

**Инженерный метод
расчёта напряжений
в крутопадающих
рудных телах.**

Теоретические основы.

Милетенко И.В. Диссертация: "Геомеханическое обоснование разработки крутопадающих месторождений малой и средней мощности в зонах рассланцевания пород", Москва 1993г.

Разработка методов расчёта нагруженности рудного массива и закладки.

При освоении новых рудных месторождений и реконструкции действующих, как правило, отсутствуют необходимые экспериментальные данные о напряженном состоянии массива. Такое положение создаёт определённые трудности при разработке проектных решений и приводит к осложнениям для нормального технологического процесса выемки руд. Проведение экспериментальных исследований по оценке напряжённо-деформированного состояния и прогнозу поведения массива в процессе развития горных работ не всегда является целесообразным и экономически оправданным. Кроме того, их осуществление требует значительных временных затрат. Это относится в большей степени и к разработке небольших по запасам месторождений, где в создании крупной экспериментальной базы нет необходимости.

В связи с этим возникает необходимость в разработке экспресс-методов прогноза геомеханических процессов, происходящих в массиве горных пород. К числу таких методов относятся инженерные методы расчёта, основанные на математическом решении ряда фундаментальных задач механики горных пород и механики деформируемого твёрдого тела.

Анализ современного уровня разработок по изучению напряжённого состояния массива и закладки.

При исследованиях напряжённо-деформированного состояния массива горных пород вокруг выработок широко используются численные методы расчёта. Среди них наибольшее распространение получили методы конечных элементов и граничных интегральных уравнений. Достоинство метода конечных элементов заключается в возможности учёта локальных неоднородностей массива, так как каждому из элементов, на которые разбивается массив в области решения, можно присвоить собственные механические характеристики. При решении задач механики горных пород методом конечных элементов, можно осуществлять анализ напряженного состояния каждого из элементов и в соответствии с этим напряжённым состоянием пересчитывать все механические характеристики элементов.

Применение метода конечных элементов позволяет рассматривать произвольную неоднородность среды, анизотропию, учитывать проявление пластичности, вязкости, нелинейность деформационных свойств, учитывать структурные особенности реальных массивов горных пород, такие как трещиноватость, трещиновато-пористость, наличие нарушений сплошности массивов в виде трещин контакта, а также учитывать технологические факторы, например, последовательность очистных и закладочных работ.

Другие направления численных методов решения задач о напряжённо-деформированном состоянии среды являются методы

граничных элементов, в которых решение уравнения удовлетворяется на границе исследуемой области.

Наряду с широкими возможностями численных методов, их использование требует специальной подготовки и недоступно большому кругу специалистов.

Это в значительной степени устраняется при использовании предлагаемого метода оценки напряжённого состояния массива горных пород крутопадающих месторождений малой и средней мощности.

Разработанный инженерный метод позволяет прогнозировать нагруженность рудного массива с учётом динамики развития горных работ и тем самым учитывать технологическую последовательность развития горных работ, тип применяемой закладки, прочностные свойства пород. Метод расчёта применим в том случае, когда одно из главных напряжений нетронутого массива нормально к плоскости простирания. Наибольший практический интерес представляют напряжения σ_y^∞ . Эти напряжения определяют нагруженность рудного и закладочного массивов, которые сопоставляется с несущей способностью этих массивов. Известно, что расщепление пород ориентированно вдоль плоскости простирания рудного тела и происходит в условиях высокого давления, действующего перпендикулярно к направлению перемещения пород. Это является основанием для использования метода при оценке напряжённого состояния месторождений жильного типа, приуроченных к сланцеватым текстурам.

Метод расчёта нагруженности массива и закладки.

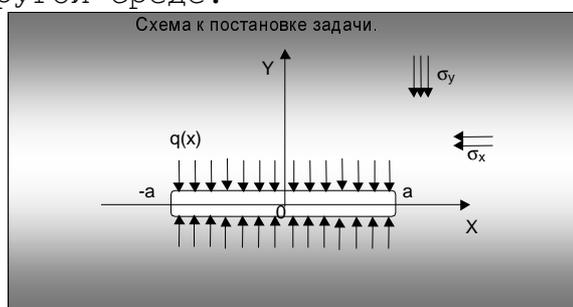
Среди разнообразия рудных тел в горнодобывающей практике встречаются такие, которые характеризуются относительно простой формой (без разветвлений) и не имеют резких изменений мощности и условий залегания. Особенность их разработки заключается в том, что очистные камеры имеют вид относительно узких, протяжённых выработок, расположенных примерно в одной плоскости. Поперечный размер камер h значительно меньше продольных размеров a и b ($h \ll a$, $h \ll b$).

Выемка ценных руд и руд в сложных горно-геологических условиях сопровождается последующей закладкой выработанного пространства. Определение оптимальных параметров очистных камер, рудных и искусственных целиков, прочности закладочного массива и т.п. является важной практической задачей, решение которой должно основываться на экономической оценке производственных затрат с учётом фактора безопасности горных работ. Фактор безопасности в свою очередь тесно связан с решением проблем горного давления, исследование которых, осуществляемое средствами и методами геомеханики, связано главным образом с анализом напряжённого состояния массива горных пород. Ниже изложен инженерный метод расчёта изменения нагруженности рудного массива и закладки. **Метод достаточно прост и не требует обращения к большим ЭВМ.** Например, в приведённых ниже примерах для расчётов использовался **карманный калькулятор**.

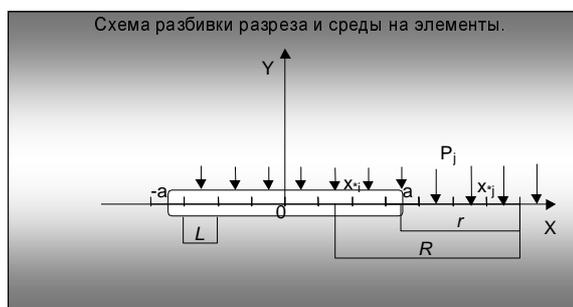
Пусть известно напряжённое состояние нетронутого массива горных пород, которое в простейших случаях может быть определено из анализа геологических условий залегания рудного тела, а в общем случае в результате непосредственных шахтных измерений. Создание

выработанного пространства приводит к перераспределению напряжений в массиве горных пород. Суть перераспределения состоит в том, что "вынимаемая" часть рудного массива исключается из силового соотношения структурных элементов массива горных пород. При этом нагрузка, первоначально воспринимаемая "вынимаемой" частью массива, передаётся на оставшуюся часть рудного массива, вмещающие породы или закладочный массив. Нагрузка распределяется также среди специально созданных несущих конструкций, к которым относятся рудные и искусственные целики.

Если руда и вмещающие породы близки по упругим свойствам, а одно из главных напряжений нетронутого массива действует нормально к плоскости простирания рудного тела, приближенная оценка распределения нормальной нагрузки со стороны вмещающего массива между несущими элементами может быть осуществлена на основе известной формулы распределения напряжений в упругой среде при действии в среде сосредоточенных силовых источников. В этой оценке очистные камеры моделируются лежащими в одной плоскости разрезами в однородной упругой среде.



Для простоты рассмотрим сначала в условиях плоской деформации одиночную выработку без закладки выработанного пространства.



Рудное тело на рисунке не показано. Напряжения σ_y^∞ и σ_x^∞ являются главными.

Распределение напряжений σ_y на прямой $y=0$ можно найти, решив задачу теории упругости о разрезе, нагруженном нормальной нагрузкой $q(x)$. Эта нагрузка равна нормальным напряжениям $\sigma_y(x)$, действовавшим вместе с проведением разреза. В частном случае горизонтальной одиночной выработки при однородном исходном поле напряжений на разрезе, моделирующем выработку, распределённая нагрузка постоянна и равна $q(x) = \gamma H$.

Для инженерного расчёта напряжений σ_y вдоль оси x разобьём разрез и линию его продолжения в среде вдоль оси x на линейные элементы L (в плоском случае). Выбор размера L зависит от степени необходимой точности оценки: чем меньше L , тем точнее оценка.

Однако следует учесть, что с уменьшением L растёт объём вычислений.

Пусть разрез, моделирующий выработку, содержит N элементов, которым приписан индекс i , а среда M элементов с индексом j . Последние элементы будем для определённости называть "грузонесущими". Введя линейные элементы будем далее рассматривать средние напряжения в элементах $\sigma_{y,ср}$ или силы. Задаваемые в центре элементов разреза силы обозначим $Q_i (i=1, 2, \dots, N)$. Искомые силы, приложенные в центре грузонесущих элементов, обозначим $P_j (j=1, 2, \dots, M)$. Очевидно $P_j = L \sigma_{y,ср} I_j$. Таким образом, наш расчёт заключается в определении нормальных сил P_j в грузонесущих элементах по известным силам Q_i , задаваемым на элементах разреза.

При предположении упругости среды сила P_j в каждом элементе является суммой соответствующих воздействий от совокупности сил:

$$P_j = \sum_{i=1}^N f(Q_i)$$

Функция f отражает закономерность передачи силового возмущения от одиночной силы. Об этой функции можно говорить как о своеобразной функции точечного возмущения для разреза. Используя соответствующее соотношение, полученное в работе "Предельное равновесие хрупких тел с трещинами", Панасюк В.В., Киев, 1968г., напряжение $\sigma_y(x)$ в центре грузонесущего элемента j можно записать в виде:

$$\sigma_y(x_{*j}) = \sum_{i=1}^N \left\{ Q_i \frac{\sqrt{a^2 - x_{*i}^2}}{\pi(x_{*j} - x_{*i}) \sqrt{x_{*j}^2 - a^2}} \right\}$$

Здесь:

x_{*j} - координата центра грузонесущего элемента j ;

x_{*i} - координата центра элемента, где задана сила Q_i (координата точки приложения силы) ;

$\pm a$ - координата границы разреза.

В целях разумного облегчения расчётов будем искать кусочно-линейное распределение напряжения $\sigma_y(x)$. В этом случае в пределах рассматриваемого грузонесущего элемента j напряжения $\sigma_y(x)$ можно описать функцией вида:

$$\sigma_y(x)|_j = A_j + B_j x$$

где A_j и $B_j (j=1, 2, \dots, M)$ - постоянные, которые выбираются таким образом, чтобы было справедливо соотношение:

$$A_j + B_j x = \sum_{i=1}^N \left\{ Q_i \frac{\sqrt{a^2 - x_{*i}^2}}{\pi(x_{*j} - x_{*i}) \sqrt{x_{*j}^2 - a^2}} \right\}$$

Поскольку в рассматриваемом случае среднее напряжение в грузонесущем элементе j равно $\sigma_{y,ср}|_j = A_j + B_j x_{*j}$, то можно записать соотношение для сил:

$$P_j = \sum_{i=1}^N P_{ij}$$

где P_{ij} равно:

$$P_{ij} = \sum_{i=1}^N \left\{ LQ_i \frac{\sqrt{a^2 - x_{*i}^2}}{\pi(x_{*j} - x_{*i})\sqrt{x_{*j}^2 - a^2}} \right\}$$

Величина P_{ij} представляет собой часть силы P_j , которая обусловлена силой Q_i , заданной в i -ом элементе разреза.

Для оценки распределения сил P_j вблизи края разреза, т.е. там, где распределение нагрузки вызывает наибольший интерес, формулу можно упростить и записать в виде:

$$P_{ij} = \sum_{i=1}^N \left\{ LQ_i \frac{\sqrt{a^2 - x_{*i}^2}}{\pi\sqrt{2a}(x_{*j} - x_{*i})\sqrt{x_{*j} - a}} \right\}$$

В другом крайнем случае, т.е. для удалённых точек среды x_{*j} , справедлива другая асимптотика:

$$P_{ij} = \sum_{i=1}^N \left\{ LQ_i \frac{\sqrt{a^2 - x_{*i}^2}}{\pi x_{*j}^2} \right\}$$

которая соответствует известному закону убывания напряжения в упругой среде, выносимого парой сил на разрезе (плоский случай). Поскольку на практике наиболее интересно распределение напряжений в щеликах и вблизи выработанного пространства, **в инженерных расчётах можно использовать только первую формулу. При этом погрешность в определении напряжений σ_y на достаточном удалении от выработанного пространства не превысит 10%.**

Рассмотрим другое силовое соотношение. Сила Q_i вносит свой "вклад" во все грузонесущие элементы. Естественно, что сумма этих вкладов по всем грузонесущим элементам должна быть равна Q_i . Таким образом, можно записать:

$$\sum_{j=1}^M P_{ji} = Q_i$$

Приведённые формулы являются **основными рабочими формулами расчёта**. Целесообразно их записать в ином виде, более наглядно отражающем их структуру:

$$P_{ji} = \frac{F_i}{R_{ji}\sqrt{r_j}}$$

Здесь посредством F_i обозначена совокупность параметров, не зависящих от координат x_{*j} , r_j - расстояние от центра рассматриваемого грузонесущего элемента j до ближайшего края разреза, R_{ji} - расстояние от центра этого элемента до точки приложения силы Q_i , т.е. центра элемента i .

Соотношение примет вид:

$$\sum_{j=1}^M \frac{F_i}{R_{ji}\sqrt{r_j}} = Q_i$$

Отсюда можно получить следующее выражение:

$$F_i = \frac{Q_i}{\sum_{j=1}^M \frac{1}{R_{ji}\sqrt{r_j}}}$$

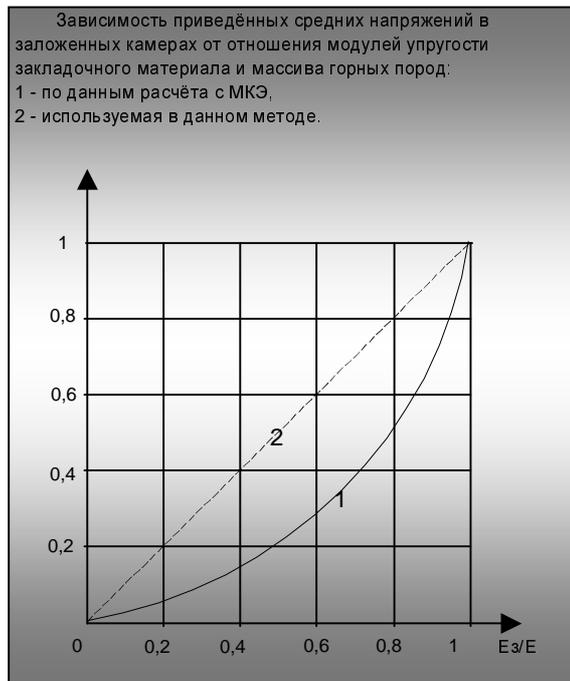
Методика расчёта действующих сил в *грузонесущих* элементах (или средних напряжений) заключается в следующем. Линейные величины r_j и R_{ji} , входящие в приведённые выше формулы, находятся геометрически в соответствии с условиями разбивки исследуемой области на элементы. Силы Q_i определяются по известным нормальным напряжениям σ_y на контуре будущего разреза, моделирующего новую выработку. Определив по формуле неизвестные величины F_i ($i=1, 2, \dots, N$), находим затем величины P_{ji} и далее искомые силы P_j в *грузонесущих* элементах. Используя принцип суперпозиции решений, который справедлив для упругих сред, можно найти нормальные силы в *грузонесущих* элементах при произвольном числе разрезов среды вдоль оси X .

Отметим, что по указанной методике определяются в *грузонесущих* элементах силы, а следовательно и средние нормальные напряжения. По средним напряжениям в элементах в общем случае нельзя построить однозначное кусочно-линейное распределение искомых напряжений $\sigma_y(x)$. Действительно, для определения $2M$ неизвестных постоянных A_j, B_j ($j=1, 2, \dots, M$) имеется M уравнений. Кроме того, в однородной среде должно выполняться условие непрерывности напряжений σ_y на границах элементов, что даёт ещё $M-1$ уравнение:

$$A_j + B_j \left\{ x_{*j} - \frac{L}{2} \right\} = A_{j-1} + B_{j-1} \left\{ x_{*j-1} + \frac{L}{2} \right\}; j = 2, 3, \dots, M$$

Однако одно уравнение оказывается неопределённым. Для определённости логично принять, что в том элементе, где среднее значение σ_y минимально, это напряжение постоянно. В этом случае эпюру напряжений σ_y вдоль оси X легко построить геометрически, проводя соответствующим образом отрезки прямых от элемента, где среднее значение напряжения минимально. Каждый отрезок прямой должен проводиться таким образом, чтобы он, во-первых, в центре элемента соответствовал найденному среднему значению напряжения, во-вторых, совпадал с концом отрезка в соседнем элементе. Нетрудно понять, что при увеличении числа разбиений среды на элементы точность такой кусочно-линейной аппроксимации возрастает.

Рассмотрим методику расчета напряжений в случае закладки выработанного пространства. Закладочная смесь является более податливым материалом в сравнении с массивом горных пород. При нагружении в режиме заданных смещений горная порода и закладочная смесь естественно деформируются одинаково, однако закладочная смесь нагружается слабее во столько раз, во сколько её модуль деформации $Eз$ меньше модуля деформации горной породы E . Численными расчётами с помощью МКЭ установлено, что при очередном расширении выработанного пространства зависимость средних напряжений в закладочном массиве вблизи очистной камеры от отношения $Eз/E$ определяется кривой.



Эту зависимость можно использовать в расчётах средних напряжений в массиве закладочной смеси. Для простоты в инженерных расчётах эту зависимость удобно считать линейной (штриховая линия). Таким образом, далее будем считать, что искусственный несущий элемент из закладочной смеси по сравнению с находящимся в тех же условиях рудным целиком воспринимает нагрузку, пропорциональную отношению E_z/E .

Следовательно, в общем случае, когда часть грузонесущих элементов j , расположенных по оси X , имеет другой модуль деформации, чем массив горных пород, вместо приведённых выше соотношений следует использовать следующие соотношения:

$$P_{ji} = \frac{Ez_j}{E} \frac{F_i}{R_{ji} \sqrt{r_j}}$$

и

$$F_i = \frac{Q_i}{\sum_{j=1}^M \frac{Ez_j}{E} \frac{1}{R_{ji} \sqrt{r_j}}}$$

Здесь:

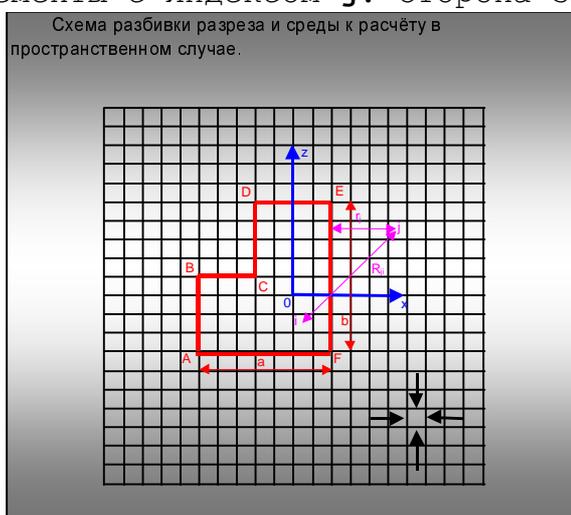
Ez_j - модуль деформации j -того элемента.

Очевидно, при $Ez_j = Ez$, что эти формулы следуют из предыдущих и наоборот.

Рассмотренный выше метод расчёта перераспределений напряжений в случае выемки с закладкой целесообразно связать с методом последовательных циклов (МПЦ), разработанным С.В.Кузнецовым и В.Н.Одинцевым. Метод последовательных циклов учитывает последовательность расширения и заложения выработанного пространства. В этом случае исследования перераспределения напряжений можно представить в зависимости от динамики развития горных работ, учитывающей напряжённо-деформированное состояние массивов горных пород и закладки, а также и технологические факторы влияния. При этом имеется возможность учёта изменения деформационных свойств закладочной смеси во времени или под

нагрузкой, например, повышение жёсткости и упрочнение закладочного массива. Вычислительные трудности при этом практически не возрастают. Естественно, для учёта геологических свойств закладочной смеси необходимо задать зависимости, отражающие соответствующие свойства, например, $E_{z_j}(\sigma_{ycp})$ или $E_{z_j}(T_j)$, где T_j – время, прошедшее с момента уложения смеси в очистной камере. Анализ перераспределения напряжений в массиве горных пород и закладочном массиве рассмотренным выше методом в сочетании с МПЦ значительно повышает достоверность исследований в целом.

Рассмотрим теперь **пространственный случай**. Методически он мало отличается от рассмотренного выше плоского случая. В пространственном случае производится разбивка разреза, моделирующего плоскую очистную выработку, на квадратные элементы с индексом i и оставшуюся часть плоскости $y=0$ на квадратные **грузонесущие** элементы с индексом j . Сторона элемента равна L .



Как и в рассмотренном выше случае, суть расчёта состоит в определении нормальных сил P_j , действующих на плоскость $y=0$. Вводятся в рассмотрение величины P_{ji} , представляющие собой составляющие сил P_j , обусловленные действием сил Q_i . В пространственном случае справедливы приведённые выше соотношения, однако выражения для величин P_{ji} и F_i имеют несколько другой вид. Для случая закладки отработанных ранее камер можно записать:

$$P_{ji} = \frac{E_j}{E} \frac{F_i}{R_{ji}^2 \sqrt{r_j}}$$

$$F_i = \frac{Q_i}{\sum_{j=1}^M \frac{E_j}{E} \frac{1}{R_{ji}^2 \sqrt{r_j}}}$$

Здесь:

r_j – минимальное расстояние от центра рассматриваемого **грузонесущего** элемента до ближайшей границы разреза;

R_{ji} – расстояние от центра **грузонесущего** элемента до центра элемента, где задана сила Q_i .

Как можно видеть отличие формул состоит в том, что в пространственном случае величина R_{ji} в квадрате. Зависимость от R_{ji} и r_j при $E_j=E$ следует из анализа асимптотического разложения напряжений σ_y в пространственном случае вблизи границы разреза. Для

круговых разрезов приведённые соотношения являются строгими, для разрезов с некруговой границей – приближёнными.

Методика нахождения сил P_j та же самая. Расстояния r_j и R_{ji} определяются геометрически, затем по формуле находят величины F_i и далее определяют искомые нормальные силы во всех *грузонесущих* элементах. Как и в плоском случае, используя принцип суперпозиции решений для упругих сред, можно найти силы в *грузонесущих* элементах при произвольном числе разрезов, лежащих в одной плоскости.

По известным силам в *грузонесущих* элементах можно построить кусочно-линейное распределение в элементах напряжений σ_y . Для этого следует по описанной в плоском случае методике построить кусочно-линейные распределения напряжений σ_y по осям X и Z . В качестве исходного элемента следует взять элемент, где среднее значение σ_y минимально.

Оценка размеров пластической зоны.

Изложенную выше методику расчёта распределения нормальных к рудному телу напряжений σ_y можно связать с развитой в работе "Теория защитных пластов" Петухов И.М., Линьков А.М., Сидоров В.С., Фельдман И.А., М., 1983г. методикой оценки линейного размера α_0 предельно напряжённой области (пластической зоны) и максимума опорного давления σ_y^{\max} . Оценка величин α_0 и σ_y^{\max} включает определение коэффициента интенсивности напряжений K_I у края разреза. Коэффициент K_I , рассматриваемый в теории трещин, определяется из асимптотического представления напряжений у конца разреза (трещины) в упругой среде:

$$\sigma_y(x,0) \approx \frac{K_I}{\sqrt{2\pi(x-a)}}$$

Этот коэффициент зависит от внешних условий нагружения и размера разреза. Как видно напряжения у края разреза в упругой среде имеют неограниченный рост при $x \rightarrow \alpha$, что свидетельствует о реальности перехода материала у края разреза в пластическое состояние.

В упомянутой выше работе считается, что распределение напряжений в пластической зоне, т.е. от края разреза до точки ближайшего максимума напряжений σ_y , описываются линейным законом:

$$\sigma_y = \sigma_{\max}^0 + \frac{2K_*\xi}{h}$$

где

σ_{\max}^0 - прочность рудного массива;

ξ - расстояние от обнажения вглубь массива;

h - мощность рудного тела.

За максимумом опорного давления имеет место упругое распределение напряжений. Длина пластической зоны определяется по формуле:

$$d_0 = \sqrt[3]{\left(\frac{3}{4}\sqrt{\frac{\pi}{2}}\right)^2} \sqrt[3]{\left(\frac{h}{2K_*}\right)^2} f(P)$$

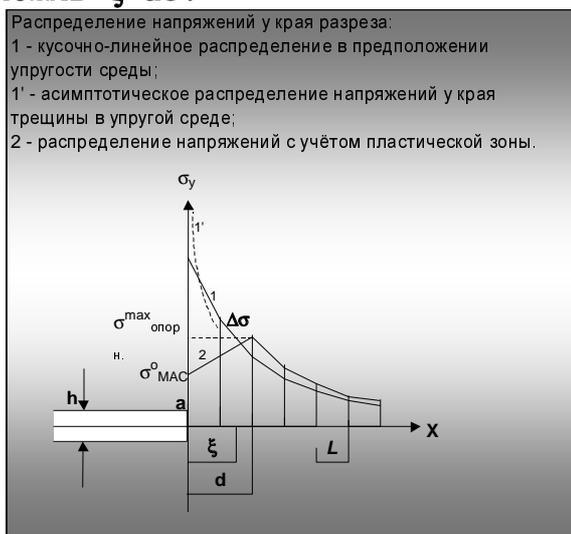
где

$$P = \frac{0,57(\sigma_{\text{мас}}^0)^3 h}{2K_I^2 K_*}$$

$$f(P) = \sqrt[3]{\frac{1}{4} \left\{ \sqrt{1+P} + 1 + \sqrt{1+P} - 1 \right\}}$$

В табличном виде зависимость $f(P)$ приведена в указанной выше работе.

Таким образом, размер пластической зоны вблизи плоской выработки поперечного размера h зависит от величины прочности массива и параметра K_I , определяемого из решения соответствующей задачи теории упругости. Величину максимума опорного давления можно найти, положив $\xi = d_0$.



Рассмотренный выше метод расчёта распределения нормальных напряжений σ_y позволяет оценить значение K_I . Для этого следует рассмотреть крайний *грузонесущий* элемент у разреза, для определённости приписав ему индекс $j=1$. При той же величине среднего напряжения будем считать, что в этом элементе имеет место не линейное распределение напряжений σ_y , а распределение напряжений у конца разреза $\sigma_y(x, 0)$. В этом случае на границе рассматриваемого элемента с соседним *грузонесущим* элементом должен возникнуть скачок напряжений $\Delta\sigma_y$. Отношение величины этого скачка к средним напряжениям в элементе невелико. Оно должно стремиться к нулю при $L \rightarrow 0$. Следовательно, при малом L величина погрешности в крайнем грузонесущем элементе мала. Значение K_I по найденной в элементе $j=1$ силе P_1 определяется из соотношения:

$$K_I = P_1 \sqrt{\frac{\pi}{2L}}$$

Подставив полученное таким образом значение K_I в соотношение для длины пластической зоны оценим её размер d_0 . Возможны два случая.

Случай 1:

найденное значение d_0 приблизительно равно кратному значению величины L , т.е. $d_0 \approx nL$, где n – целое число. В этом случае расчёт величины d_0 заканчивается. В соответствии с распределением

напряжений в пластической зоне n крайних *грузонесущих* элементов составляют пластическую зону, в которой имеет место линейный закон распределения напряжений.

Очевидно, что *грузонесущие* элементы, оказывающиеся в пластической зоне, воспринимают только часть той нагрузки, которая следует из расчётов по упругой модели. "Излишек" нагрузки следует распределить среди *грузонесущих* элементов, находящихся в упругом состоянии. Перерасчёт распределения нагрузки среди *грузонесущих* элементов осуществляется по той же методике, что и при очистных работах. Важно отметить, что в этом пересчёте кусочно-линейное распределение напряжений в упругих *грузонесущих* элементах строится иначе, а именно исходя из условия непрерывности напряжений σ_y на границе упругой и пластической областей.

Случай 2:

характеризуется тем, что найденное значение размера пластической зоны явно отличается от величины, кратной L . Например может быть, что $d_0 \approx 0,5L$. В этом случае целесообразно осуществить перерасчёт распределения напряжений, положив $L = d_0$. Выполняя далее вышеуказанные операции, следует сопоставить новое расчётное значение d_1 с величиной d_0 . При необходимости методом последовательных приближений можно добиться условия, характеризующего *случай 1*.

Оценка достоверности метода.

Достоверная информация о состоянии горных массивов, протекающих в них геомеханических процессах, имеет основополагающее значение для решения многих проблем, связанных с созданием безопасных технологий отработки месторождений, рациональным извлечением полезных ископаемых.

Используемые при оценке напряжённого состояния расчётные экспресс-методы, являются инженерными методами нового поколения. В основе относительно простых процедур расчёта лежат математические решения ряда задач механики горных пород и механики твёрдого деформируемого тела.

Оценивая достоверность предложенного метода оценки напряжённого состояния массива и несущих конструктивных элементов, следует остановиться на следующих моментах. Это соответствие расчётной модели реальному состоянию технологических процессов природы и сама точность расчётного метода. В этой связи необходимо отметить, что достоверность инженерного метода значительно повышается, поскольку при постановке задачи исследований имеется возможность прогнозировать динамику развития горных работ. Использование метода позволяет учесть влияние уже существующих горных работ на изменение геомеханической обстановки при исследовательской отработке горизонтов как в масштабе всего рудного тела или нескольких рудных тел, так и в масштабе очистных камер.

Точность инженерного метода расчёта концентрации напряжений в плоском и пространственном случаях определялась на примерах сравнения решения тестовых задач методом конечных элементов, а также задач по определению нагрузок на ленточные и столбчатые

целики, рассчитанные Ж.С.Ержановым и др. методами теории упругости. Расхождения результатов расчёта задачи о распределении напряжения при проведении плоской выработки с прямоугольным уступом для пространственного случая, выполненные инженерным методом и найденное более точным методом не превышали 20%.

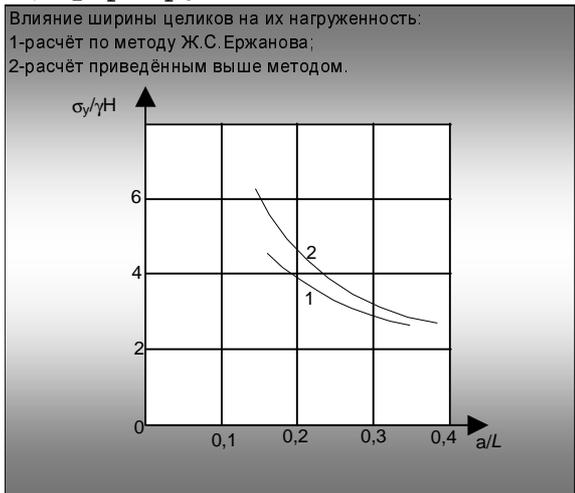
Расчёт нагруженности целиков в изолированных залежах при камерно-столбовой системе разработки для простейших случаев геометрии инженерным методом и выполненный по методике Ж.С.Ержанова и др.

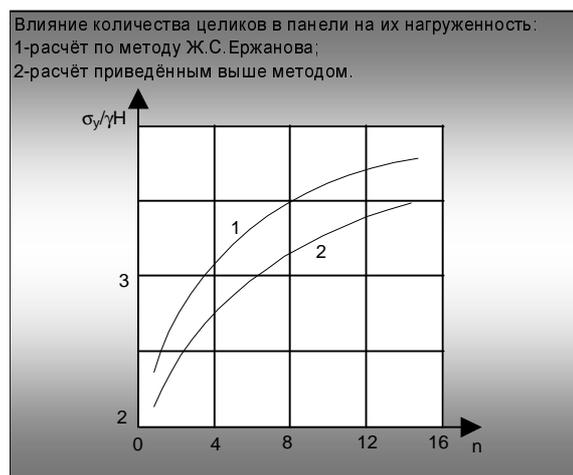
Параметры очистных				Относительная нагрузка на центральный		%
Ширина целика (a), м	Пролёт между целиками (L), м	Высота целика (h), м	Количество целиков в панели	инженерный метод	точный метод	
				5	15	15
5	15	15	2	0,64	0,75	14,0
5	15	15	3	0,71	0,82	13,0
5	15	15	5	0,76	0,86	11,4
5	15	15	7	0,80	0,89	9,9
5	15	15	9	0,83	0,91	8,4
5	15	15	11	0,85	0,92	7,6
5	15	15	15	0,87	0,94	7,0

Сравнительный анализ показывает, что различия между расчётными данными не превышают 14%. Эти значения допустимы для многих задач и её величину (20%) можно принять в качестве оценки погрешности рассмотренного метода расчёта напряжений.

Опробование инженерного метода было произведено для оценки размеров зоны опорного давления для случая частичной отработки охранных целиков стволов шахт Джекказганского месторождения и показала хорошие практические результаты.

Для оценки опорного давления в предохранительном целике ствола при его частичной отработке параметры ленточных целиков (**a**) и очистных камер (**L**) в расчётах варьировались. Установлено, что величина опорного давления в охранном целике в значительной степени зависит от расстояния от ствола до выработанного пространства. Проведённые расчёты позволили определить значение опорного давления, формирующегося вследствие образования камер.





Анализ расчётов показывает, что наибольшее дополнительное давление, достигает $1,5\gamma H$, отмечается у границ предохранительного целика. Однако уже на расстоянии 10м от вырабатываемого пространства дополнительная нагрузка на массив не превышает $0,5\gamma H$, а на расстоянии 15м - $0,1\gamma H$. Таким образом, на основе расчётов можно сделать вывод о том, что частичная отработка охранного целика по фактору горного давления может производиться до тех пор, пока расстояние от границ выработанного пространства ствола не достигнет 20-25м.

На базе проведённых исследований разработаны и согласованы с Госгортехнадзором Респ.Казахстан 29.09.89г. (приложение 29) дополнения к "Временным правилам охраны сооружений от вредного влияния подземных разработок на рудниках Дзержинского горно-металлургического комбината", регламентирующее условия по частичной отработке запасов в охранных целиках стволов шахт и поверхностных сооружений.

Выводы:

При решении задач механики горных пород, связанных с рациональной и безопасной отработкой месторождений, возникает необходимость в получении наиболее быстрой и достоверной информации о состоянии и поведении массива. С этой целью разработан инженерный метод расчёта напряжённо-деформированного состояния массива, аналогичный методу граничных интегральных уравнений. Данный метод позволяет с достаточной точностью без применения ЭВМ, с помощью даже карманного калькулятора, определять нагруженность рудного массива, как в плоском, так и в пространственном случаях, с учётом последовательности формирования выработанного пространства и типа применяемой закладки. Более широкие возможности предложенного метода открываются при использовании его с методом последовательных циклов. Это позволяет учесть динамику развития горных работ как в масштабе очистных камер, так и нескольких горизонтов и залежей, и обоснованно прогнозировать перераспределение напряжений в зависимости от последовательности и технологических особенностей развития горных работ.

Используемые в расчёте методы, являются инженерными методами нового поколения. В основе относительно простых процедур расчёта лежат математические решения задач о разрезах в упругой

среде и определяются условия перехода основных несущих элементов в чисто пластическое состояние.

