УДК 622.831

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ МЕТОДОМ ЩЕЛЕВОЙ РАЗГРУЗКИ

к.т.н. **Барышников В.Д.,** *к.т.н.* **Болтенгаген И.Л.,** *д.ф.-м.н.* **Коврижных А.М.**
Институт горного дела СО РАН, Новосибирск, Россия

Аннотация: Выполнены теоретические исследования влияния параметров щели на смещения массива горных пород на стенке выработки при частичной разгрузке. Предложены уравнения для определения величины смещений. Приведены результаты натурных экспериментов. Дана рекомендация по выбору параметров щели, обеспечивающих приемлемую точность измерений при минимальных ее размерах.

Введение

Основное преимущество щелевой разгрузки [1-3] в сравнении со скважинными методами измерений напряжений – меньшие трудозатраты, что позволяет использовать ее в качестве метода оперативного контроля напряженного состояния массива горных пород на контуре выработок. Экспериментальные работы выполняются следующим образом. На стенке выработки устанавливают два репера и фиксируют расстояние между ними, затем создают прорезь и измеряют смещение реперов при частичной разгрузке стенки выработки вследствие создания щели. Прорезь делают с помощью дисковой камнерезной пилы в форме полудиска или бурением ряда отверстий с разрушением перемычек для создания щели в форме, близкой к тонкой прямоугольной пластине. Цель исследований – выбор параметров щели и расстояния между реперами (с учетом структурных особенностей массива), обеспечивающих для выбранной точности измерений необходимый уровень смещений.

Компонента напряжений, перпендикулярная плоскости щели, определяется с помощью следующего уравнения

$$\sigma_n = \frac{E}{k}\frac{\Delta}{b} ,$$

где E – модуль упругости массива, Δ –смещение между реперами при разгрузке, b – расстояние между реперами (база), k – безразмерный коэффициент, характеризующий степень разгрузки массива горных пород на данной базе измерений. Коэффициент разгрузки зависит от геометрических параметров щели, коэффициента Пуассона и величины базы. Для исследования влияния параметров щели на величины измеряемых смещений использовался метод теории функций комплексного переменного и выполнялось компьютерное моделирование методом конечных элементов. Апробация метода щелевой разгрузки проводилась на руднике «Интернациональный».

Плоская модель

Рассматривается упругая плоскость со щелью под действием постоянного нормального напряжения, приложенного к берегам. В этой задаче можно использовать упрощенный вариант уравнений Колосова – Мусхелишвили [4]:

$$\sigma_{xx} = Re\, Z_1 - y\, Im\, Z_1', \ \sigma_{yy} = Re\, Z_1 + y\, Im\, Z_1', \ \tau_{xy} = -y\, Re\, Z_1',$$

где $Z_1' = \dfrac{dZ_1}{dz}$.

Обозначим Z_0 - первообразную функции Z_1 т. е.

$$\frac{dZ_0}{dz} = Z_1,$$

тогда для перемещений имеем:

$$2\mu U_x = (\kappa - 1) Re Z_0 / 2 - y\, Im Z_1, \ \ 2\mu U_y = (\kappa + 1) Im Z_0 / 2 - y\, Re Z_1, \qquad (1)$$

где к равно $3\text{-}4\nu$ для плоской деформации и $(3-\nu)/(1-\nu)$ для плоского напряженного состояния, μ – модуль сдвига $E/2(1+\nu)$, z– комплексная переменная $x+iy$.

На берегах щели

$$y = 0, \quad -a \le x \le a: \quad \sigma_{yy} = -p(x).$$

Для получения решения рассматриваемой задачи достаточно найти регулярную вне разреза функцию комплексного переменного $Z_1(z)$, убывающую на бесконечности не медленнее $1/z^2$. Л.И. Седовым предложена следующая формула для определения функции $Z_1(z)$ по заданной действительной части на разрезе [5]:

$$Z_1 = \frac{1}{\pi\sqrt{z^2 - a^2}} \int_{-a}^{a} \frac{p(x)\sqrt{a^2 - x^2}}{z - x} dx$$

Рассмотрим случай постоянного давления на берегах разреза p_0, тогда:

$$Z_1 = \frac{p_0 z}{\sqrt{z^2 - a^2}} - p_0.$$

Путем интегрирования найдем Z_0 и в итоге получим:

$$Z_0 = p_0\sqrt{z^2 - a^2} - p_0 z.$$

При известных функциях Z_0 и Z_1 по формулам (1) можно найти перемещения в любой точке. В частности, определим вертикальное перемещение U_y точек на оси y, т. е. при x, равном 0:

$$U_y = \frac{p_0}{2\mu} \frac{a}{\sqrt{(y/a)^2 + 1} + y/a} \left(\frac{\kappa + 1}{2} + \frac{y/a}{\sqrt{(y/a)^2 + 1}} \right)$$

Найдем вертикальное перемещение в точке y_0 для плоского напряженного состояния:

$$U_y(y_0) = \frac{p_0}{2\mu} \frac{a}{\sqrt{(y_0/a)^2 + 1} + y_0/a} \left(\frac{2}{1+\nu} + \frac{y_0/a}{\sqrt{(y_0/a)^2 + 1}} \right) \qquad (2)$$

и для плоской деформации:

$$U_y(y_0) = \frac{p_0}{2\mu} \frac{a}{\sqrt{(y_0/a)^2 + 1} + y_0/a} \left(2(1-\nu) + \frac{y_0/a}{\sqrt{(y_0/a)^2 + 1}} \right).$$

При щелевой разгрузке следует принять p_0 равным $-\sigma_n$, где σ_n - сжимающее напряжение на бесконечности вдоль оси y. Последнее уравнение используется для определения модуля упругости пород в испытаниях с плоскими домкратами [6].

На контуре выработок реализуется плоское напряженное состояние и для оценок коэффициента разгрузки при создании щели в форме пластины толщиной h можно использовать следующее уравнение

$$k = \frac{2(1+\nu)}{b} \frac{a}{\sqrt{((b-h)/2a)^2 + 1} + (b-h)/2a} \left(\frac{2}{1+\nu} + \frac{(b-h)/2a}{\sqrt{((b-h)/2a)^2 + 1}} \right), \qquad (3)$$

Выражения (2) (при y_0 равном $(b\text{-}h)/2$) и (3) рекомендуются для аналитических оценок ожидаемого уровня смещений реперов и коэффициента разгрузки. Прорезь имеет конечную глубину, поэтому полученные с помощью этих уравнений величины несколько превышают реальные значения.

Результаты компьютерного моделирования

Исследовалось деформирование массива с прорезью в форме пластины и полудиска в условиях одноосного сжатия, перпендикулярного плоскости щели. Вследствие симметрии задачи рассматривалась четверть полной расчетной области, которая разбивалась на шестиузловые элементы (прямоугольные призмы с треугольным основанием). Количество узлов – около 15 тысяч, минимальный размер элементов – 8 мм.

Глубина щели- пластины изменялась в интервале значений от 60 до 400 мм при следующих значениях остальных параметров: длина щели *2a* - 200 мм, толщина *h* - 16 мм, коэффициент Пуассона ν - 0.25. Для глубины щели 120 мм применялась и более детальная дискретизация области с числом узлов около 50 тысяч и минимальным размером элементов 2мм вблизи щели. Сравнение величин смещений для более и менее детальной дискретизации расчетной области позволило определить точность численного моделирования (около 1%). Рис. 1 иллюстрирует значения коэффициента разгрузки при различной глубине щели.

Исследовалось влияние коэффициента Пуассона в интервале значений от 0 до 0.4 на величину коэффициента разгрузки для щелей толщиной 16 мм в форме пластины глубиной 120 мм и полудиска радиусом *R* – 100 мм. Различие не превышает 10% и с ростом коэффициента Пуассона коэффициент разгрузки увеличивается (для полудиска его максимум достигается при *ν* равном 0.35).

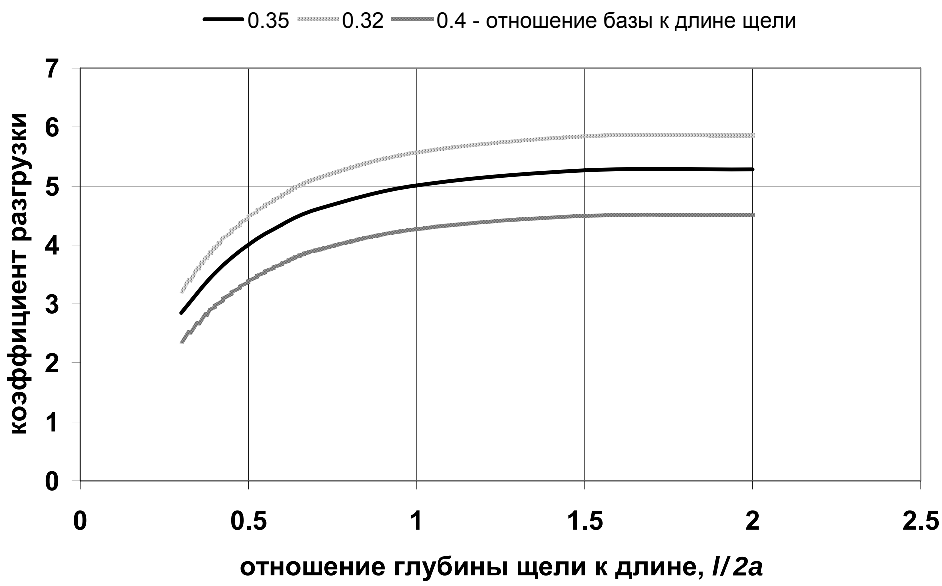

Рис.1. Зависимость коэффициента разгрузки от отношения глубины щели к ее длине при различных базах.

На основании выполненных расчетов и теории подобия предлагаются следующие аппроксимации коэффициента разгрузки для щели в форме

$$\text{пластины - } k = \frac{3.16}{b}\frac{2al}{a+l}(1+0.414\nu-0.398\nu^2)exp(-0.835\frac{a+l}{2al}\frac{b-h}{2}) \; , \qquad (4)$$

$$\text{полудиска - } k = \frac{2.98R}{b}(1+0.426\nu-0.584\nu^2)exp(-\frac{b-h}{2R}) \; . \qquad (5)$$

Величина множителя, зависящего от коэффициента Пуассона в интервале его значений 0.÷0.4 изменяется от 1 до 1.1. При оценках в случае отсутствия информации о коэффициенте Пуассона рекомендуется величину данного множителя принимать равной 1.0786 и 1.07 (ν=0.25) для щелей в форме пластины и полудиска соответственно, обеспечивающую точность до 5% в интервале значений коэффициента Пуассона от 0.2 до 0.3.

Для щели в форме пластины (отношение глубины к длине равно 0.6) и полудиска на рис.2 показаны зависимости коэффициента разгрузки от отношения базы к длине щели, полученные с помощью компьютерного моделирования, предложенных аппроксимаций и аналитического уравнения (3).

Аппроксимация (4) обеспечивает точность до 5% при отношениях *l/a* и *b/a* в интервалах значений 0.8÷2.0 и 0.3÷2.0. В соответствующих интервалах 0.6÷4.0 и 0.2÷3.0 обеспечивается точность до 10%. Коэффициент разгрузки определяется с помощью уравнения (5) с точностью до 5% для отношений базы к радиусу щели в интервале значений 0.2-2.

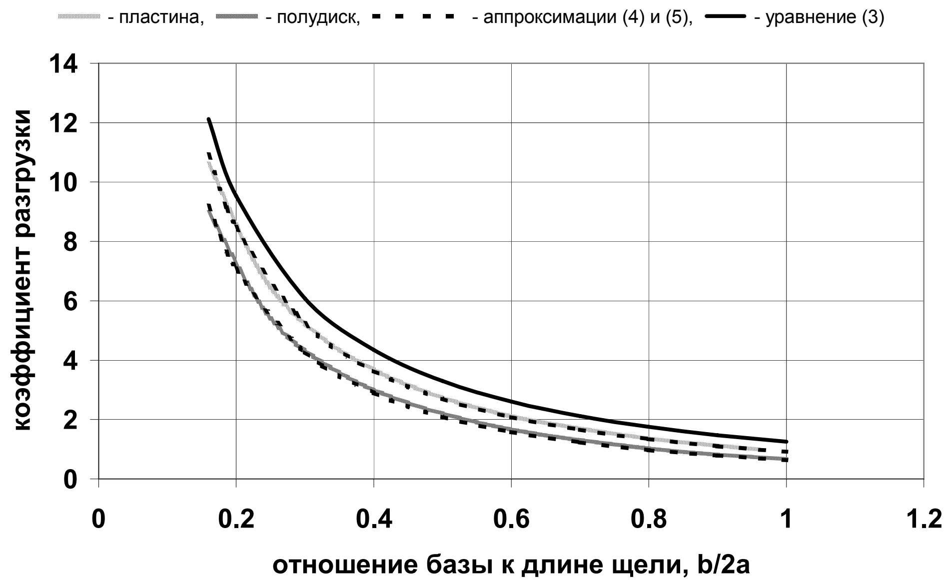

Рис.2. Величины коэффициента разгрузки (моделирование, аппроксимации и аналитическая формула).

Величина смещений массива со щелью в форме полудиска примерно на 20% меньше смещений для прорези в форме прямоугольной пластины глубиной, равной половине длины щели.

На основании выполненных теоретических исследований рекомендуется при проведении натурных измерений создавать щель глубиной примерно равной половине ее длины. Уровень смещения реперов в данном случае на 25% меньше предельного значения, достигаемого при увеличении глубины щели до двух ее длин. Такой же рост уровня смещений достигается увеличением длины щели в полтора – два раза при фиксированной ее глубине. Для минимизации размеров щели с целью снижения трудозатрат на проведение экспериментальных работ следует пропорционально увеличивать длину и глубину щели (при их отношении, приблизительно равном двум) до получения необходимого уровня смещений, обеспечивающих выбранную точность измерений.

Результаты экспериментальных измерений

Эксперименты выполнялись в двух измерительных пунктах. Выработка первого измерительного пункта была расположена в соляном массиве с модулем упругости 11 ГПа, вторая – в породном массиве с модулем упругости 42 ГПа. В забоях создавались горизонтальная и вертикальная щели для определения компонент напряжений. Параметры щелей: длина – 200 мм, глубина – 120 мм, толщина – 16 мм. Расстояние между реперами – 70 мм. В таблице приведены результаты измерений смещения реперов при щелевой разгрузке и рассчитанные напряжения в забоях. Коэффициент разгрузки принимался равным 4.34.

Для оценок напряжений в массиве с учетом их концентрации в забоях использован следующий подход. Вертикальная и горизонтальная компоненты напряжений в забое σ_v σ_h зависят от компонент напряжений в массиве горных пород σ_v^* , σ_h^* и σ_H^* , где σ_H^* - горизонтальная компонента напряжений, ориентированная в направлении выработки. Для выработки кругового поперечного сечения

$$\sigma_v = q\sigma_v^* + r\sigma_h^* + s\sigma_H^*$$
$$\sigma_h = r\sigma_v^* + q\sigma_h^* + s\sigma_H^*,$$

где величины коэффициентов концентрации напряжений

$$q=1.25\ ,\ r=0\ ,\ s=-0.75(0.645+\nu)$$

получены Ван-Херденом [7]. Широкий обзор значений коэффициентов концентрации напряжений, полученных различными методами многими независимыми исследователями для анализа торцевой разгрузки скважин, приведен в работе [8]. В расчетах примем коэффициент Пуассона ν равным 0.25 и предположим равенство горизонтальных компонент напряжений σ_h^* и σ_H^*. Данные визуальных наблюдений за состоянием выработок подтверждают, что различие σ_h^* и σ_H^* не превышает 20%. Для определения напряжений в массиве горных пород использовались следующие уравнения

$$\sigma_v^* = \frac{(q+s)\sigma_v - s\sigma_h}{q}\ ,\ \sigma_h^* = \frac{\sigma_h}{q+s}\ .$$

ТАБЛИЦА. Результаты экспериментальных измерений напряжений.

№ замер-ного пункта	Ориен-тация щели	Смещения реперов, мкм	Вертикальная и горизонтальная компоненты напряжений , МПа	
			В забое	В массиве
1	Гориз.	560	20.3	28.3
	Вертик.	360	13.0	22.5
2	Гориз.	140	19.4	27.0
	Вертик.	90	12.4	21.5

Соответствующие значения напряжений также приведены в таблице. Отметим, что измеренные величины вертикальной компоненты напряжений на 25-30% превышают значение 22 МПа, определяемое весом налегающей толщи пород (глубина H около 800м), что объясняется увеличением напряжений вследствие создания системы выработок на данном горизонте.

Выводы

1. Получено аналитическое уравнение для определения смещений массива горных пород при щелевой разгрузке. Предложены аппроксимации для определения коэффициента разгрузки при различных значениях экспериментальных параметров. Установленные зависимости обеспечивают возможность оптимального планирования эксперимента в различных горно- геологических условиях месторождений.
2. По данным экспериментов в двух измерительных пунктах определены компоненты напряжений на руднике «Интернациональный». Отношение горизонтальных напряжений к вертикальным в массиве горных пород равно 0.8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Влох Н.П., Зубков А.В., Феклистов Ю.Г.** Совершенствование метода щелевой разгрузки // Диагностика напряженного состояния породных массивов. -Новосибирск: ИГД СО РАН СССР, 1980.
2. **Инструкция** по безопасному ведению горных работ на рудных и нерудных месторождениях, склонных к горным ударам. –Л.: ВНИМИ, 1980.
3. **Зубков А.В.** Геомеханика и геотехнология. –Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2001.
4. **Мусхелишвили Н.И.** Некоторые основные задачи математической теории упругости. –М: Наука, 1966.
5. **Седов Л.И.** Механика сплошной среды, т.2. –М.: Наука, 1973.
6. **Гудман Р.** Механика скальных пород. –М.: Стройиздат, 1987.
7. **Витке В.** Механика скальных пород. –М: Недра, 1990.
8. **Курленя М.В., Попов С.Н.** Теоретические основы определения напряжений в горных породах. –Новосибирск: Наука, 1983.