Заславского	38
Характеристика вывалообразования.....	42
Направление наибольших смещений пород	45
Расчет нагрузки на крепь в вертикальных выработках	46
Определение нагрузки на крепь в наклонных выработках.....	47

Особенности проявления горного давления в зонах влияния геологических нарушений	48
Способы охраны горных выработок	50
1. Способы на основе использования благоприятных горно-геологических условий	50
2. Способы на основе укрепления породного массива.....	52
3. Способы на основе разгрузки породного массива от повышенных напряжений.....	56

Механика подземных сооружений как раздел горной науки

Введение

Одной из характерных особенностей современной подземной разработки месторождений полезных ископаемых является значительное усложнение горно-геологических условий. Поэтому успешное решение задач, связанных с обеспечением эксплуатационной надежности горных выработок в значительной мере зависит от степени совершенства используемых методов прогнозирования механических процессов в окружающих породных массивах и методов расчета различных подземных инженерных конструкций. Все эти вопросы являются предметом изучения дисциплины, связующей специальные курсы – «Физика горных пород», «Управление состоянием массива горных пород». Эта специальная дисциплина даёт возможность горному инженеру получить знания о состоянии породного массива; геомеханических процессах, происходящих в нем в период сооружения и последующей эксплуатации горной выработки; методах прогнозной оценки устойчивости выработок и нагрузок на крепь; конструкциях крепи и расчете их параметров; способах охраны горных выработок; безопасной организации работ по креплению и ремонту выработок.

Дисциплина состоит из трех разделов:

1. Геомеханические процессы в массиве горных пород;
2. Конструкции крепи;
3. Ремонт крепи в горных выработках;

Курс заканчивается экзаменом.

История развития курса

На первом этапе (до 1900г.) она является подсобной наукой. Теоретическая база отсутствует. Происходит накопление опыта, но нет его систематизации.

1550 – 1555гг. Агрикола пишет 12 книг о горном деле, в одной из них впервые описывается процесс крепления.

1763г. – М. В. Ломоносов выпускает книгу «Первые основания метода металлургии и рудных дел», в которой приведены физико-механические свойства пород и процесс крепления.

1773г. – Создается Петербургский горный корпус.

1825г. – Начинает издаваться «Горный журнал».

1843г. – Изобретен бетон (новый строительный материал).

1848г. – Выходит книга Узатиса «Горное искусство», в которой производится первая систематизация крепления.

1880г. – Проф. Дорошенко обосновывает возможность исследования металла для крепления горных выработок.

1895г. – Проф. Кржановский в «Горном журнале» №8 публикует статью «Научные основы крепи».

1897г. – Бирбаумер предлагает первый метод расчета горного давления.

II этап развития науки – до 1940г. Она становится прикладной

1904г. – акад. Тернигорьев публикует книгу «Рудничная крепь».

1907г. – проф. М. М. Протоdjяконов выдвигает «Теорию свода».

1909г. – Отто Мор разрабатывает теорию прочности пород.

1913г. – НБК впервые используется в США, а в России проф. Зайцев разрабатывает метод фотоупругости.

1930г. – Ростовцев обосновывает НБК как крепь выработок.

1936г. – Г.Н. Кузнецов разрабатывает метод моделирования с помощью эквивалентных материалов.

1938г. – Феннер предлагает свою теорию горного давления, где массив участвует в работе системы «крепь – массив».

III Этап – выделение в самостоятельный раздел горной науки

1948г. – выходит труд Цимбаревича «Механика горных пород».

1949г. – Лабасс и Вестергарден публикуют «Теорию горного давления для горизонтальных выработок», развивая учение Феннера.

1954г. – Руппенштейн К. В. публикует труд «Механика горных пород», в котром впервые аналитически доказывается связь горного давления и смещений пород.

1960г. – Получают развитие инженерные методы расчета горного давления (Ю. З. Заславский, В. Г, Глушко и др.).

1984г. – выходит учебник Баклашова «Механика подземных сооружений и конструкции крепи».

В 60-х годах начинает развиваться новое направление науки – «Охрана горных выработок».

Создаются отраслевые институты: ВНИМИ, ИГД, ВНИИОМШС.

Для осуществления разнообразных технологических процессов в недрах Земли (добыча полезных ископаемых, строительство подземных сооружений и т.п.) требуется знать и предвидеть механическое поведение окружающих массивов пород, чтобы гарантировать устойчивость пород вокруг выработок. Все эти вопросы относятся к **механике горного массива** - науке о прочности, устойчивости и деформируемости горных пород, горнотехнических объектов и сооружений в поле сил горного давления.

Механика горного массива опирается на достижения физики твердого тела, теории упругости и пластичности, реологии и других наук. Основные процессы, изученные механикой горного массива, можно подразделить на три группы: 1) формирование напряженного состояния массивов пород и его

изменение в связи с проведением выработок; 2) сдвигание горных пород; 3) взаимодействие пород и крепей.

Центральным в механике горного массива является понятие *«горное давление»* – это механические силы, действующие в массиве горных пород и вызываемые собственным весом пород, тектоническими движениями земной коры, напорами подземных вод, давлением газов в породах и т.п. Следует также выделять и понятие *«проявление горного давления»* как результат действия сил горного давления, выражающегося в деформациях, сдвигании и разрушении горных пород, а также в силовом взаимодействии между породами и крепью. Следует при этом различать видимые проявления горного давления (деформации крепи, обрушения и т.п.) и такие проявления, которые можно лишь измерить точными и неинструментальными методами (упругие деформации).

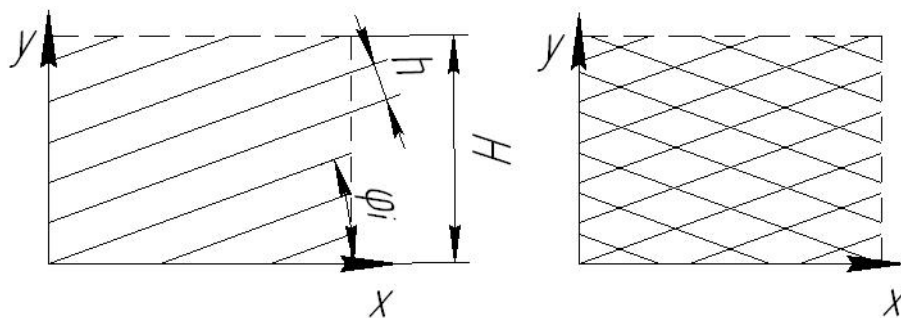
Итак, в соответствии с выше изложенным, основным объектом исследования механики горного массива являются механические процессы, происходящие в горном массиве и связанные главным образом с сооружением в нем выработок.

Общая методология механики горного массива состоит в широком использовании и анализе натуральных наблюдений с одновременным привлечением методов и приемов моделирования и аналитического исследования на базе теоретических положений теории упругости, пластичности и реологии. При этом необходимо отметить, что имея важное значение для горной практики, механика горного массива не стремится к получению точных решений, что невозможно (и даже абсурдно) по отношению к такому объекту как горные породы. Основная задача механики подземных сооружений заключается в предрасчете основных параметров процессов, которыми определяются условия горных работ, с точностью, удовлетворяющей практику.

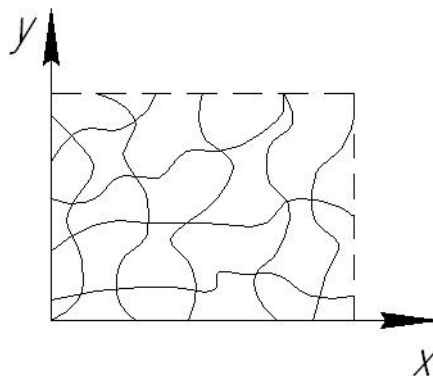
Структурно-механические особенности массивов горных пород

В связи с особенностями образования и залегания горных пород физико-механические свойства массива горных пород существенно отличаются от свойств этих же пород в образце. Одной из причин этого различия является трещиноватость массивов горных пород. По характеру происхождения различают естественную и искусственную трещиноватость. Естественная трещиноватость горных пород связана с геологическими особенностями их образования и последующих изменений. Искусственная трещиноватость формируется в результате технологического влияния на породный массив при сооружении выработок и выемки полезного ископаемого (БВР, напряжения и т.п.).

Трещиноватость может быть *упорядоченной*, когда можно выделить одно или несколько направлений преимущественного распространения трещин (система трещин),



или *неупорядоченной*, когда такого направления выделить нельзя.



Трещины, располагаясь в массиве горных пород, на определенном расстоянии друг от друга, пересекаются, в результате чего массив размером

Н оказывается разбит на множество структурных блоков средним размером h . Отношение H/h называют интенсивностью трещиноватости.

Для практических расчетов, когда прочностные характеристики определены лабораторным путем, на образцах небольшого размера, учет естественной трещиноватости массива рекомендуется осуществлять с помощью коэффициента структурного ослабления K_c

$$R_c^m = \sigma_{сж}^{обр} \cdot K_c$$

Значение K_c определяют по данным геологической разведки. Ориентировочно можно использовать данные таблицы.

Таблица 1. Определение коэффициента K_c

Степень трещиноватости массива	Средний размер отдельности	Характер прочности массива	K_c
Монолит	>1,5	Весьма прочный	0,9
Малая	1-1,5	Прочный	0,8
Средняя	0,5-1	Средней прочности	0,6
Сильная	0,1-0,5	Слабый	0,4
Чрезвычайная	<0,1	Весьма слабый	0,2

Особенностью механических процессов, протекающих в трещиноватом массиве, является его повышенная деформируемость. Это происходит за счет перемещения структурных блоков относительно друг друга. Для учета отличия деформационных характеристик в массиве от образца, рекомендуется использовать следующие зависимости:

$$E_1 = \frac{E}{1 + \sum_1^n \eta_i (1 - \sin^4 \theta_i)} \quad E_2 = \frac{E}{1 + \sum_1^n \eta_i (1 - \cos^4 \theta_i)}$$

где E_1 и E_2 – соответственно модуль деформации (упругости) трещиноватого массива в направлении действия нагрузки в направлении перпендикулярно действию нагрузки;

E – модуль упругости трещиноватого массива в образце;

n – число систем трещин;

θ_i – угол между направлениями i -ой системы трещин и осью X;

η_i – толщина слоя, приходящегося на одну трещину. Вычисляется по формуле:

$$\eta_i = \frac{\rho_i}{\beta_i \cdot n},$$

где ρ_i – толщина слоя, приходящегося на одну трещину;

β_i – относительная площадь скальных контактов в данной трещине, рекомендуется принимать $\beta_i = 3 \cdot 10^{-4}$.

Значение коэффициента Пуассона может быть определено из выражения:

$$\mu = \mu_0 + \sum_1^n \eta_i \cdot \sin^2 \theta_i \cdot \cos^2 \theta_i,$$

где μ_0 – коэффициент Пуассона в образце.

В условиях хаотической трещиноватости модуль деформации определяется по формуле:

$$E_{1,2} = \frac{E}{1 + \frac{5}{8} \cdot n \cdot \eta}$$

Другим фактором, существенно влияющим на механические свойства породного массива, является его *слоистость*. Обычно разделяют два её вида: *микрослоистость* – слоистость в пределах одной литологической разности и *макрослоистость* – наличие различных литологических разностей, слогающих породный массив. При этом массив может быть сложен слоями

без резких скачков в свойствах или с резкими изменениями свойств при переходе от одного слоя к другому. Во втором случае расчетное сопротивление пород сжатию R_{cp}^p следует определить в соответствии с указаниями СНиП по следующей методике:

Расчетное сопротивление пород сжатию $R_{сж}$ по контуру выработки поперечного сечения выработки должно определяться с учетом всех пересекаемых слоев (пластов) мощностью более 0,5 м, залегающих на расстоянии от контура сечения выработки: в кровле – 1,5b, в почве и боках выработки - 1b, где b – ширина выработки, м.

Для ряда смежных слоев, залегающих по контуру поперечного сечения выработки с изменчивостью R в пределах до 30% следует принимать для всей выработки усредненное значение расчетного сопротивления пород сжатию, определяемое по формуле :

$$R_c = \frac{R_{c1} \cdot m_1 + R_{c2} \cdot m_2 + \dots + R_{cn} \cdot m_n}{m_1 + m_2 + \dots + m_n}, \quad (1)$$

где R_c, \dots, R_{cn} – расчетные сопротивления слоев пород сжатию, МПа;
 m_1, \dots, m_2 – мощности слоев, м.

При изменчивости расчетного сопротивления пород сжатию свыше 30%, R_c следует считать по формуле (1) отдельно по элементам выработки (кровле, бокам и почве).

Трещиноватость, слоистость, наличие различного рода включений и дефектов приводит к появлению *неоднородностей* и *анизотропии* породного массива.

Под *неоднородностью* объекта по признаку A понимают зависимость признака A в пределах данного объекта от координат точки опробования.

Под *анизотропией* объекта по признаку A понимают зависимость признака A в пределах данного объекта от направления точки опробования.

По характеристикам неоднородностей и анизотропии породные массивы классифицируются следующим образом:

Таблица 2. Характеристика свойств массива

Массив горных пород	Характеристика свойств массива	
	Однородного	Неоднородного
Изотропный	Не зависят от координат точки опробования и направления	Не зависят от направления, но является функцией координат точки опробования
Анизотропный	Не зависят от координат точки опробования, но зависят от направления	Зависят от направления и являются функцией координат точки опробования

По своему происхождению неоднородность может быть *первичной* и *вторичной*. Первичная возникает при образовании породы и выражается в непостоянстве формы, размеров, ориентировки, состава минеральных частиц и их взаимного расположения в породе. Вторичная связанная с последующими стадиями преобразования горных пород и может быть естественной (выветривание, уплотнение, перекристаллизация) и искусственной (воздействие различных технологических процессов).

Особое место в механике горного массива занимает круг вопросов, связанных с изучением искусственной неоднородности и анизотропии. Причины их появления могут быть различными в зависимости от вида производимых горно-строительных работ. Так при БВР появление неоднородностей связано с трещиноватостью, а при замораживании – с процессом лёдообразования. При этом большое значение имеет область технологического воздействия, т.е. часть породного массива вокруг выработки, в пределах которого свойства отличными от свойств остальной части массива. Интенсивность технологического воздействия в пределах указанной области неодинаковы, т.е. наблюдаются граница наибольшей интенсивности технологического воздействия (контур) и граница, где это воздействие практически не наблюдается. Характер распределения механических характеристик в пределах этой области можно описать следующей зависимостью:

$$A_r = A_m (1 - \alpha \cdot r^{-n}),$$

где A_m – механическая характеристика вне области технологического воздействия;

r – текущая координата;

α, n – параметры аппроксимации кривой распределения;

$$\alpha = 0.98^n;$$

$$n = \frac{1}{\lg \left(1 + \frac{M}{R_B \cdot B^m} \right)},$$

где R_B – радиус выработки в проходке, м;

B - расстояние между окантуривающими шпурами, м;

M, m – коэффициенты, приведенные в таблице 3.

Таблица 3. определение коэффициентов M и m

$\sigma_{сж}$, МПа	Коэффициенты	
	M	m
20-40	1,8	0,85
40-60	1,3	0,75
60-80	1,0	0,70
>80	0,9	0,60

Геомеханические модели породных массивов

Одним из наиболее эффективных методов изучения механических процессов в породных массивах, а также их взаимодействия с подземными сооружениями является метод моделирования, основанный на замене реального породного массива некоторым его идеализированным отображением. Сами модели могут быть физическими, математическими, аналоговыми. Математические модели широко используются в механике горного массива по тем причинам, что они обладают наибольшей общностью, свободны от влияния частных факторов, характеризующих горнотехническую ситуацию. Они позволяют не только качественно, но и количественно прогнозировать развитие механических процессов.

Массив горных пород является сложной физической средой и обладает целым рядом структурно-механических особенностей, которые в значительной степени определяют его механическое состояние. В самом общем случае массив горных пород является физически дискретной, неоднородной, анизотропной средой с начальным напряженным состоянием, механические процессы деформации которой носят нелинейный, временный характер.

Факторы, влияющие на формирование в породном массиве структурно-механических особенностей, могут быть отнесены к двум основным группам: геологические и инженерно-технические

1. Геологические факторы:

для горных пород – тип, физико-механические свойства, и механическое состояние;

для породных массивов – условия залегания, степень нарушенности.

2. Инженерно-технические факторы:

проектные решения – форма и размеры выработки. Расположение выработки в массиве, способ проходки и поддержания;

горно-строительные параметры – время и место установления крепи относительно проходческого забоя, качество проходческих работ и т.п.;

Физические уравнения, характеризующие поведение такой сложной среды, как породный массив, включающий компоненты напряжений, деформаций, физические константы, температуру, время и производные по времени.

Очевидно, что математическое описание такой среды является крайне сложным, а решение конкретных задач обычными методами практически невозможно. Поэтому обычно в качестве объекта исследований рассматривают не собственно породный массив, а его идеализированное отображение – геомеханическую модель.

Геомеханическая модель – это схема, с определенной степенью приближения, отображающая механические свойства реального массива горных пород и закономерности их изменения в пространстве и во времени. При этом следует иметь в виду, что при переходе от массива горных пород к его геомеханической модели, ряд структурно-механических особенностей учитываются не в явном виде, а косвенно. Например, массив горных пород с естественной трещиноватостью может быть представлен моделью сплошной, нетрещиноватой, но анизотропной среды с эквивалентными характеристиками. Во-вторых, в конкретной горно-механической обстановке степень проявления различных структурно-механических особенностей может быть такой, что их учет не внесет принципиально качественных и количественных изменений в оценку изучаемых механических процессов.

В зависимости от вида выбранной геомеханической модели её исследование осуществляется с помощью методов механики сплошной или дискретной среды, т.е. модель сплошной или дискретной среды.

Следует отметить, что модели дискретной среды ближе отражают реальные свойства породных массивов и применение их весьма перспективно. Однако, в настоящее время, из-за математических трудностей, практическое использование в проектных решениях затруднено.

Погрешность идеализации, допускаемая при описании дискретного массива моделями сплошной среды, компенсируется возможностью практического использования этих решений. Поэтому в дальнейшем будем рассматривать только сплошной массив.

Фундаментальная гипотеза о сплошности среды сводится к тому, что деформации напряжения в точках сплошной среды являются функциями координат, т.е. сплошность рассматривается как понятие математическое. В основе выбора геомеханической модели сплошной среды лежат понятия *элементарного объема, критерия квазисплошности и квазиоднородности*.

Элементарным следует считать объем, обладающий всеми свойствами данного породного массива, но настолько малый по сравнению с изучаемым объектом, что его напряженно-деформированное состояние может рассматриваться как напряженно-деформируемое состояние в точке, т.е. это тот бесконечно малый объем породного массива, который еще обладает всеми свойствами массива.

Так как горная порода представляет собой минеральный агрегат, то в ней можно выделить малые, но имеющиеся определенные размеры объема, которые еще обладают всеми свойствами породы. При дальнейшем уменьшении этих объемов начинают существенно проявляться свойства слагающих минералов. Размеры таких объемов зависят от типа породы, от крупности слагающих её минералов и их взаимного расположения.

Для определения линейного размера l_0 элементарного объема можно использовать следующую зависимость:

$$l_0 = 10h \quad , \quad (1)$$

где h – средний характерный размер характерного блока.

Следовательно, размер элементарной площадки примерно на порядок больше размера структурного блока. Кроме того элементарным размером следует считать такой размер, в пределах которого изменение напряжений не превышает 15%, т.е. допустимой погрешности.

Известно соотношение между величиной этой погрешности и относительными размерами элементарной площадки:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{l_0}{L}} = 0.15, \quad (2)$$

где L – размер исследуемой области массива.

Подставив (2) в (1) получаем выражение для определения размера структурного блока, который позволяет в пределах исследуемой области выделить элементарный объем:

$$h = 0.0025L \quad (3)$$

Например, если $L = 12\text{м}$, то для обоснования использования геомеханической модели сплошной среды должно выполняться равенство $h \leq 0.3\text{м}$.

Теперь рассмотрим понятие квазисплошности (условно-сплошности). Трещиноватый массив можно считать квазисплошным, если размер исследуемой его области на два порядка больше среднего размера структурного блока. В качестве критерия, позволяющего рассматривать массив как квазисплошной можно использовать:

$$\Delta A \ll \varepsilon \text{ при } \Delta a \ll l_0,$$

где ΔA – разность значений напряжений, деформаций и смещений в соседних точках массива с приращением координат Δa ;

l_0 – линейный размер элементарного объема;

ε – допускаемая погрешность, равная 15%.

При невыполнении этого условия следует пользоваться способами механики сплошной среды. В отличие от сплошной среды, дискретная среда представляет собой систему отдельностей, причем каждая из них имеет определенную форму, например круга, эллипса, прямоугольника.

Напряженное состояние нетронутого горного массива

Это является одной из важнейших задач механики горного массива, т.к. решать задачу о напряжениях и деформациях в массиве нарушенном горной выработкой, возможно только, если известны напряжения которые были в массиве до ее проведения.

Нетронутым массивом горных пород называют участок земной коры в котором не имеются горные выработки, либо они удалены настолько, что не оказывают влияние на напряженное состояние данного участка.

Изучение напряженного состояние нетронутого массива является крайне сложной задачей, т.к. для непосредственных замеров необходимо проведение горной выработки или скважины, что ведет к нарушению массива. Рассмотрим основные факторы, влияющие на напряженное состояние нетронутого массива.

Главным фактором является *глубина залегания*. От нее зависит напряженное состояние во всех участках земной коры, при этом σ_z за счет сил гравитации, по мере увеличения глубины пропорционально возрастает.

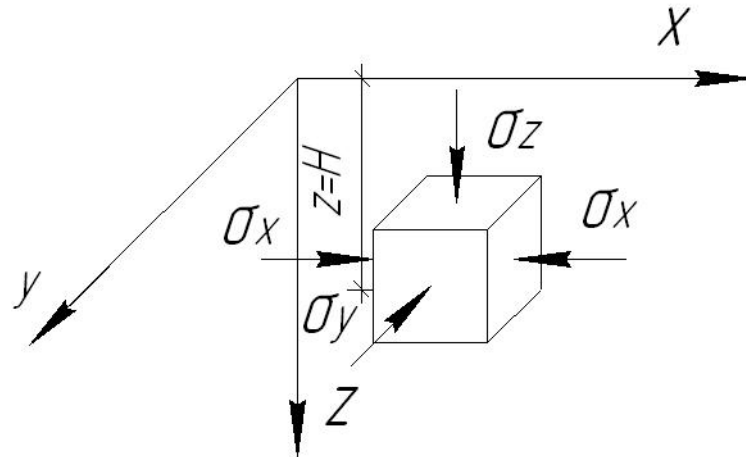
Вторым фактором, определяющим напряженное состояние в некоторых участках земной коры, являются *тектонические силы*. Этот фактор имеет значение в горноскладчатом массиве и для Донбасса значения не имеет.

Неоднородность строения массива и его анизотропность могут вызвать при его формировании усложнения напряженного состояния.

Степень жесткости соседних пород также может влиять на распределение напряжений, как местное явление в районах контактов более прочных и менее прочных пород.

Важным и очень сложным фактором является *время*. Земная кора находится непрерывном движении во времени, имеющее значение порядка геологических эпох. Сроки же ведения горных работ сравнительно с геологическими эпохами крайне мизерны. Поэтому в механики горного массива принято считать, что напряженное состояние массива пород является постоянным во времени.

Таким образом напряженное состояние нетронутого массива принимается как статическое, равновесное, вызванное действием сил гравитации. Для оценки компонентов напряженного состояния нетронутого массива принимаем его однородным и изотропным. Мысленно выделим в массиве на глубине H от поверхности элементарный кубик.



Для удобства ориентируем кубик так в пространстве, чтоб действующие на его грани напряжения σ_x , σ_y , σ_z были главными нормальными напряжениями.

$$\sigma_z = \gamma \cdot H; \quad \sigma_x = \sigma_y = \lambda \cdot \gamma \cdot H,$$

где λ – коэффициент бокового распора, характеризующий, какая часть вертикальной нагрузки расходуется на работу в горизонтальной плоскости.

В некоторых случаях порода может быть принята как упругая среда. Тогда для определения λ запишем деформации от действия всех σ в направлении оси X.

$$\varepsilon_{xy} = \mu \frac{\sigma_y}{E}; \quad \varepsilon_{xz} = \mu \frac{\sigma_z}{E}; \quad \varepsilon_{xx} = -\frac{\sigma_x}{E}$$

$\varepsilon_y = 0$, т.к. массив не нарушен.

$$\mu \sigma_y + \mu \sigma_z - \sigma_x = 0, \text{ но } \sigma_x = \sigma_y$$

$$\text{Тогда } \mu \sigma_y + \mu \sigma_z - \sigma_y = 0$$

$$\sigma_y = \frac{\mu}{1 - \mu} \cdot \sigma_z,$$

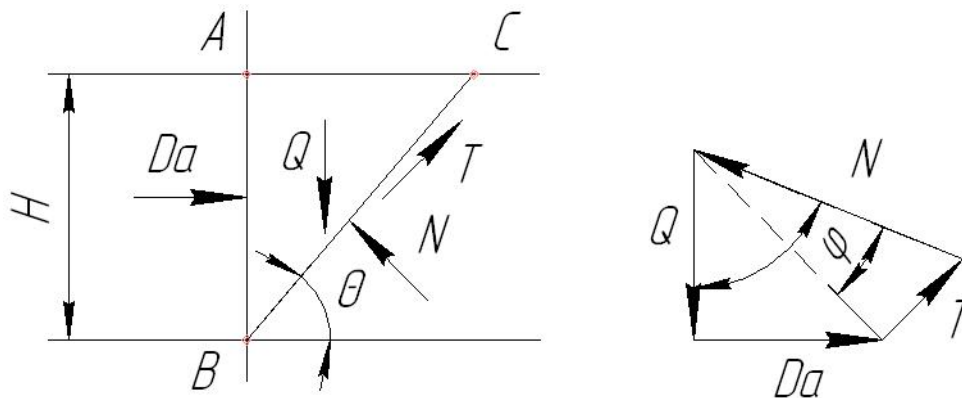
где $\frac{\mu}{1 - \mu_z} = \lambda$.

Коэффициент Пуассона для различных пород в среднем равен от 0,2 до 0,5, поэтому λ может изменяться от 0,2 до 0,5. однако экспериментально установлено, что с увеличением глубины, λ стремится к единице.

Коэффициент бокового распора в сыпучих породах

Как известно сыпучие породы не обладают сопротивлением растяжению ($\sigma_p=0$) и сцеплением ($C=0$), имеют только трение. Приняв это условие определим коэффициент бокового распора.

Рассмотрим массив, сложенный идеально сыпучей породой с углом внутреннего трения γ и объемным весом γ .



Глубину от поверхности примем H , а ширину (перпендикулярно к плоскости схемы) – равной единице.

Мысленно отсечем левую часть массива по плоскости AB и отбросим ее. Тогда призма ABC за счет своего веса начнет сползать вниз под некоторым углом Θ , но так как имеется массив, то призма будет находится в предельном состоянии и поэтому оказывать давление на мысленную плоскость AB . Противодействовать сползанию призмы будет сила D_A – активное давление.

Силой, вызывающей скольжение, будет все призмы Q . Силами, препятствующими скольжению, будет сила D_A , сила трения на плоскости

скольжения T и нормальная реакция N . Строим многоугольник сил, из которого следует:

$$D_a = Q \cdot \operatorname{tg}(\theta - \zeta) \quad (1)$$

Все призмы Q определим по формуле:

$$Q = \frac{1}{2} H \cdot H \cdot \operatorname{tg}(90 - \theta) \cdot \gamma = \frac{1}{2} \gamma \cdot H^2 \operatorname{tg}(90 - \theta) \quad (2)$$

Подставим (2) в (1):

$$D_a = \frac{1}{2} \gamma \cdot H^2 \cdot \operatorname{tg}(90 - \theta) \cdot \operatorname{tg}(\theta - \zeta) \quad (3)$$

Из выражения (3) видно, что величина D_a при изменении угла Q от 0 до 90° имеет максимум. В этой связи исследуем ее на максимум:

$$\frac{dD_a}{dQ} = 0 \quad (\text{взять дома})$$

$$\text{От куда} \quad \theta = \frac{90 - \zeta}{2} \quad (4)$$

Подставив значение θ в (3)

$$D_a = \frac{1}{2} \gamma \cdot H^2 \cdot \operatorname{tg}^2\left(\frac{90 - \zeta}{2}\right)$$

Для определения горизонтального напряжения σ_x как функции H :

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{dD_a}{dH} = \gamma \cdot H \cdot \operatorname{tg}^2\left(\frac{90 - \zeta}{2}\right)$$

$$\text{т. е. } \lambda = \operatorname{tg}^2\left(\frac{90 - \zeta}{2}\right)$$

Коэффициент бокового распора, для реальных грунтов имеют следующее значение

песок	0,35 – 0,41
суглинки	0,5 – 0,7
глина	0,7 – 0,74

Напряженное состояние горных пород вокруг выработок

Проведение горной выработки нарушает равновесие напряженного состояния горного массива, т. е. вносит изменение в напряженное состояние. Это объясняется тем, что столб породы на величину пролета выработки лишается непосредственной опоры, вес этого столба передается на смежные части массива, вместе с тем одно из главных напряжений на контуре выработки = 0

Новое поле напряжений характеризуется коэффициентом концентрации напряжений, который показывает во сколько раз изменились значения компонентов напряжений относительно соответствующим составляющим исходного напряжения, т.е. напряжений не нарушаемого массива

$$K_x = \frac{\sigma'_x}{\sigma_x} = \frac{\sigma'_x}{\lambda \cdot \gamma \cdot H}$$

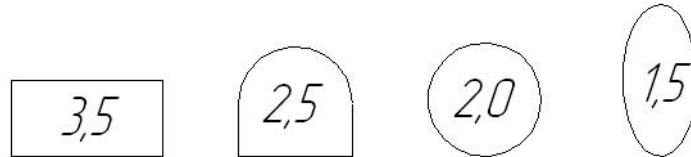
$$K_y = \frac{\sigma'_y}{\sigma_y} = \frac{\sigma'_y}{\lambda \cdot \gamma \cdot H}$$

$$K_z = \frac{\sigma'_z}{\sigma_z} = \frac{\sigma'_z}{\lambda \cdot \gamma \cdot H}$$

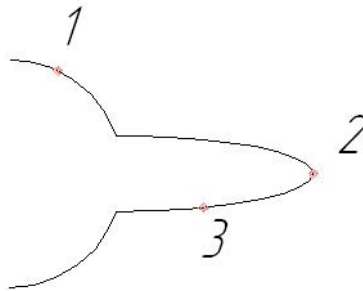
Величина коэффициентов концентрации зависит от следующих основных факторов:

- 1) Форма выработки;
- 2) Характера неровностей контура выработки;
- 3) Отношение ширины выработки к ее высоте;
- 4) Исходного напряженного состояния массива (от λ);
- 5) Абсолютных размеров выработки;
- 6) Условий залегания пород.

Форма выработки



При проходке выработок БВР способом их контур всегда неровный особенно заметны неровности в местах расположения шпуров. Значение К зависит от числа окантуривающих шпуров, глубины неровностей, точки на контуре.



Точка	1	2	3
К	2,0	9,3	1,2

Формула для определения К имеет следующий вид:

$$K = 2 \cdot \frac{1 - [(N-1) \cdot C]^2}{1 + [(N-1) \cdot C]^2 - 2 \cdot (N-1) \cdot C \cdot \cos(N \cdot \theta)}$$

N – число окантуривающих шпуров

- среднее значение глубины неровностей отнесенное к радиусу

проектного контура выработки

θ – угол отсчета от условной оси, проходящей через центр выработки и середину вывала.

Отношение ширины к высоте

Форма выработки	Круглая	Трапецевидная		Сводчатая с прямыми стенками		Арочная	
		В/h	1	1,5	1,0	1,5	1,0
К	2,0	2,6	2,7	2,0	2,5	2,8	3,0

От исходного напряженного состояния (от λ)

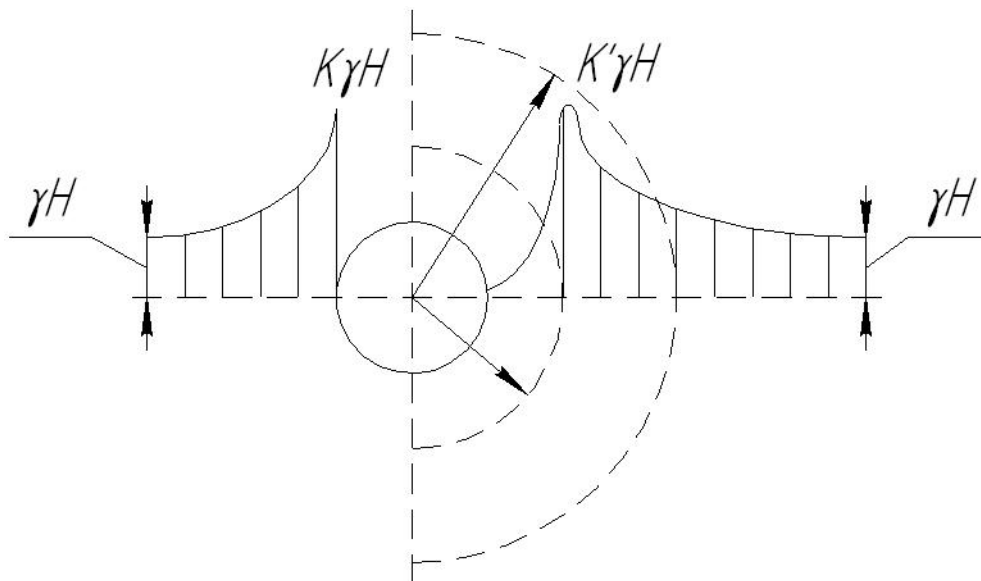
В породах, имеющих меньший λ , напряжения на контуре будут больше. Поэтому в круглой выработке, пройденной в более прочных породах (песчаная) следует ожидать большую концентрацию напряжений, чем если бы эта выработка была пройдена в более слабых породах (глинистые сланцы).

Итак, проведенная выработка ведет к перераспределению напряжений и возникновению нового поля напряжений. При этом можно выделить три случая:

1) Новое поле напряжений не превышает прочностных характеристик – порода не разрушается, выработка устойчива

2) Новое поле напряжений не превышает прочностных характеристик – порода вокруг выработки разрушается, образуется локальная зона деформированных пород (ЗНД)

3) Напряжение значительно превышает прочностные характеристики – наблюдаются динамические проявления горного давления (горные удары, выбросы, обрушения).



Рассмотрим характер распределения напряжений вокруг горной выработки, применительно ко 2-му случаю.

Теоретическое определение напряжений в породах, окружающих горную выработку является довольно сложной задачей. При этом неизбежно приходится идеализировать условия, принимая породу как однородную, изотропную и упругую среду, а сечение выработки – круглым. При этом результаты этого решения носят, в основном, качественный характер. Нахождение напряжений вокруг выработки обычно решается как плоская задача, причем принимаются напряжения, вызванные только весом пород. За основные неизвестные принимают три компонента напряжений σ_x , σ_y и τ_{xy} (плоская задача), которые определяются в результате совместного решения трех уравнений (путем интегрирования) два уравнения равновесия:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0$$

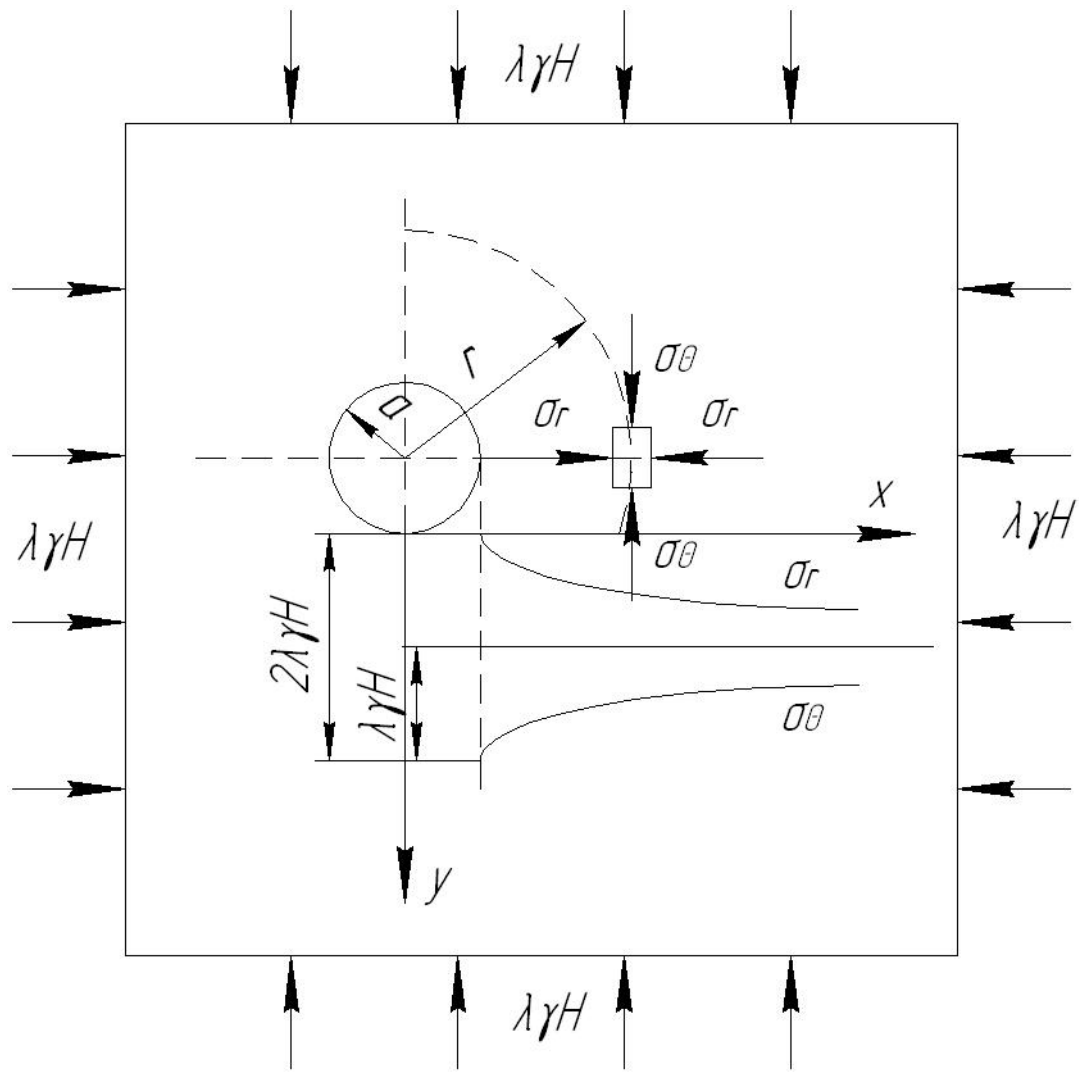
$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = 0$$

И одно уравнение совместности напряжений

$$\frac{\partial^2 \sigma_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \sigma_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \sigma_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \sigma_y}{\partial x^2} = 0$$

т.к. решение довольно сложное, используют ЭВМ.

Вертикальные выработки



Теоретическая оценка напряжений вокруг вертикальной выработки дана профессором С. Г. Лихницким. Им решена задача о распределении напряжений вокруг круглого отверстия в упругой невесомой пластине при нагружении ее равномерной нагрузкой $= \lambda\gamma H$

Нормальные напряжения в точке на расстоянии r от центра выработки размером a определяются по формулам:

$$\sigma_r = \lambda \cdot \gamma \cdot H \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right)$$

$$\sigma_\theta = \lambda \cdot \gamma \cdot H \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right)$$

$$\text{При } r = a \quad \sigma_{\theta} \rightarrow 2\lambda \cdot \gamma \cdot H \quad \sigma_r \rightarrow 0$$

$$\text{При } r \rightarrow \infty \quad \sigma_{\theta} \rightarrow \lambda \cdot \gamma \cdot H \quad \sigma_r \rightarrow \lambda \cdot \gamma \cdot H$$

$$\text{Так как } \tau = \frac{\sigma_{\theta} - \sigma_r}{2}, \text{ то при } r \rightarrow a, \quad \tau \rightarrow \lambda \cdot \gamma \cdot H$$

Таким образом на контуре выработки наблюдаются max разрушающие напряжения, по Мере удаления – они снижаются.

Оценка устойчивости горных выработок

Под устойчивостью выработки понимают ее способность сохранить форму и размеры необходимые для безопасного выполнения технологических функций.

Существуют в методике оценки, как устойчивости всей выработки так и отдельных ее элементов.

Оценка устойчивости выработки в целом. Методика УкрНИМИ

В основу этой методики положена величина смещений контура выработки за весь период ее эксплуатации.

Категория устойчивости	Оценка устойчивости	Величина смещения	Рекомендации по поддержанию
1	устойчивые	< 50мм	выработка может быть без крепи, легкие ограждения.
2	средне устойчивые	50-200мм	поддерживается несущими конструкциями крепи
3	неустойчивые	200-500мм	тяжелые конструкции крепи
4	весьма неустойчивые	> 500мм	тяжелые конструкции крепи и способы охраны

2. Оценка устойчивости выработок по критерию устойчивости

Критерий устойчивости характеризует соотношение между действующими в массиве горных пород напряжениями и прочностью вмещающих пород.

$$K_y = \frac{\gamma \cdot H}{K_c \cdot \sigma_{сж.}}$$

где K_c – коэффициент структурного ослабления.

В соответствии с этим критерием все выработки подразделяются на 5 категорий:

1. $K_y < 0,2$ весьма устойчивые выработки; разрушений и деформаций пород по контуру выработки не наблюдается, горное давление отсутствует. Выработка может эксплуатироваться без крепи.
2. $0,2 < K_y < 0,3$ устойчивые выработки ; деформациям подвержены до 10% периметра и глубина деформаций до 0,5м. Горное давление проявляется в виде вывалов и обрушений, применяют грузонесущие конструкции крепи параметры которой рассчитывают .
3. $0,3 < K_y < 0,4$ частично устойчивые выработки ; деформациям подвержено до 50% периметра , глубина до 1м, горное давление рассчитывают по инженерным методикам , параметры крепи обязательно рассчитываются.
4. $0,4 < K_y < 0,5$ неустойчивые выработки, деформациям подвержено более 50% периметра , глубина их больше 1м. Горное давление определяют по инженерным методикам с обязательной проверкой на вывал. Рассчитывают как постоянную та и временную крепь, обязательно применение способов охраны.
5. $K_y > 0,5$ весьма неустойчивые выработки; деформациям подвержен весь периметр выработки глубиной более 1м. применяются тяжелые конструкции крепи и комбинированные способы охраны.

3. Оценка устойчивости по предельной глубине

Предельной называют глубину начиная с которой наблюдается проявление горного давления:

$$H_{np} = \frac{K_c \cdot \sigma_{сж}}{K \cdot \gamma \cdot n} ,$$

где

- K - коэффициент концентрации напряжений;
- γ - объемный вес породы;
- n - коэффициент запаса прочности (принимается в зависимости от формы выработки);

* $H_{np} > H_{ф}$ - выработка устойчива ;

* $H_{np} < H_{ф}$ - выработка неустойчива ;

Оценка устойчивости пород кровли по предельному пролету

Предельный пролет-ширина выработки при которой в не наблюдаются определенного вида деформации.

Существует 3 предельных пролета:

1. Когда в кровле выработки наблюдается только упругие деформации.
2. Когда в кровле выработки наблюдаются трещинообразования т.е. неупругие деформации.
3. Когда происходит обрушение кровли.

Величину 1 предельного пролета определяют по формуле:

$$B_l = \frac{150}{H} \sqrt{\frac{4 \cdot K_c \cdot \sigma_p \cdot h}{3 \cdot \gamma}}$$

где:

- Н - глубина заложения выработки;
- σ_p - предельная прочность на растяжение (0,1-0,15)* $\sigma_{сж}$;
- h - мощность пород залегающих непосредственно в кровле выработки;
- γ - объемный вес пород;

Если:

- $B_i > B_\phi$ - кровля устойчива и можно использовать плоское обнажение;
- $B_i < B_\phi$ - кровля не устойчива , возможны обрушения , используется только криволинейные формы обнажений.

Оценка устойчивости пород почвы по расчетной ширине

Расчетная ширина определяется по формуле:

$$B_p = \frac{n_n \cdot K_c \cdot \sigma_{сж}}{\gamma \cdot H} ,$$

где:

n - коэффициент учитывающий направление выработки относительно напластований:

- вкрест простирания ($n=1,6$ перпендикулярно напластованиям);
- по простиранию ($n=1,4$ параллельно напластованиям);
- под углом ($n=1,22$);

Если :

- $B_p > B_{\phi}$ - почва устойчива , пучения не наблюдаются ;
- $B_p < B_{\phi}$ - почва не устойчива ;

Оценка устойчивости пород почвы по методике УкрНИИМИ

Степень пучения	Смещение почвы U_n , мм	Скорость смещений V , мм/мес	Начало проявления в метрах от забоя
слабоинтенсивное	< 200	< 30	> 20
интенсивное	200-600	30-150	5-20
весьма интенсивное	>600	>150	< 5

По правилам безопасности допустимое поднятие пород почвы при:

- рельсовом транспорте-250мм;
- при конвейерном -500 мм;

Гипотезы горного давления

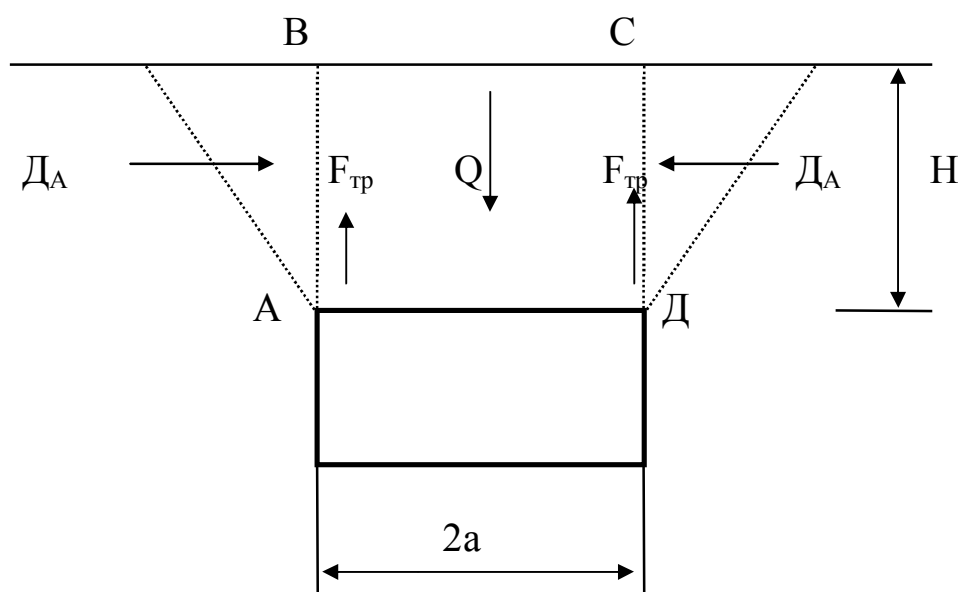
Все гипотезы горного давления подразделяются на 2 большие группы:

1. Гипотезы рассматривающие горное давление как некоторую внешнюю нагрузку независимую от напряженного деформированного состояния горных пород и их физико-механических свойств, в пределах размера выработки; т.е. нагрузку считают на вес породы в пределах некоторого объема. Эта группа называется: "Гипотезы заданной нагрузки".
2. Гипотезы рассматривают горное давление как результат образования вокруг выработки зоны разрушенных пород и ее взаимодействие с крепью. Эти гипотезы называются "Гипотезы заданной деформации".

Гипотезы заданной нагрузки:

1. Гипотеза Бирбаумера

Согласно этой гипотезы на выработку шириной $2a$ расположенной на глубине H в массиве однородных изотропных пород с объемным весом γ , оказывает давление вес столба породы ABCD ослабленный за счет сил трения по плоскостям AB и CD.



Согласно этой гипотезе, на выработку шириной $2a$, расположенную на глубине H в массиве однородных и изотропных пород с объёмным весом γ , оказывает давление вес столба породы ABCD, ослабленный за счёт сил трения по плоскостям АВ и СД.

$$P = Q - 2F_{mp}$$

$$P = 2a \cdot \gamma \cdot H - \gamma \cdot H^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \frac{90^\circ - \varphi}{2} \cdot \operatorname{tg} \varphi$$

$$F_{mp} = D_a \cdot \operatorname{tg} \varphi$$

$$D_a = \frac{\gamma \cdot H^2}{2} \cdot \operatorname{tg}^2 \frac{90^\circ - \varphi}{2}$$

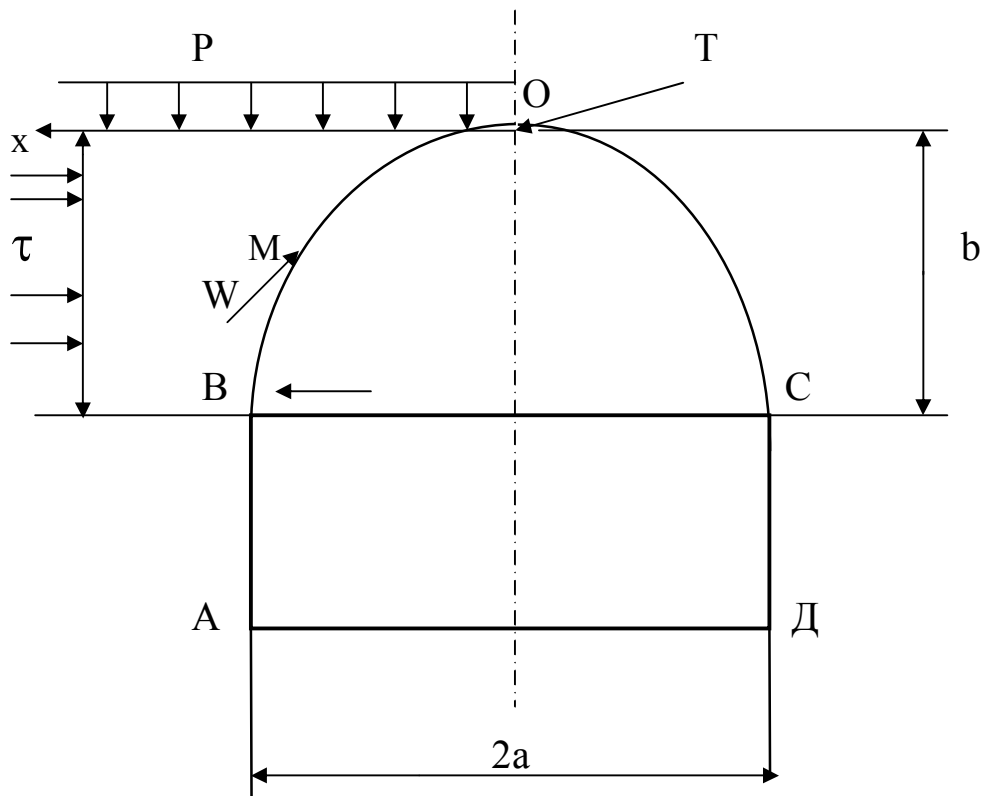
$$H \leq \frac{2a}{\operatorname{tg}^2 \frac{90^\circ - \varphi}{2} \cdot \operatorname{tg} \varphi}$$

Данная методика применяется для расчета нагрузки на крепь в выработках с глубиной заложения не более 50м.

2. Гипотеза Протодьяконова

Согласно этой гипотезы в кровле выработки шириной $2a$ расположенной на глубине H в однородном и изотропном массиве образуется свод разрушенных пород ВОС. Свод полностью воспринимает нагрузку от выше расположенных пород и не передает ее на крепь. Давление же на крепь оказывает вес пород внутри свода.

Чтобы определить нагрузку на крепь нужно установить какая форма свода и какие его размеры. Чтобы решить эти задачи расположим в вершине свода систему координат ХУ и рассмотрим равновесие произвольного участка ОМ отбросив части свода МВ и ОС и заменив их реакциями W, T.



$$\Sigma M_M = -T \cdot y + \frac{Px^2}{2} = 0 \quad (1)$$

Из уравнения (1) следует, что

$$y = \frac{Px^2}{2T} \quad (2)$$

Уравнение параболы, свод имеет форму параболы.

Рассмотрим равновесие точки В. На точку В действует сила Т которая стремится сдвинуть ее с равновесия, препятствует этому сила трения $F_{тр}$.

$$\begin{aligned} T &\leq F_{тр} \\ T &\leq P \cdot a \cdot f_{тр} \end{aligned} \quad (3)$$

В качестве запаса прочности введем некоторую силу δ которая действует по высоте свода. Тогда условие (3) запишем :

$$T + \tau \cdot b \leq P \cdot a \cdot f_{тр} \quad (4)$$

Из уравнения (2) имеем:

$$T = \frac{Px^2}{2y}$$

$$\frac{Pa^2}{2b} + \tau \cdot b = P \cdot a \cdot f_{mp} \quad (5)$$

Решим уравнение (5) относительно силы τ :

$$\tau = P \cdot a \cdot \frac{2f \cdot b - a}{2b^2} \quad (6)$$

Свод будет максимально устойчив если запас прочности будет максимальный т.е. $\tau = \max$:

$$\frac{d\tau}{db} = P \cdot a \cdot \frac{a - b \cdot f}{b^3} \quad (7)$$

$$P \cdot a \cdot \frac{a - b \cdot f}{b^3} = 0$$

$$P \cdot a^2 - P \cdot a \cdot b \cdot f = 0 \quad (8)$$

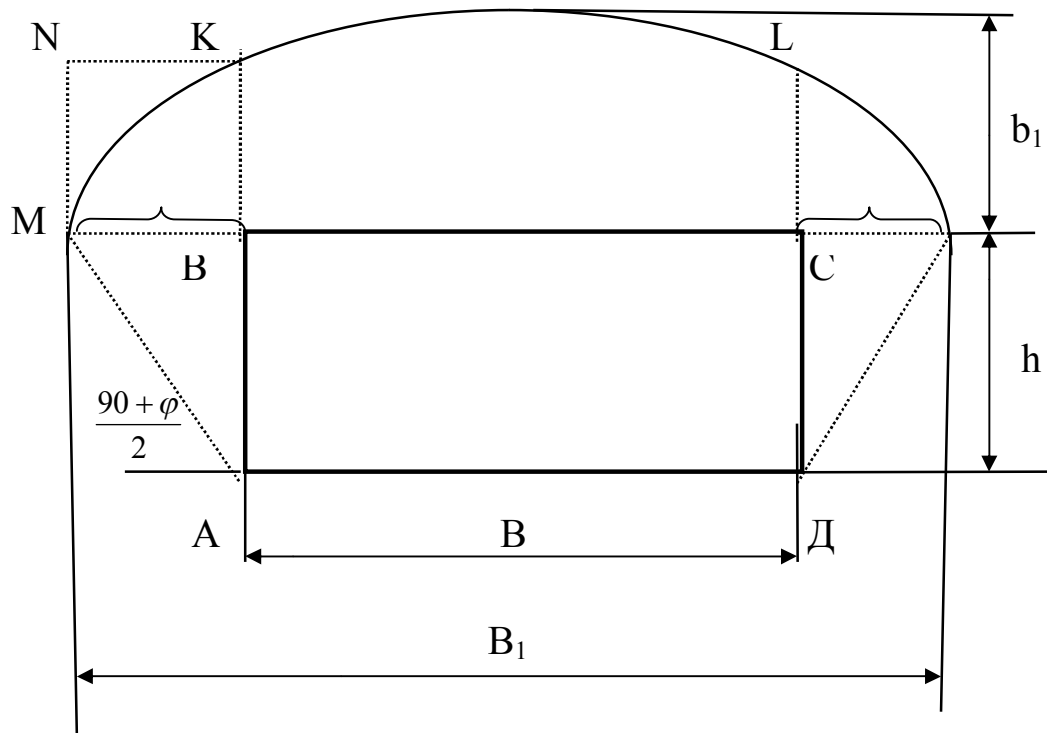
$$b = \frac{a}{f} \quad (9)$$

$$S_n = \frac{2}{3} \cdot 2 \cdot a \cdot b = \frac{4}{3} \cdot \frac{a^2}{f}$$

$$P = \frac{4}{3} \cdot \frac{a^2}{f_{mp}} \cdot \gamma$$

Данная зависимость не учитывает глубины заложения выработки, что является основным ее недостатком, но вместе с этим для выработок с глубиной заложения 400-500м ее можно использовать для расчета нагрузки на крепь.

3. Гипотеза профессора Цимбаревича



Цимбаревич в своей гипотезе рассматривал случай когда свод разрушенных пород образовывался не только в кровле выработки, но и в боках. В основу своего решения он положил гипотезу Протодяконова, но нагрузку определял не только с кровли, но с боков.

Нагрузки со стороны кровли определили как вес породы в пределах призмы $BKLC$:

$$P_k = B \cdot b_1 \cdot \gamma$$

$$b_1 = \frac{B_1}{2f}$$

$$B_1 = B + 2l$$

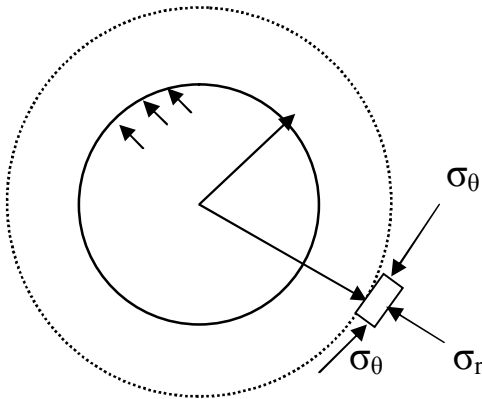
$$l = h \cdot \operatorname{ctg} \frac{90 + \varphi}{2}$$

Давление со стороны боков определялось как активное давление в призме сползания AMB с пригрузом в виде столба породы $MNKВ$, тогда:

$$P_T^B = \gamma \cdot b_1^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \frac{90 - \varphi}{2}$$

$$P_{\sigma}^A = \gamma \cdot (h + b_1) \cdot \operatorname{tg}^2 \frac{90 - \varphi}{2}$$

**Гипотезы заданной деформации:
Гипотеза Феннера – Лабаса**



Рассмотрим горную выработку радиусом r , сооруженную в массиве однородных и изотропных пород на глубине H .

Вокруг выработки образовалась зона разрушенных пород радиусом R .

Породы в пределах этой зоны приняты сыпучими.

В выработке установлена крепь с отпором P . Задача сводится к определению отпора крепи P , при котором система была бы в равновесии и устойчива.

$$\frac{\sigma_{\theta}}{\sigma_r} = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} = K - 1 \quad (1)$$

$$K = \frac{2}{1 - \sin \varphi} \quad (2)$$

Путём физического моделирования в эквивалентных материалах было установлено, что

$$\sigma_r = P \cdot \left(\frac{R}{r} \right)^{K-2} \quad (3)$$

Т.к. породы приняты упругими (за пределами зоны упругих деформаций), то

$$\sigma_{\theta} - \sigma_r = 2 \cdot \lambda \cdot \gamma \cdot H \quad (4)$$

Из выражения (4) следует

$$\sigma_r = 2 \cdot \lambda \cdot \gamma \cdot H - \sigma_\theta \quad (5)$$

Из выражения (1) следует

$$\sigma_\theta = \sigma_r \cdot (K - 1) \quad (6)$$

Подставим уравнение (6) в уравнение(5) и получим:

$$\sigma_r = 2 \cdot \lambda \cdot \gamma \cdot H - \sigma_r \cdot (K - 1) \quad (7)$$

$$\sigma_r = \frac{2 \cdot \lambda \cdot \gamma \cdot H}{K} \quad (8)$$

Приравняем уравнение (3) к уравнению (8), тогда

$$\frac{2 \cdot \lambda \cdot \gamma \cdot H \cdot (1 - \sin \varphi)}{2} = P \cdot \left(\frac{R}{r} \right)^{\frac{2}{1 - \sin \varphi} - 2}$$

$$P = \lambda \cdot \gamma \cdot H \cdot (1 - \sin \varphi) \cdot \left(\frac{r}{R} \right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}}$$

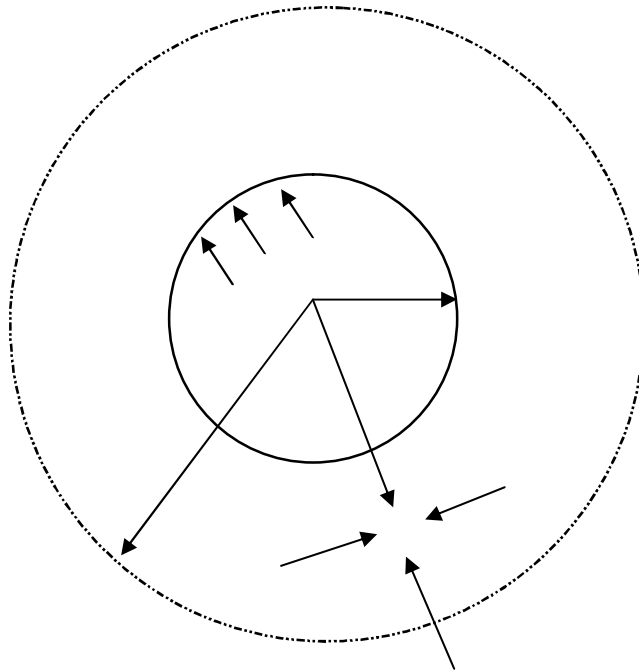
Эту формулу следует понимать так :

Какую крепь необходимо поставить в выработке при известных значениях R, r, чтобы она была устойчива.

2. Аналитико-экспериментальная гипотеза профессора Заславского

Рассмотрим круглую выработку радиусом r_0 -расположенную на глубине H , однородных и изотропных пород с объемным весом γ . В выработке установлена крепь с отпором P, вокруг выработки образовалась зона разрушенных пород радиусом R. Породы в пределах этой зоны приняты пластичными. Нагрузка на крепь рассматривается как результат разрушения пород и смещения их в выработку.

$$U = f(\gamma \cdot H \cdot \sigma_{сж}, r_o, P, E)$$



Для упрощения вида данной зависимости используем теорию размерности, согласно которой можно утверждать, что в полной системе состоящей из 1-го неизвестного и n влияющих факторов, можно составить K независимых комбинаций влияющих факторов имеющих одну и ту же размерность. Причем:

$$K = (n + 1) - t$$

где :

t - число независимых размерностей;

$$K = (5 + 1) - 2 = 4 ;$$

$$\frac{U}{r_o}, \frac{\gamma \cdot H}{\sigma_{сж}}, \frac{P}{E}, \frac{P}{\sigma_{сж}}$$

Определим значимость каждого из этих соотношений:

$$\frac{U}{r_o} = 10^{-1}; \quad \frac{\gamma \cdot H}{\sigma_{сж}} = 1; \quad \frac{P}{\sigma_{сж}} = 10^{-1};$$

МОЖЕМ ЗАПИСАТЬ:

$$\frac{U}{r_o} = f \cdot \left(\frac{\gamma \cdot H}{\sigma_{сж}} \cdot \frac{P}{\sigma_{сж}} \right)$$

Чтобы найти вид данной зависимости запишем 2-а уравнения:

$$\sigma_r - \sigma_\theta + r \cdot \frac{d\sigma_r}{dr} = 0 \quad \text{- уравнение равновесие;}$$

$$\sigma_\theta - \sigma_r = \alpha \cdot \sigma_{сж} \quad \text{- уравнение пластичности;}$$

где:

α – неизвестный коэффициент пластичности;

r – текущий радиус.

Решив систему получаем :

$$r \cdot \frac{d\sigma}{dr} = \alpha \cdot \sigma_{сж} \quad (3)$$

$$\int d\sigma_r = \int \frac{dr}{r} \cdot \alpha \cdot \sigma_{сж}$$

$$\sigma_r = \alpha \cdot \sigma_{сж} \cdot \ln r + c \quad (4)$$

Рассмотрим условия :

при $r = R$:

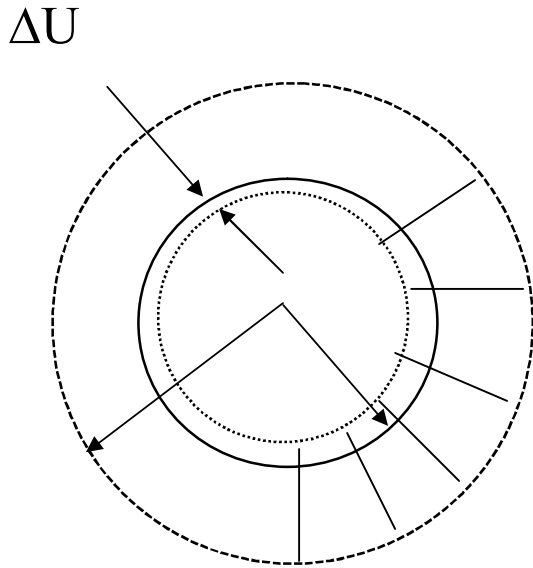
$$\sigma_r = \beta \cdot \gamma \cdot H; \quad C = \beta \cdot \gamma \cdot H - \alpha \sigma_{сж} \cdot \ln R$$

при $r = r_o$: $\sigma_r = P$

$$P = \alpha \cdot \sigma_{сж} \cdot \ln r_o + \beta \cdot \gamma \cdot H - \alpha \cdot \sigma_{сж} \cdot \ln R$$

$$\frac{R}{r_o} = e^{\frac{2 \cdot (\beta \cdot \gamma \cdot H - P)}{\alpha \sigma_{сж}}} \quad (6)$$

Пример:



$$\Pi \cdot (R^2 - r_o^2) \cdot K_p = \Pi \cdot [R^2 - (r_o - U)^2]$$

решим относительно :

$$\frac{U}{r_o} = \frac{K_p - 1}{2} \cdot \left(\frac{R^2}{r_o^2} - 1 \right) \quad (7)$$

Подставим уравнение (7) в уравнение (6):

$$U = A \cdot r_o \cdot \left[e^{\frac{2 \cdot (\beta \cdot \gamma \cdot H)}{\alpha \cdot \sigma_{сж}}} - 1 \right]$$

где:

$$A = A_1 \cdot \frac{K_p - 1}{2}$$

A_1 – некоторый неизвестный коэффициент учитывающий неравномерность разрушений пород в конце зоны.

Далее для определения значений неизвестных коэффициентов на шахтах Донбасса в некоторых выработках проводились массовые измерения смещений их контура после решая обратную задачу находили эти коэффициенты.

Характеристика вывалообразования

Вывал - это часть контурного объема пород отделившаяся от массива в результате трещинообразований.

Характеризуется следующими параметрами :

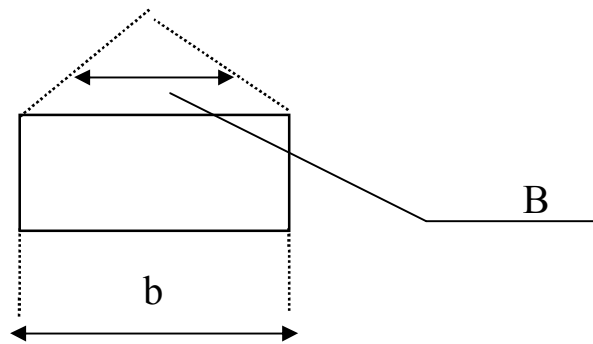
- Направлением;
- Формой;
- Состоянием вновь образовавшейся поверхности.

Направление вывала оценивается углом наклона его оси к горизонту (углом β).

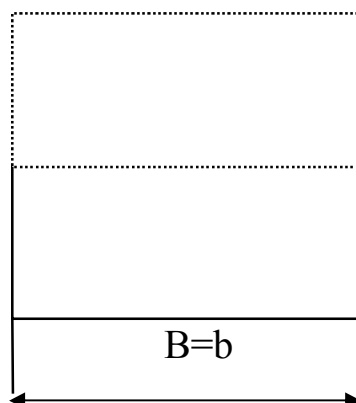
1. Если $60 < \beta < 90^\circ$ - прямой вывал . Весь объем обрушенной породы нагружает крепь.
2. $30 < \beta < 60^\circ$ - косонаправленный вывал . На крепь действует 50-70% обрушенной породы.
3. $0 < \beta < 30^\circ$ - пологий вывал . Вес обрушенной породы на крепь практически не передается и в целях безопасности нагрузку считают 20-25% от веса.

По форме вывалы бывают:

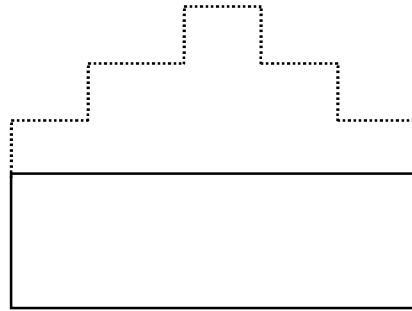
1. **Сводчатые** - ширина вывала намного больше ширины выработки. Характерен для слабых пород.
2. **Конусные** - $V=(0,5-0,9)b$. Характерен для прочных пород.



3. **Призматический** – наблюдается когда выше пород НК залегает прочный слой пород.



4. Ступенчатый – характерен для мелкостоистого массива.



В зависимости от состояния вновь образованных породных поверхностей различают:

- Стационарный вывал - порода устойчива и вывал дальше не развивается.
- Развивающийся вывал- вывал развивается как вглубь так и по длине выработки.

Учитывая сложность аналитического решения по определению веса вывала для расчета нагрузки на крепь от вывала, испытывают эмпирические зависимости, при этом определяют возможный вывал в забойной части выработки при ее проходке и в поддерживаемой части при ее эксплуатации.

При глубине заложения выработки до 600м и равной арочной конструкции постоянной крепи возможный вывал можно определить по следующей формуле:

$$P_3 = 0,35 + 0,16 \cdot S_{np} - 0,18f$$

Где:

- S_{np} - площадь проекции незакрепленной части кровли на горизонтальную плоскость.
- f - коэффициент крепости пород кровли.

Во всех других случаях нагрузку от вывалов в рабочей части можно определить по формуле:

$$P_3 = \delta \cdot B \cdot \gamma \cdot \left(\frac{\gamma \cdot H}{\sigma_{сж}} - K \right)$$

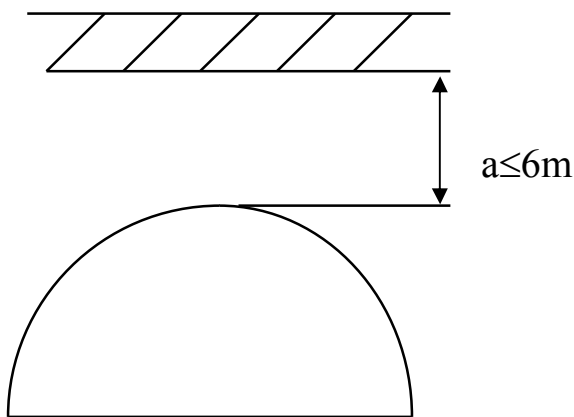
Где:

- δ - коэффициент учитывающий конфигурацию кровли выработки:

1. плоская кровля -1;
 2. криволинейная 0,7;
- В- ширина выработки в черне;
 - К- коэффициент учитывающий способ проведения выработки:
 1. БВР К=0,25;
 2. комбайн К=0,3.

Нагрузка от вывала эксплуатируемой части выработки если выработка сооружена под пластом угля на расстоянии a не более 6 м определяется по формуле:

$$P_3 = (3,2 + 1,07 a) \cdot \gamma$$



В других случаях нагрузка на крепь от вывала эксплуатируемой части определяется по формуле:

$$P_9 = \delta \cdot B \cdot \gamma_p \cdot \left(a \cdot \frac{\gamma_{p.H}}{\sigma_{сж}} - b \right)$$

где:

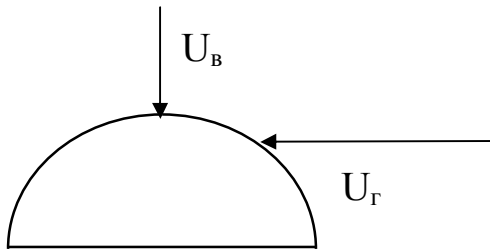
- a - коэффициент учитывающий структуру пород:
 1. однородный массив $a=4$;
 2. слоистый $a=4,5$;
- b - коэффициент учитывающий направление выработки:
 1. вкост простиранию $b = 1,1$;
 2. под углом $b = 1,05$;
 3. вдоль $b = 1,9$;

Направление наибольших смещений пород

В основном зависит от прочности вмещающих пород.

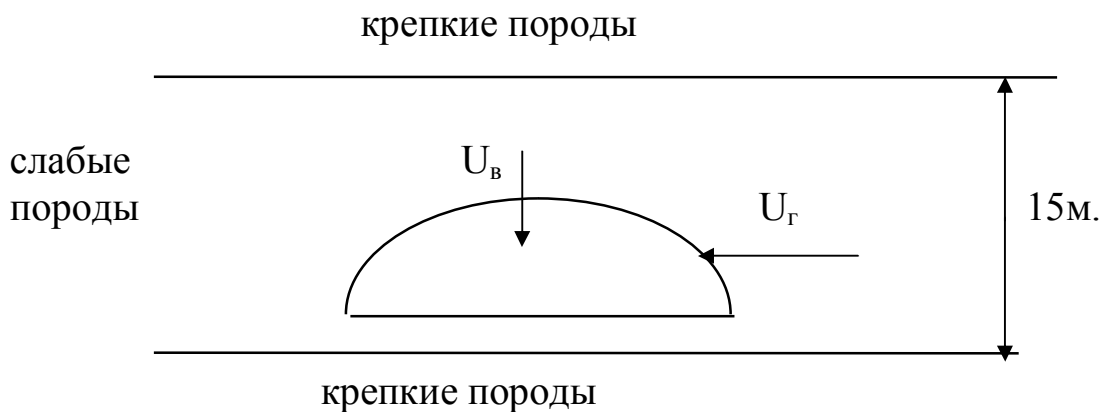
В зависимости от этих факторов выделяем следующие схемы наибольших смещений:

1. Выработка расположена в однородных слабых породах. Преобладание вертикальных смещений ($U_B=2U_G$);

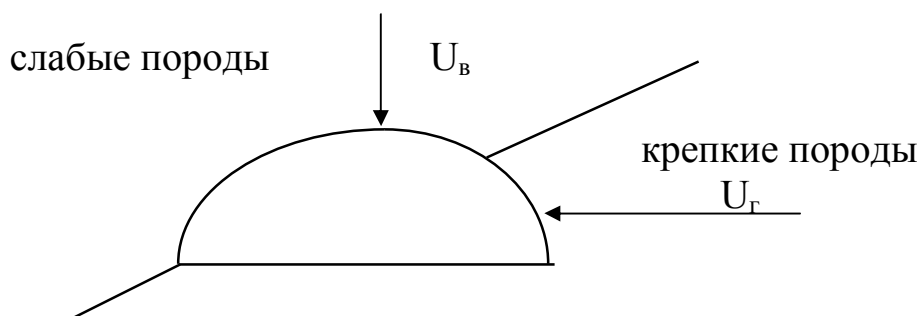


2. Выработка расположена в однородных крепких породах - преобладают горизонтальные смещения.

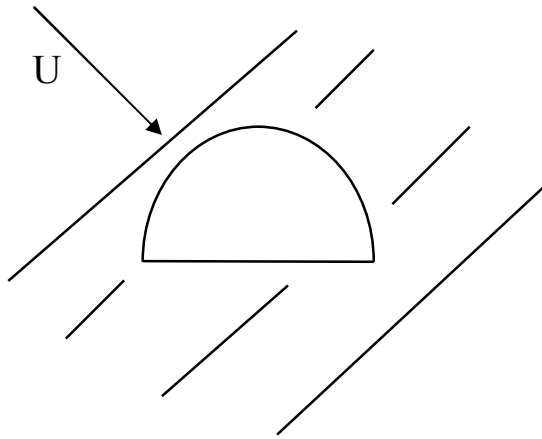
3. Выработка расположена в слое слабых пород, который расположен в крепких породах. Преобладают горизонтальные смещения: ($1,5U_B=U_G$);



4. Выработка расположена по контакту между слабыми и крепкими породами. Со стороны слабых преобладают вертикальные смещения со стороны крепких горизонтальные.



5. Выработка расположена в трещиноватом массиве. Преобладают вертикальные смещения ($U_B=2U_T$);
6. Выработка расположена в слоистом массиве перпендикулярно напластованию.



Расчет нагрузки на крепь в вертикальных выработках

Вертикальные стволы являются основными горными выработками, поэтому к устойчивости предъявляются повышенные требования. Стволы сооружаются в сложных горно-геологических условиях и пересекают слои пород с разными физико-механическими свойствами.

Существующие теоритические методы расчета нагрузки на крепь стволов не отражают этих особенностей и поэтому рекомендуется для расчета нагрузки использовать нормативную методику СНИП.

Эта методике основана на результатах измерения нагрузок на крепь стволов диаметром 6м в разных геологических условиях. Данные этих измерений представлены в следующей таблице:

Н, м	Нормативная нагрузка			
	последовательное и параллельное		совмещенный	
	протяжен.	сопр.	протяж.	сопр.
до 400	7	10,5	9	13,5
400-600	9	13,5	11	16,5
600-800	11	16,5	14	21
800-1000	14	21	17	25,5
1000-1200	17	25,5	20	30
более 1200	20	30	23	34,5

Для стволов диаметром более 6м нагрузку на крепь рассчитывают по формуле:

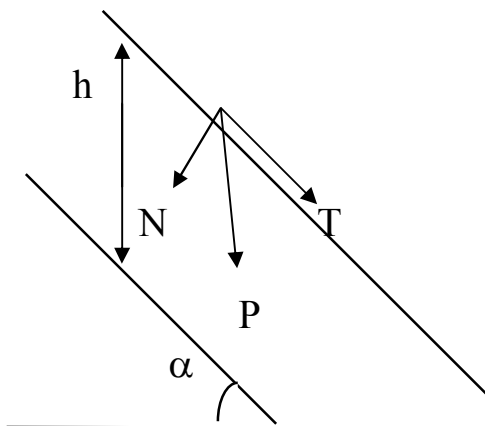
$$P_p = n \cdot n_y \cdot n_\alpha \cdot P_n \cdot [1 + 0.1 \cdot (r_\phi - 3)]$$

где:

- P_n - из таблицы нормативных нагрузок;
- n - коэффициент перегрузки :
 1. при набрызг-бетонной = 1,25;
 2. при других видах = 1,5;
- n_y - коэффициент условий работы :
 1. при набрызг-бетонной = 0,5;
 2. при других видах = 0,67;
- r_ϕ - фактический радиус ствола;
- n_α - коэффициент неравномерности нагрузок:

Угол залегания	n			
	послед. и параллельное		совмещенный	
	протяж.	сопр.	протяж.	сопр.
до 10	2	3	1,75	2,5
10-30	2,5	3	2	2,5
более 30	2,75	3,25	2,25	2,75

Определение нагрузки на крепь в наклонных выработках



Специфика заключается в том, что в ней действует продольная составляющая горного давления - сила T , которая стремится опрокинуть крепь.

Самостоятельной методики расчета горного давления в наклонных выработках не существует поэтому при $\alpha < 70^\circ$ используют методики для горизонтальных выработок, при этом

- $\alpha < 10^\circ$ $N=P$, $T=0$.
- $10 < \alpha < 45^\circ$ $T = P \cdot \sin \alpha$, $N = P \cdot \cos \alpha$.
- $45 < \alpha < 70^\circ$ $T = P \cdot \sin \alpha$, $N = P \cdot \cos 45^\circ$.
- $\alpha > 70^\circ$ - используют методики для вертикальных выработок.

Особенности проявления горного давления в зонах влияния геологических нарушений:

В общем объеме 80% нарушений Донбасса составляют разрывные нарушения, при этом нарушения с амплитудой до 10 м геологами не прогнозируются, вследствие чего до 20% выработок попадают в зону их влияния, где темп сооружения выработок снижается в 1,5-2 раза, стоимость увеличивается в 2,5-3 раза.

Для оценки влияния геологических нарушений на состояние вмещающих выработку пород используют показатель нарушенности:

$$P_n = \frac{S_{тр}}{S_{обн}}$$

где :

- $S_{тр}$ - площадь трещин;
- $S_{обн}$ - площадь обнажений;

Вне зоны нарушений $P_n \leq 0,0015$;

По мере приближения к нарушениям показатель растет и достигает своего макс значения в районе линии сместителя:

$$P_n^{max} = 0,026A + 0,11 \cdot \left(\frac{\gamma \cdot H}{\sigma_{сж}} \right)^2 - 0,009$$

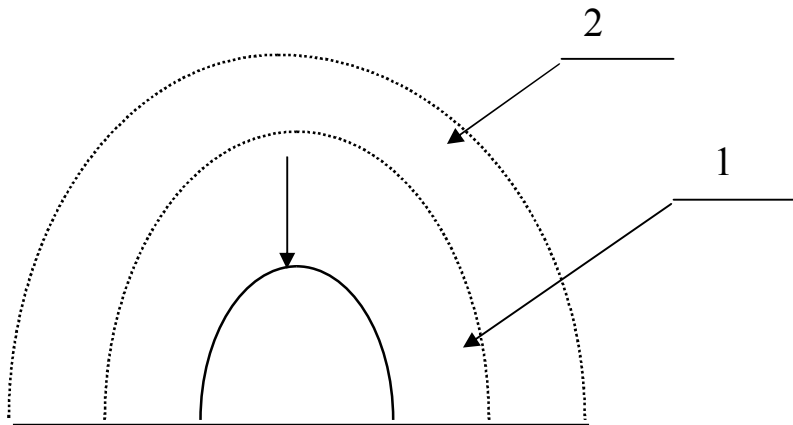
A- амплитуда нарушения;

Участки выработки непосредственно примыкающие к линии сместителя в пределах которой $P_n > 0,0015$ называется зоной влияния

нарушений. Протяженность этой зоны влияния в одну сторону от линии сместителя можно определить по формуле:

$$L = 16 \ln \left(\frac{\Pi_n^{max} + 0.0074}{0.009} \right)$$

В пределах зоны нарушения вокруг выработки образуется 2 области:



1- область вероятных обрушений пород при этом высота возможного обрушения пород :

$$h_b = 5.7 + \ln \Pi_n^l$$

где :

Π_n^L –показатель нарушенности на удалении L от линии сместителя;

$$\Pi_n^l = 0,009e^{0,0625l} + 0.0074$$

2- область интенсивной трещиноватости , ее размеры не зависят от параметров нарушения и в среднем составляют 2-2,5м.

Особенностью проявления горного давления в пределах этих зон заключается в обрушении пород 1-ой области, причем высота обрушения по мере приближения к линии сместителя увеличивается. Эти обрушения происходят практически сразу после обнажения пород, что затрудняет сооружение выработки. Поэтому для их предотвращения используют предварительное укрепление пород.

Способы охраны горных выработок

Под охраной выработки понимают дополнительные мероприятия направленные на повышение устойчивости горной выработки, улучшения условий работы крепи и снижение затрат на ее поддержание.

Способы охраны подразделяются на 4 большие группы:

1. Способы основанные на использовании благоприятных горно-геологических условий.
2. Способы основанные на разгрузке породного массива от повышенных напряжений.
3. Способы основанные на укреплении породного массива.
4. Комбинируемые способы.

При выборе способа охраны необходимо ориентироваться на следующие методические показания:

1. Первоначально определяется необходимость применения способа охраны. Этот вопрос решается путем сопоставления затрат на поддержание выработки(крепь и ремонт) или крепь и охрана выработки.
2. После этого оценивается возможность применения способа охраны ; этот вопрос решается путем анализа горно-геологических условий сооружения выработки и наличия средств механики.
3. Оценивается целесообразность применения того или иного способа охраны. Выбирают тот способ охраны который требует меньше затрат на реализацию.

Для оценки технической эффективности способа охраны используют коэффициент охраны который показывает во сколько раз уменьшится смещение контура выработки после применения способа.

1. Способы на основе использования благоприятных горно-геологических условий

**** Расположение выработки в крепких породах***

Данный способ целесообразно использовать если возможно получить первую или вторую категорию устойчивости; $K_y \leq 3$.

$$K_y = \frac{\gamma \cdot H}{\sigma_{сж}}$$

Исключением является выбросоопасные породы, расположение выработки в которых связано с большими затратами на предотвращение выбросов. Применение данного способа более чем в 2 раза снижает затраты на поддержание, но при этом увеличиваются затраты на поддержание.

При выборе места заложения выработки относительно пересекаемых пород необходимо стремиться чтобы в кровле и почве залегали более прочные породы чем в боках.

**** Выбор направления выработок относительно напластованиям***

Способ применяют при выборе схем вскрытия и проектирования околоствольных дворов. Доказано что в выработках пройденных вкрест простирания, смещения контура выработки меньше по величине и реализуется более равномерно чем в выработках пройденных по простиранию. При этом величина смещений меньше на 40-60%.

**** Выбор формы поперечного сечения***

Данный способ охраны направлен на создание благоприятных условий для работы крепи и сохранения прочности пород на контуре выработки.

При выборе формы сечения необходимо учитывать что, в кровле и почве возникают растягивающие напряжения, а в боках сжимающие, поэтому в слабых породах рекомендуется криволинейные формы сечения (арка, эллипс), при наличии в кровле прочного и мощного слоя пород рекомендуется трапецевидная форма сечения.

**** Выбор допустимого расстояния между выработками***

Состояние породных отношений и крепи выработки в значительной степени зависит от расположения этой выработки относительно других. В зоне взаимного влияния выработок породный массив испытывает повышенные напряжения, что увеличивает степень его разрушения, а соответственно смещение и нагрузку на крепь. Эти

особенности сильно проявляются если одна из выработок пройдена с отставанием от другой на 20 и более суток.

Чтобы избежать взаимного влияния выработок их нужно располагать на расстоянии:

$$L = n \left(12.5 \cdot \frac{\gamma}{m \cdot f_m \cdot \sigma_{сж}} + K \right) \cdot \frac{B_1 + B_2}{2} \cdot H$$

Где:

- n- коэффициент учитывающий направление выработки:
 1. для ходков и квершлагов =1.
 2. штреки = 1,2.
- m- коэффициент стойкости пород во времени.
- K - коэффициент характеризующий породы между параллельными выработками.

K	0,0085	0,008	0,0075
$\sigma_{сж}$	до 40	40-60	более 60

- f_m - коэффициент тектонической нарушенности.
- B_1 и B_2 - ширина параллельных выработок.

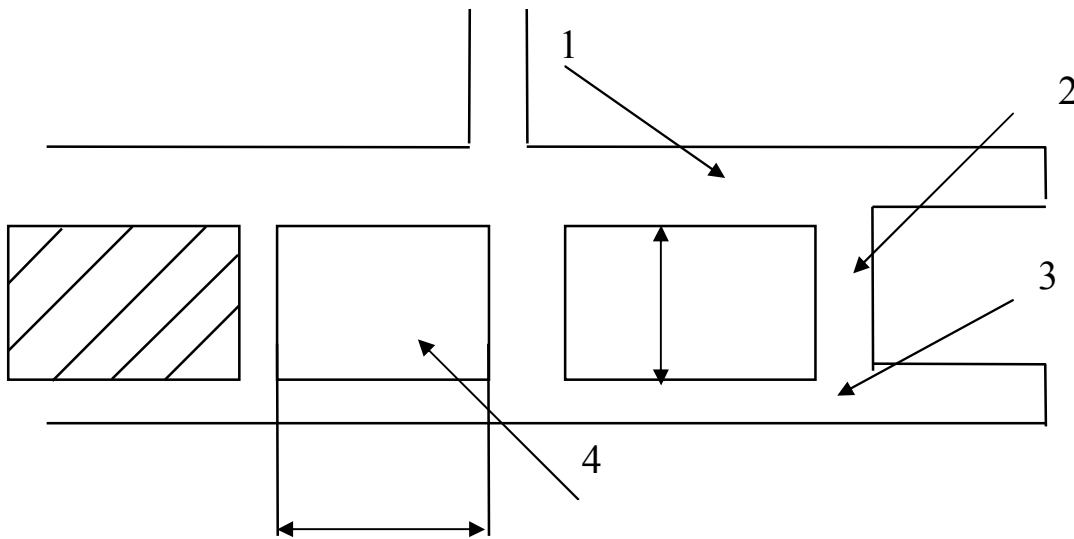
Если это условие не выполняется, то выработки рекомендуется проводить одновременно, либо с отставанием не более 20 метров.

Если же этого достичь невозможно, то ранее пройденную выработку следует поддерживать на расстоянии не менее 40 метров от забоя вновь проводимой.

2. Способы на основе укрепления породного массива

Эта группа способов основана на восстановлении и сохранении естественной прочности пород и как следствие снижение смещений контура выработок.

* Оставление предохранительных целиков



$L_{ц} = 1,5 - 2 b_{ц}$ необходимо учитывать требования ПБ по организации запасного выхода из ла и удобства транспорта угля.
1. просек; 2. сбойка; 3. штрек; 4. целик.

$$b_{ц} = \frac{\gamma \cdot H \cdot \left(\frac{B}{2} + \frac{m}{\Delta m} \right)}{\sigma_{сж}^{н.и.} - \gamma \cdot H}$$

где:

- m - мощность пласта угля;
 - Δm - опускание кровли на 1 м выработанного пространства.
- При способе полного обрушения:

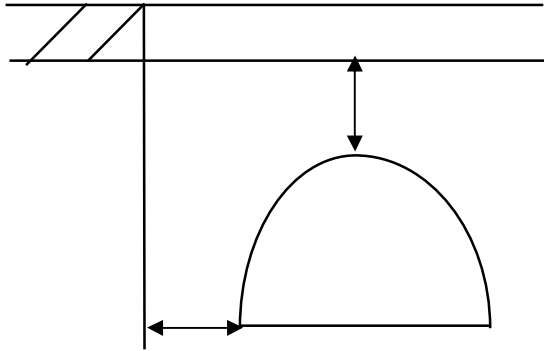
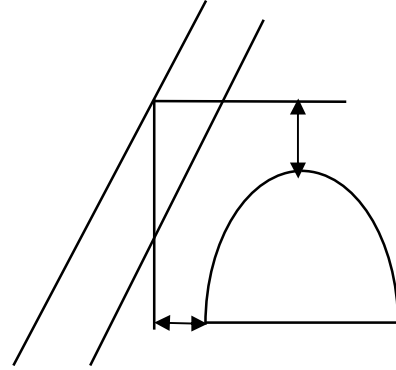
$$b_{ц} = 0,04 m \cdot H + 60$$

Для условий пологого и наклонного залегания целики целесообразно применять только до глубины 500 м и запрещается использовать целики на пластах склонных к самовозгоранию.

* Расположение выработок относительно границ угольных целиков

При оконтуривании околоствольных целиков горными работами у их границ возникают зоны повышенных напряжений. Это относится и к другим видам целиков. Для того чтобы выработки не попадали в эти зоны их нужно располагать на расстоянии $l_{ц}$ - которое для условий пологого и наклонного залегания определяются по формуле.

$$l_y = 24 \cdot (1 + 0,001 \cdot H) + 0,2a$$

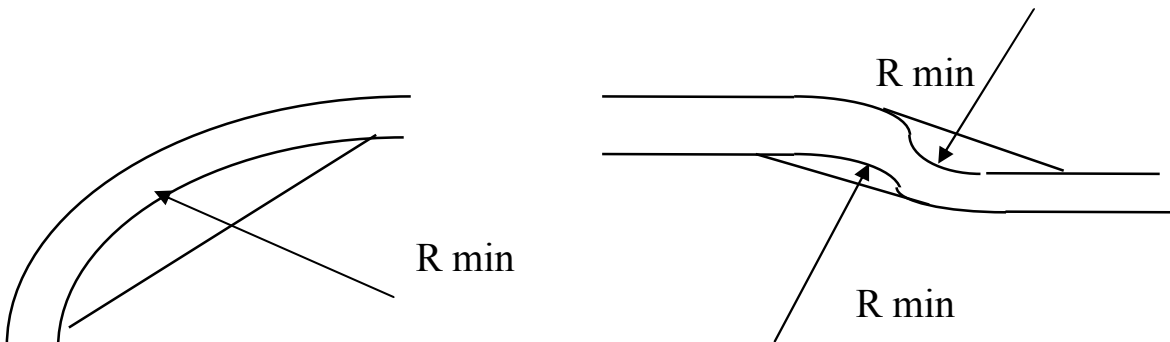
 $\alpha \leq 35^\circ$

 $\alpha > 35^\circ$


$a \leq 30 \text{ м.}$ $a > 30 \text{ м.}$
 $l_{ц} = 10 \text{ м.}$ $l_{ц} = 0.$

* Выбор допустимого радиуса закруглений выработок

В местах поворотов и изгибов выработок возникают зоны повышенных напряжений вызванные взаимным влиянием сложных участков выработок. Чтобы уменьшить протяженность этих участков радиус закругления выработки должен выбираться не менее чем указанные в таблице:

$\sigma_{сж}$, Мпа	R min, м			
	T < 5 лет		T > 5 лет	
до 40	40	45	50	55
40-60	35	40	45	50
60-80	30	35	40	45
более 80	25	30	35	40



****Укрепление пород нагнетанием вязких веществ***

Целью данного способа является заполнение пустот и трещин во вмещающих породах вокруг массива вязкими веществами и создание вокруг выработки породной оболочки.

В качестве вязких веществ наиболее часто применяют цементно-песчаные растворы, полиуритановые смолы и карбамидные смолы.

При использовании цементно-песчаных растворов состав должен быть Ц:П =(1:2)-(1:5), используется портландцемент марки 400 и выше. Для нагнетания растворов по контуру бурятся шпуров из расчета 1 шпур на 2 м² обнажений. Устья шпуров оборудуются иньекторами . Растворы под давлением 3-5 атмосфер нагнетают в скважины с помощью растворонасосов типа СО-50, СО-100, ЗИФ, НГР. Нагнетание производится до тех пор пока раствор не появится на поверхности выработки.

Данный способ применяют при критической устойчивости:

$$K_y = \frac{\gamma \cdot H}{\sigma_{сж}} \geq 3$$

глубину крепления ориентировочно применяют по формулам:

$$h_y = r \cdot K_t \cdot (0.2 + 1.6 \cdot U_x) + 0.2$$

где :

- r - полупролет выработки в направлении крепления;
- K_t - коэффициент учитывающий времяпроизводство работ по укреплению относительно проходческих работ;

t, сут	5	10	15	20	25
K_t	0,18	0,2	0,22	0,25	0,27

Объем раствора можно ориентировочно рассчитать по формуле:

$$V = 0.3 \cdot h_y \cdot \left(r + \frac{h_y}{r} \right), \text{м.}$$

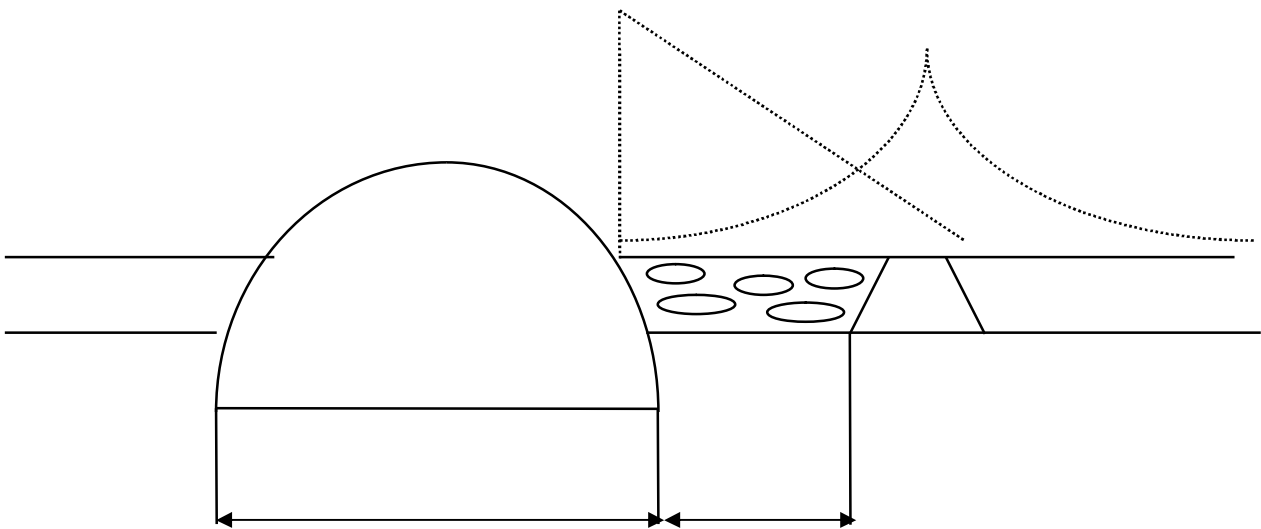
3. Способы на основе разгрузки породного массива от повышенных напряжений

**Проведение выработки широким ходом:*

Цель данного способа перенос макс напряжений с контура выработки вглубь массива, это обеспечивается за счет создания в боках выработки податливых полостей путем выемки части полезного ископаемого. Способ применяют для охраны пластовых выработок при пологом залегании.

1. раскоска (податливая полость) образуется одновременно с проходкой выработки и закладывается породой от проходки. Раскоска может быть одно и двух сторонней. Для ее закладки и улучшения проветривания сооружают косовичный ходок 2. Длину раскоски выбирают из условия, чтобы вся порода от проходки помещалась в раскоске:

$$(S_{np} - mB) \cdot K_p = l_p \cdot m$$



Аналогичным по идее является Способ скважинной разгрузки, только вместо раскоски по пласту выбуривают скважины диаметром не менее $2/3$ мощности пласта и длиной не менее в мощность пласта. Расстояние между скважинами равно диаметру. Под действием высоких напряжений целики угля между скважинами разрушаются и образуется податливая полость.

*** Увеличение начального сечения выработок**

Этот способ применен практически на всех шахтах и цель его сохранения необходимых размеров выработки после смещений контура.

Параметры ΔB и Δh обычно выбираются после расчета смещений контура выработки. При отсутствии таких расчетов ориентировочно можно пользоваться таблицей:

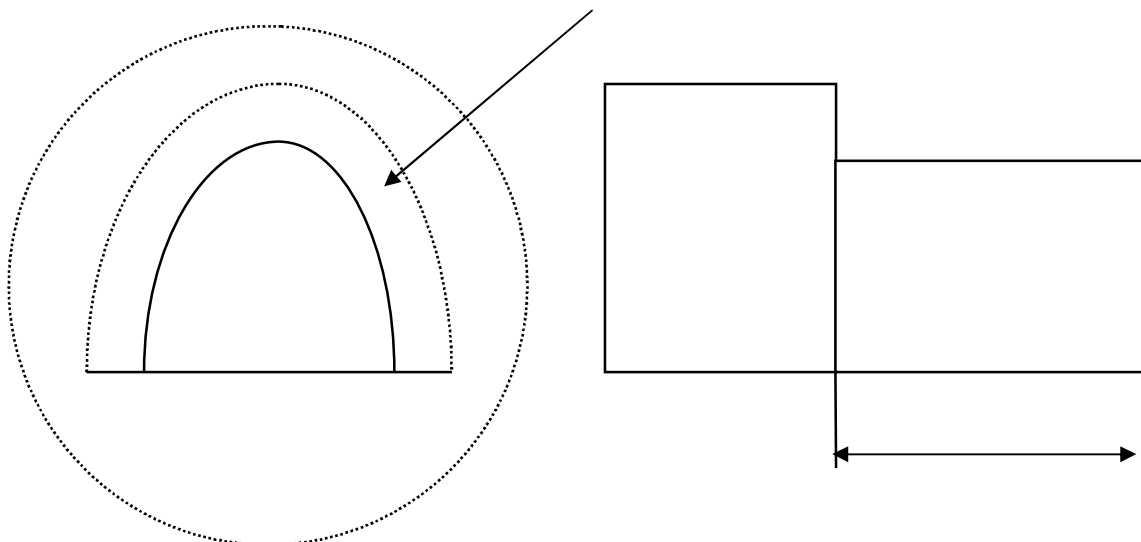
$\sigma_{сж}$, МПа	Δh , см	ΔB , см
до 40	30	20
40-60	20	12,5
более 60	10	7,5

Способ применим только с податливой крепью. Увеличивает начальные расходы уменьшает затраты на поддержание.

*** Проведение выработки в два этапа. Двойная проходка**

Цель данного способа, образование зоны неупругих деформаций до обнажения проектного контура выработки. Для этого вначале проходится передовая выработка уменьшенного сечения. После истечения заданного промежутка времени выработка расширяется до проектных размеров и крепится постоянной крепью. Эффект достигается за счет того, что основные деформации вмещающих выработку пород протекают в период формирования зоны неупругих деформаций и воспринимаются крепью передовой выработки.

На постоянную крепь проектной выработки вследствие этого будут действовать значительно меньшие нагрузки. Кроме этого породы на проектном контуре выработки будут менее нарушены т.к. они обнажаются после формирования зоны неупругих деформаций.



К параметрам способа относятся :

1. Сечение передовой выработки;
2. время ее расширения до проектных размеров или отставания забоя проектной выработки от забоя.

$\sigma_{сж}$, МПа	$S_{пер}$	T, мес	L, м
до 40	$0,5 * S_{пр}$	2	40
40-60	$0,6 * S_{пр}$	2,5	50
более 60	$0,7 * S_{пр}$	3	60

** Технологическая податливость крепи*

Цель данного способа расширить область применения жестких конструкций крепи. Для этого выработки вначале крепят арочной крепью с ограниченной податливостью (до 100, 150 мм). После исчерпания арками податливости их берут в бетон.

$\sigma_{сж}$, МПа	T, мес	L, м
до 40	1,5	35
40-60	2	40
более 60	2,5	50

*** Взрывощелевая разгрузка пород почвы:**

Способ предназначен для предотвращения пучения пород почвы. Это обеспечивается путем создания в боках выработки податливых полостей которые компенсируют горизонтальные подвижки пород вызывающие пучение. Податливые полости создаются путем взрывания в шпурах камуфлетных зарядов ВВ.

В качестве ВВ обычно используют Аммонит Т-19 или Угленит-Эб. в количестве не более 2-х патронов на 1 шпур. Для обеспечения камуфлета запыжовки должны быть не менее 1,5м длины шпура. Расстояние между шпурами $0,2l_{ш}$ - и кратно шагу крепи.

