

**ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО
СОСТОЯНИЯ ПОРОДНОГО МАССИВА, СОДЕРЖАЩЕГО
ПРОТЯЖЕННУЮ ГОРНУЮ ВЫРАБОТКУ, ПЕРЕСЕКАЮЩУЮ
ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ НАРУШЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Розглянуті результати чисельного моделювання напружено-деформованого стану ділянки порідного масиву, що містить протяженну гірську виробку, що перетинає розривне геологічне порушення. У основу методичного підходу до постановки завдання моделювання поставлений розгляд геомеханічних процесів в ділянці порідного масиву, що містить виробку поетапно, по ходу наближення і наступного видалення від геологічного порушення.

**THE RESEARCH STRESS-STRAIN STATE of ROCK MASS, CONTAINING
EXTENSIVE WORKING, CROSSING GEOLOGICAL VIOLATION BY
USING THE NUMERAL MODELLING**

The results of numeral design of the stress-strain state the part of rock mass, containing the extensive rock working, crossing break geological violation are considered. In basis of the methodical going near raising of design task consideration of geomechanical processes is put in the area of rock mass, containing rock working stage-by-stage, on motion approaching and subsequent moving away from geological violation.

Введение. Напряженно-деформированное состояние (НДС) породного массива как сложноструктурной геологической среды определяется совокупностью физико-механических свойств: плотности, влажности, энергии, структурных связей, теплоемкости, теплопроводности и внешних условий: величины объемных и поверхностных сил, температуры, времени и характера приложения нагрузок. В зависимости от сочетания этих условий горные породы разнятся между собой условиями залегания, составом, структурой и текстурой, механическим состоянием [1]. Таким образом, сложный характер неоднородности породных массивов связан как с неоднородностью исходного породообразующего материала, так и с его последующими преобразованиями в ходе геологических процессов, миграции подземных вод и газов [2].

Постановка задачи. Задача исследования НДС гетерогенного породного массива в окрестности протяженной выработки, произвольно ориентированной в пространстве (вертикальная, наклонная, горизонтальная) при пересечении ею разрывного нарушения в полной мере может быть решена только численно на основе объемной модели. Поскольку рассматривается выработка глубокого заложения, такая задача должна быть исследована на основе упругопластической модели. Это делает решение чрезвычайно сложным, громоздким, трудно поддающимся анализу. В этой связи интересным представляется подход, предложенный в работах В.В. Янко [3 – 5]. Им предлагается рассматривать выработку в продольном сечении поэтапно, по мере приближения, пересечения и ухода от нарушения. Для того чтобы решение соответствовало условиям плоской деформации, к контуру выработки прикладывается некоторая эквивалентная на-

грузки, распределенная по закону параболы. За основу приняты известные решения плоской упругопластической задачи о пересечении очистной выработкой (лавой) геологического нарушения [6, 7] и такой же задачи относительно одиночной выработки [8].

В нашем случае решается более сложная задача: выработка имеет произвольное расположение в пространстве. Расчетная схема такой задачи представлена на рис. 1. Породы в зоне влияния разрывного геологического нарушения имеют изменяющуюся в общем случае по нелинейному закону прочность (меньше к центру и больше к краям). Конкретные физико-механические свойства исследованных пород вне зоны разрывного нарушения приведены в таблице.

В связи с этим, **целью данной работы** было рассмотрение геомеханических процессов при численном моделировании состояния протяженной выработки поэтапно, по мере приближения и последующего отхода от геологического нарушения.

Таблица 1 – Физико-механические характеристики углевмещающих пород

Параметр	Уголь	Аргиллит	Алевролит	Песчаник
Объемный вес пород, МПа/м	$1,23 \cdot 10^{-2}$	$2,76 \cdot 10^{-2}$	$2,84 \cdot 10^{-2}$	$2,36 \cdot 10^{-2}$
Предел прочности на одноосное сжатие, МПа	17	42	45	63
Предел прочности на одноосное растяжение, МПа	2,3	5,7	4,7	7,2
Коэффициент Пуассона	0,18	0,21	0,26	0,23
Модуль Юнга, МПа	$2,20 \cdot 10^4$	$4,80 \cdot 10^4$	$5,30 \cdot 10^4$	$9,28 \cdot 10^4$

Основная часть. Задача решалась с помощью метода конечных элементов (МКЭ) на основе программного продукта, разработанного на кафедре строительства и геомеханики Национального горного университета (НГУ). В основу программного продукта положено представление о разупрочняющейся породной среде в условиях контролируемого разрушения [1]. Диаграмма разрушения такой породной среды представлена на рис. 1.

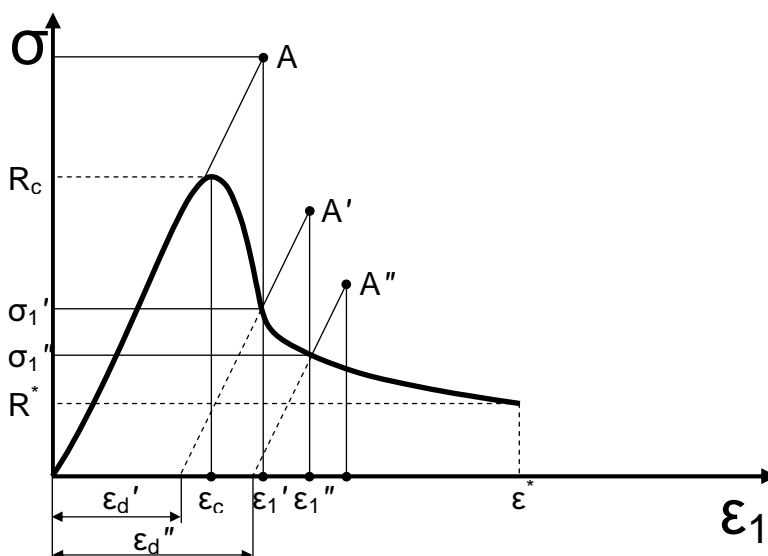
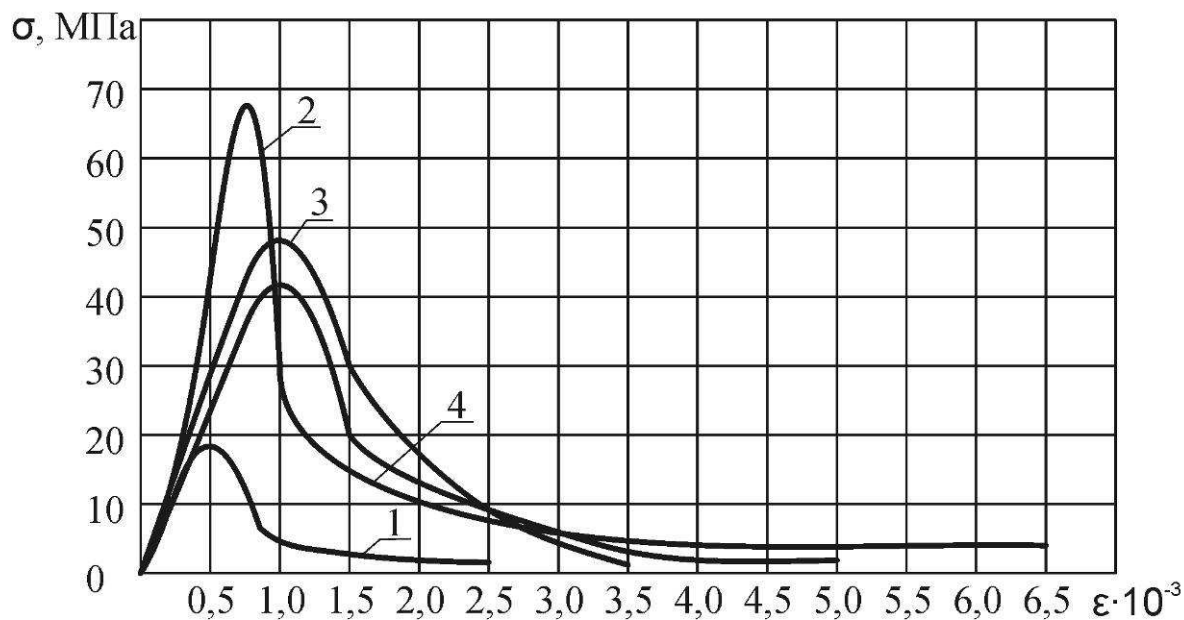


Рис. 1 – Диаграмма разрушения образца горной породы в условиях контролируемого разрушения и схема реализации численного алгоритма

Ее особенностью является наличие ниспадающей ветви после достижения предела нагружения в точке с координатами (R_c, ε_c) . Наличие ниспадающей ветви диаграммы приводит к тому, что в области разрыхления условие устойчивости по Адамару [5, 9] не выполняется, что с теоретической точки зрения приводит к множественности решений краевой задачи. В этом случае система уравнений относительно перемещений становится вырожденной и вычислительный процесс останавливается. Таким образом, ни одна из традиционных моделей в этом случае неприменима. В работе [10] предложена модель пошагового решения, реализованная в программном продукте НГУ. Эта модель является аналогом известного в механике метода упругих решений, который часто применяется для решения краевых задач с упрочнением [11].

На рис. 2. приведены диаграммы деформирования основных углевмещающих пород в режиме контролируемого нагружения. Они заимствованы из работы А.Н. Роечко [12] и были использованы для реализации метода пошагового упругого решения, суть которого сводится к следующему [13]. Ниспадающий участок рассматривается не как часть графика деформирования, а как некоторая абстрактная кривая, которая описывает предельное упругое состояние горной породы за счет сохранившихся структурных связей при достигнутых конкретных деформациях. В [14] рассматривается идеализированная диаграмма одноосного сжатия « $\sigma_1 \sim \varepsilon_1$ », состоящая из двух участков – прямолинейного и ниспадающего (рис. 1). От начала нагружения и до достижения значения деформации $\varepsilon_c = \frac{R_c}{E}$, где E – модуль Юнга, материал подчиняется закону Гука, а коэффициент Пуассона μ остается постоянным.



1 – уголь; 2 – песчаник; 3 – алевролит; 4 – аргиллит.

Рис. 2 – Диаграммы деформирования основных углевмещающих пород

При $\varepsilon_1 > \varepsilon_c$ ниспадающий участок описывается некоторой функцией со следующими свойствами:

$$\sigma_1 = R_c - f(\varepsilon_1 - \varepsilon_c); \quad f(0) = 0, \quad \frac{\partial f}{\partial \varepsilon_1} < 0. \quad (1)$$

В [14] предполагается также, что разгрузка и повторное нагружение происходят по прямой линии, параллельной начальному упругому участку, что определяет достигнутую остаточную деформацию ε_d . Пусть в ходе численного упругого решения на определенном шаге нагружения установлено, что в первом конечном элементе достигнуто напряжение $\sigma_1 > R_c$, соответствующее деформации ε'_1 . Для того чтобы вернуться на ниспадающую ветвь, следует определить в точке A' соответствующие достигнутой деформации напряжения σ'_1 по формуле (1) (рис. 1). Это напряжение будет новым предельным значением $R'_c = \sigma'_1$ на кривой достигнутого предельного упругого состояния, а рассматриваемая область приобретает остаточную деформацию:

$$\varepsilon'_d = \varepsilon'_1 - \left(\frac{R'_c}{E} \right). \quad (2)$$

После этого процесс упругого решения продолжается, с пошаговым увеличением внешней нагрузки. В том же элементе достигается напряжение $\sigma_1 > R'_c$ при деформации ε''_1 , возвращаясь на ниспадающую ветвь, в точке A'' находим по формуле (1) соответствующие достигнутой деформации напряжения σ'' , которое и будет новым предельным значением $R''_c = \sigma''_c$, а остаточная деформация в данном элементе становится равной:

$$\varepsilon''_d = \varepsilon''_1 - \left(\frac{R''_c}{E} \right). \quad (3)$$

Процесс будет считаться законченным, когда нагрузки на границе области достигнут заданного значения, а новые элементы с уровнем напряжения, превышающим предельное, не будут больше появляться.

Аналогичным образом обрабатываются все остальные элементы, в которых значение напряжения превышает предельное значение. Процесс считается законченным, когда нагрузки на границе области достигают заданного значения, а новые элементы с напряжением, превышающим предельное, не будут появляться.

Для решения реальных задач изложенную выше процедуру можно обобщить на случай многоосного напряженного состояния.

Существует такая мера эффективных напряжений, которая в случае плоского деформированного состояния (характерного для данного класса задач) характеризуется функцией:

$$\sigma_e = g(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_{12}). \quad (4)$$

При этом необходимо иметь критерий разрушения (эквивалентное напряжение σ_e) определяемый равенством $\sigma_e = R_c$, который принят в форме, предложенной А.Н. Шашенко [1]:

$$\sigma_e = \frac{(\psi - 1)(\sigma_x + \sigma_y) + \sqrt{(1 - \psi)^2(\sigma_x + \sigma_y)^2 + 4\psi(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 16\psi\tau_{xy}^2}}{2\psi} < R_c, \quad (5)$$

где σ_x и σ_y – компоненты напряжений; $\psi = R_p / R_c$ – коэффициент хрупкости, равный отношению предела прочности на растяжение к пределу прочности на сжатие.

Анализ результатов численного моделирования. При достижении предельного значения R_c в точках области, прилежащей к зоне неупругих деформаций, начинается процесс разрыхления горной породы. Экспериментально и теоретически показано [13], что нагружение в глубине массива можно считать управляемым по деформациям, так что диаграмма «напряжение-деформация» имеет два различных ярко выраженных участка, как это показано на рис. 1. На первом из них материал деформируется упруго, так что имеет место закон Гука. По достижении предела разрушения R_c , имеет место переход на ниспадающий участок диаграммы. На этом участке с ростом деформаций напряжение постепенно уменьшается вплоть до некоторого предела R_c^* . Обычно данный предел мал ($R_c^* \ll R_c$) и с достаточной степенью точности может быть принят равным нулю [14].

Результаты численного моделирования при изложенных выше условиях показали удовлетворительное совпадение размеров зон разрушенных пород вокруг выработок в первом и втором моделируемых случаях. Отклонение не превысило 5 – 7% для однородной модели и 7 – 12% для неоднородной.

Суть исследований состояла в изучении НДС породного массива, содержащего разрывное геологическое нарушение с соответствующей зоной влияния и углом наклона, и выработку, произвольно ориентированную в пространстве, которая пересекает это нарушение. Степень опасности уровня напряжений оценивалась коэффициентом запаса прочности, который равен отношению предела прочности пород на одноосное сжатие R_c с учетом коэффициента структурного ослабления k_c , к величине эквивалентных напряжений, определяемых по формуле (5). Величина коэффициента структурного ослабления породного массива определялась по методике, изложенной в [15]:

$$k_c = 1 - \sqrt{0,5\eta} \exp(-0,25\eta), \quad (6)$$

$$\text{где } \eta = \sqrt{\frac{l_T + l_0}{l_T} (\eta_0^2 + 1)} - 1.$$

Здесь l_T – среднее расстояние между трещинами (плоскостями ослабления); l_0 – средний размер стандартного образца; η_0 – коэффициент вариации результатов испытаний горных пород.

Угол наклона выработки α в процессе численного эксперимента принимал следующие значения: 0° , 35° , 60° , 90° . Это позволяло смоделировать вертикальные, наклонные и горизонтальные выработки. Углы падения пород изменялись от 0° до 15° , что соответствовало средним значениям горно-геологических условий Восточного Донбасса. Ввиду незначительного отличия физико-механических свойств углевмещающих пород амплитуда разрывного нарушения существенной роли не играла и не исследовалась. Изменение свойств горных пород в пределах зоны влияния дизъюнктива принято линейным: от максимального значения у краев к минимальному у его середины.

В ходе решения численной модели пространство вокруг нарушения по ходу движения выработки разбивалось на 10 равных частей со своими физико-механическими характеристиками. При этом выработка условно «подвигалась» на определенное расстояние от 0 до 40, 80, 120, 1500 м. Угол наклона выработки при этом менялся от 0° до 90° . Для каждой геомеханической ситуации определялись компоненты напряжений и эквивалентные напряжения, а также величина коэффициента запаса прочности по центру забоя.

На рис. 3. а, б, в в качестве примера приведены распределения компонентов нормальных напряжений σ_y и σ_x , а на рис. 4. изменение коэффициента запаса прочности породного массива по мере пересечения выработкой ($\alpha=35^\circ$) зоны влияния дизъюнктива. Отчетливо просматривается рост напряжений по мере «приближения» выработки к нарушению и постепенное их уменьшение при удалении выработки от дизъюнктива. При этом происходят и соответствующие изменения коэффициента запаса прочности породного массива у забоя проводимой выработки: он уменьшается от величины 0,57 у краев нарушения до 0,73 у его центра. Соответственно в 2,48 раза следует ожидать снижения устойчивости выработки. Это повлечет за собой пропорциональное увеличение несущей способности крепи (уменьшение шага металлической крепи, увеличение номера используемого профиля, увеличение толщины бетонной крепи или переход на железобетонную крепь).

Результирующий график изменения величины минимального значения коэффициента запаса прочности породного массива в окрестности забоя проводимой выработки от угла ее наклона α для рассматриваемого угла наклона оси разрывного нарушения $\beta = 30^\circ$ показан на рис. 4. Он хорошо аппроксимируется следующей степенной зависимостью:

$$k_3 = 5E - 5\alpha^2 - 0,005\alpha + 0,25. \quad (7)$$

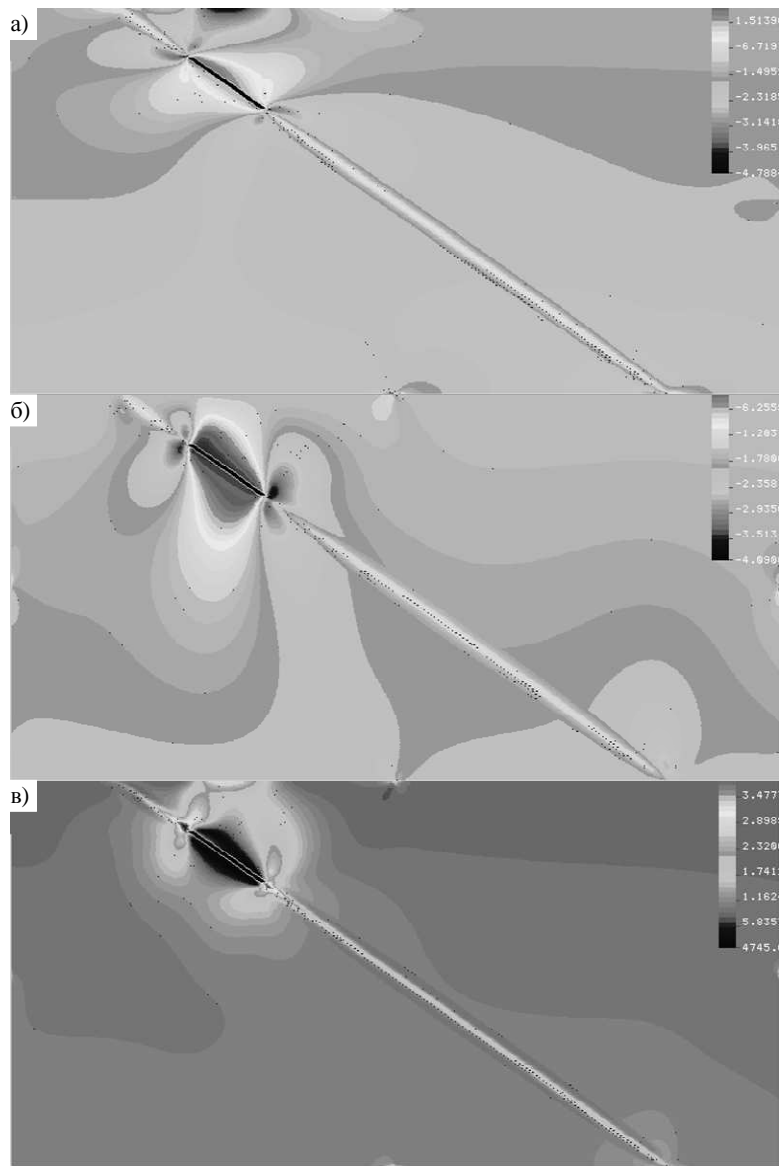


Рис. 3 – Распределение напряжений при движении выработки ($\alpha=35^\circ$) от 0 до 20 м: а) σ_x ; б) σ_y ; в) σ_z .

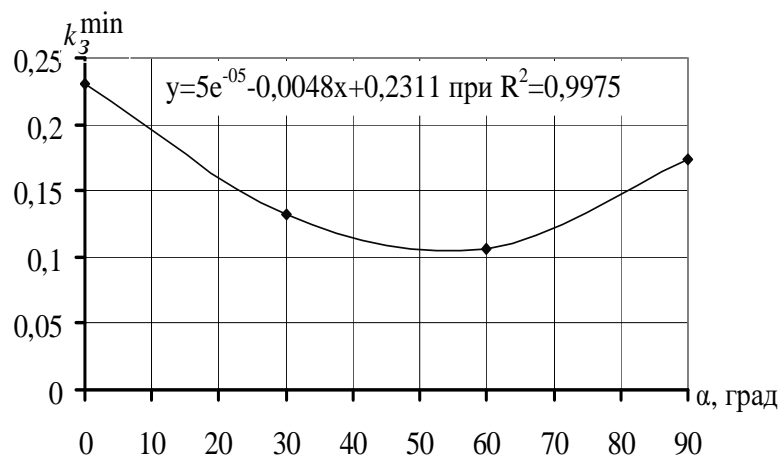


Рис. 4 – Зависимость минимального значения коэффициента запаса прочности от угла наклона выработки при угле наклона нарушения ($\beta=30^\circ$)

При этом коэффициент вариации равен $R^2 = 0,99$.

В том случае, если угол наклона оси дизъюнктивного нарушения β не является величиной постоянной, а полуширина нарушения равна a , то длина выработки, которая будет подвергаться повышенному горному давлению $2a_g$, определяется из схемы, приведенной на рис. 5, на основании которой был получен график (рис. 6) по формуле:

$$\frac{a_g}{a} = \frac{k}{\sin(\beta - \alpha)}. \quad (8)$$

Из (8) следует, что при $\alpha = 90^0$ и $\beta = 0$ (180^0), $a_g = a$. При $\alpha = 0$ и $\beta = 0$ (180^0), $a_g = \infty$, или L , где L – длина выработки, k – коэффициент концентрации напряжений в окрестности пересечения нарушения ($k \geq 1-2,5$).

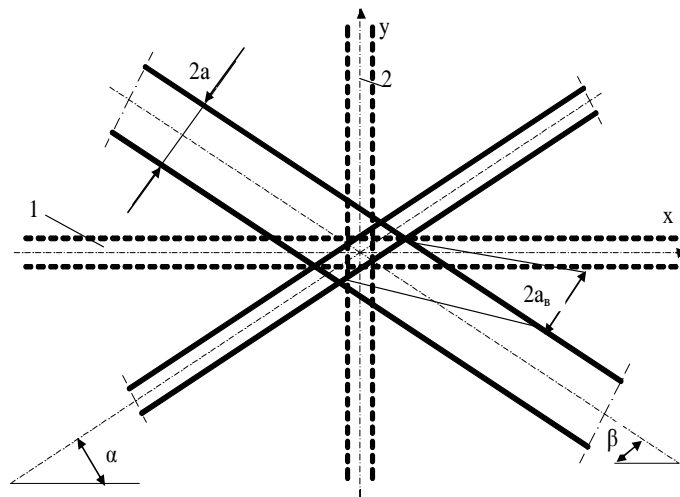


Рис. 5 – Схема к определению длины выработки, испытывающей повышенное горное давление: 1 – горизонтальная выработка; 2 – вертикальная выработка.

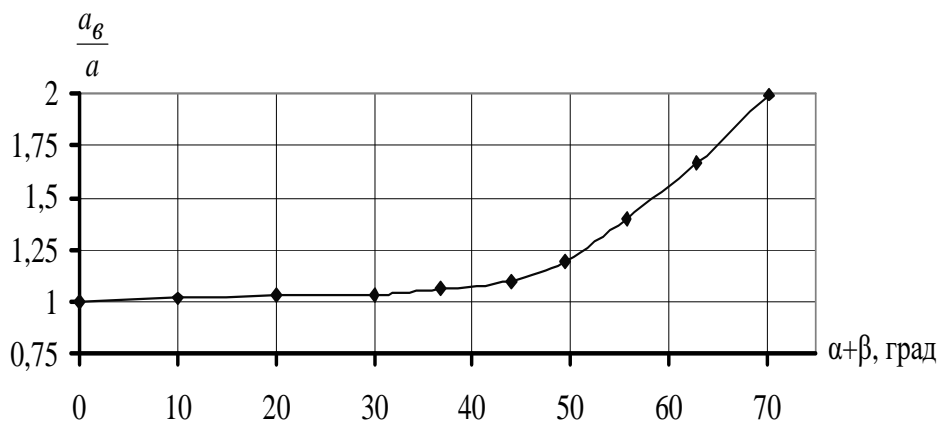


Рис. 6 – Зависимость относительной ширины зоны повышенного давления от взаимного расположения выработки и нарушения в пространстве

Выводы.

1. Установлены основные зависимости, позволяющие определить часть выработки, которая на участке пересечения зоны разрывного геологического нарушения подвергается повышенному горному давлению, и установить уровень этой нагрузки по сравнению с горным давлением вне зоны влияния дизъюнктива.

2. Минимальное значение коэффициента запаса прочности породного массива в окрестности забоя не зависит от ориентации в пространстве протяженной выработки находится в параболической зависимости от угла падения разрывного нарушения, что позволяет оценить уровень нагрузки на крепь.

3. Длина протяженной выработки, имеющей угол наклона β при ее пересечении с разрывным нарушением шириной $2a$, имеющем угол падения α , прямо пропорциональна ширине нарушения и обратно пропорциональна синусу разности углов α и β , что позволяет определить объемы работ по усилению крепи в районе нарушения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шашенко А.Н. Деформируемость и прочность массивов горных пород: [монография] / Шашенко А.Н., Сдвижкова Е.А., Гапеев С.Н. – Днепропетровск: РИК НГУ, 2008. – 224 с.
2. Глушко В.Т. Породный массив как гетерогенная среда / Глушко В.Т., Ямшиков В.С., Яланский А.А. // Геофизический контроль в угольных шахтах. – К.: Наук. думка, 1978. – 224 с.
3. Солодянкин А.В. Актуальные задачи обеспечения устойчивости выработок при пересечении зон геологических нарушений / А.В. Солодянкин, В.В. Янко // Материалы междунар. конф. «Перспективы освоения подземного пространства». – Д.: РИК НГУ, 2008. – С. 43–46.
4. Шашенко А.Н. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния разупрочняющегося массива в окрестности подземной выработки / Шашенко А.Н., Янко В.И., Солодянкин А.В. // Геотехническая механика. – Днепропетровск – Донецк: ООО «Норд Компьютер». – 2002. – № 40. – С. 13–17.
5. Шашенко А.Н. Учет эффекта разупрочнения породного массива в задачах геомеханики / Шашенко А.Н., Янко В.И., Солодянкин А.В. // Науковий вісник НГУ. – 2003. – № 7. – С. 29–33.
6. Шашенко А.Н. Некоторые задачи статистической геомеханики / Шашенко А.Н., Тулуб С.Б., Сдвижкова Е.А. – К.: «Пульсары», 2002. – 304 с.
7. Сдвижкова Е.А. Анализ статистических моделей распределения нагрузки на крепь горизонтальных протяженных выработок / Сдвижкова Е.А., Татаринев А.А., Рубец Г.Т. // Науковий вісник НГАУ. – Дніпропетровськ: НГАУ, 1998. – №1. – С. 40–41.
8. Шашенко А.Н. Численное решение упругопластической задачи применительно к устойчивости подземных выработок / А.Н. Шашенко, С.Н. Гапеев // Науковий вісник НГУ – Днепропетровск: НГУ, 2007. – №12. – С. 7–12.
9. Трусделл К. Первоначальный курс рациональной механики сплошных сред / Трусделл К. – М.: Изд-во "Мир". – 1975. – 592 с.
10. Шашенко А.Н. Определение напряженно-деформированного состояния породного массива с учетом эффекта разупрочнения в зоне разрыхления / Шашенко А.Н., Солодянкин А.В., Гапеев С.Н. // Разработка рудных месторождений. Науч.-техн. сб. – Кривой Рог: КрГУ, 2005. – Вып. 88. – С. 44–49.
11. Hinton E. Finite element programming. / Hinton E., Owen D.R.J. – London: Academic Press, 1977. – 305 p.
12. Робенко А.Н. Устойчивость подготовительных выработок угольных шахт в условиях больших глубин разработки: Дис. ... докт. техн. наук: 05.15.04. – Днепропетровск, 1995. – 426 с.
13. Гапеев С.Н. Компьютерное моделирование процесса пучения пород почвы в подготовительных выработках / Гапеев С.Н., Рязанцев А.П., Лозовский С.П. // ГИАБ. – М: Изд-во МГГУ, 2003. – №10. – С. 99–101.
14. Гапеев С.Н. Исследование процесса потери упругопластической устойчивости массива в окрестности одиночной выработки численными методами / Гапеев С.Н. // Изв. Тульского государственного университета. Серия: «Геомеханика. Механика подземных сооружений». – Тула: Изд-во ТГУ, 2003. – Вып. 1. – С. 65–69.
15. Шашенко А.Н. Масштабный эффект в горных породах / Шашенко А.Н., Сдвижкова Е.А., Кужель С.В. – Д.: АРТ ПРЕСС, 2004. – 132 с.