

*д.т.н., проф. Литвинский Г.Г.,
аспирант Павлов Е.Е.
(ДонГТУ, Украина, sggs-dostu.ucoz.ru)*

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВЗРЫВНОЙ РАЗГРУЗКИ ПОРОД В КРОВЛЕ ВЫРАБОТКИ

Розглянута суть нового методу управління стійкістю гірничих виробок шляхом вибухового розвантаження порід покрівлі від напружень. Методом кінцевих елементів вивчені закономірності розподілу напружень при розвантаженні. Дани рекомендації за визначенням геомеханічних параметрів вибухового розвантаження.

1. Введение

В настоящее время прослеживается явная тенденция увеличения глубины разработки при добыче полезных ископаемых, что сопровождается значительным ухудшением горно-геологических условий проведения и крепления горных выработок. Затраты на крепление и поддержание горных выработок становятся сравнимыми с их стоимостью. Трудоемкость и материалоемкость работ по ремонту и перекреплению выработок составляет значительную часть себестоимости угля на угледобывающих предприятиях. Существующие способы и средства обеспечения устойчивости выработок в основном сводятся к их креплению и периодическим ремонтам. Однако на больших глубинах разработки это становится явно недостаточным и требует применения активных способов управления устойчивостью массива горных пород вокруг выработок.

Актуальной задачей является определение геомеханических параметров взрывной разгрузки пород в кровле выработки, к которым относятся глубина и степень разгрузки массива горных пород от напряжений в окрестности горной выработки.

Целью исследований в данной работе являлось изучение закономерностей распределения напряжений и деформаций вокруг горной выработки при осуществлении в ее кровле взрывной разгрузки. Объектом исследования был способ управления устойчивостью выработки путем изменения напряженно-деформированного состояния пород за счет их взрывной разгрузки. Предметом исследования были геомеханические параметры способа взрывной разгрузки, а задачей исследований - установление закономерностей распределения напряжений после взрывной разгрузки.

2. Сущность способа взрывной разгрузки пород

Одним из перспективных способов обеспечения устойчивости является взрывная разгрузка пород вокруг горной выработки или на части ее контура. Суть этого способа заключается в обеспечении устойчивости контура выработки за счет изменения ее формы.

Известно [1], что оптимальной формой выработки, при которой достигается наибольшая её устойчивость, является эллиптическая форма, что справедливо при выполнении следующего геометрического соотношения:

$$a/b = \lambda , \quad (1)$$

где a, b - горизонтальная и вертикальная полуоси выработки, м;

$\lambda = P_r/P_v$ - коэффициент бокового распора массива;

P_r, P_v - соответственно горизонтальная и вертикальная компоненты исходного поля напряжений массива горных пород.

В большинстве случаев $\lambda < 1$, поэтому выработки с позиции теоретических требований горной геомеханики необходимо проектировать высокими и узкими. Однако в соответствии с технологическим использованием необходимы выработки с шириной, значительно больше их высоты.

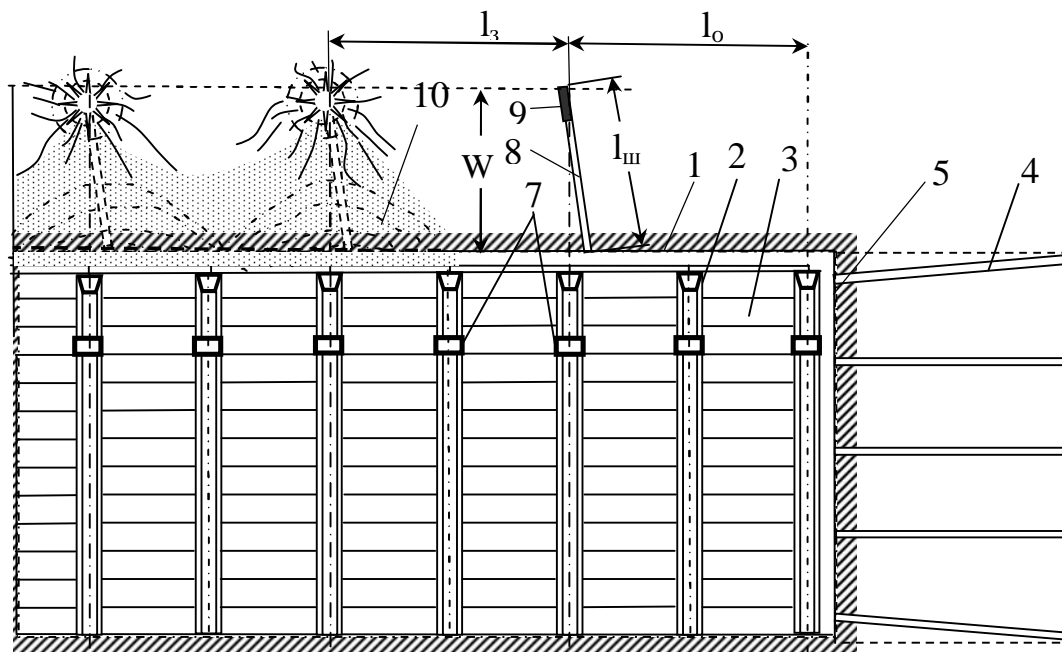
Для устранения этого технического противоречия на кафедре СГ и ГС ДонГТУ был предложен способ управления напряженно-деформированного состояния (НДС) массива вокруг выработки путем активной предварительной разгрузкой пород кровли (рис.1). Для этого над выработкой искусственно создают область разгрузки, отделенную трещинами от остального массива, путем взрывания камуфлетных зарядов взрывчатого вещества (ВВ) в разгрузочных шпурах, что формирует новый контур, более близкий к теоретическому (1). При этом одновременно обеспечивается взрывное заполнение породой закрепного пространства.

Важным преимуществом предложенного способа разгрузки пород является:

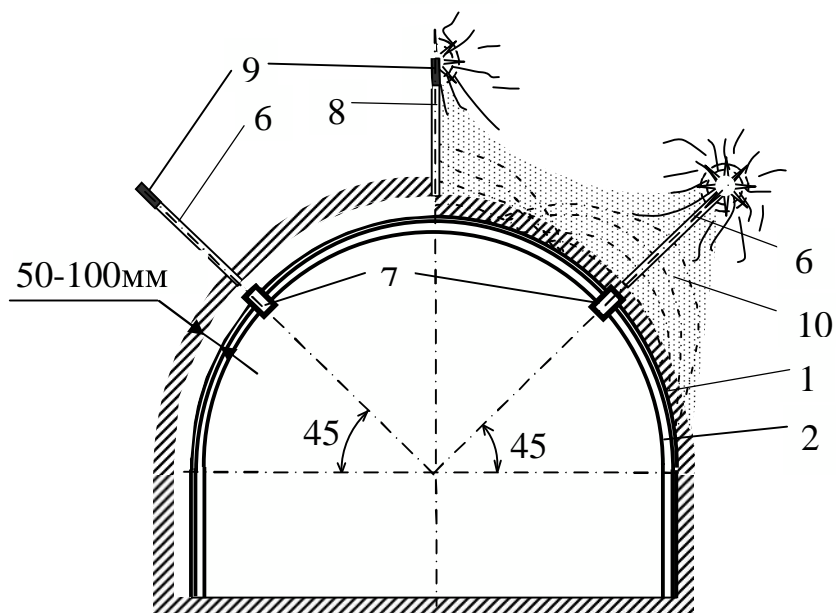
- повышение устойчивости выработки за счет изменения ее формы, приближенной к эллипсу;
- полное соблюдение требований по ее технологическому использованию;
- снижение напряженного состояния пород контура;
- повышение работоспособности рамной крепи в 1,5-2,5 раза за счет создания взрывной забутовки закрепного пространства.

Способ выполняют следующим образом [2]. При проведении выработки 1 после возведения рамного крепления 2 и установки затяж-

ки 3 по контуру, одновременно со шпурами 4 по забою 5 бурят в кровле два боковых разгрузочных шпура 6 в районе узлов податливости 7 рамного крепления 2 и третий разгрузочный шпур 8 по центру выработки на глубину $l_{ш}$ таким образом, чтобы заряды 9 ВВ в разгрузочных шпурах 6, 8 располагались в плоскости рамы крепления.



А)



Б)

Рисунок 1 - Способ взрывной разгрузки пород вокруг выработки

Разгрузочные шпуры 6, 8 заряжают камуфлетными зарядами 9 ВВ, после чего одновременно с взрыванием шпуров по забою взрывают сначала боковые 6, а затем с замедлением – центральный 8 камуфлетные заряды, создавая разгруженную зону в кровле выработки. Однако геомеханические параметры этого способа нуждаются в обосновании, чему и посвящено данное исследование.

3. Методика исследований и коэффициенты подобия

Для оценки эффективности способа взрывной разгрузки необходимо исследовать, как изменяется НДС пород вокруг выработки после взрывания разгрузочных шпуров в ее кровле. Разгруженная зона имеет сложную звездчатую форму, что доказано в результате исследований в работе [3], проведенных с использованием метода электрогидродинамических аналогий (ЭГДА) на электропроводной бумаге.

Дополнительной сложностью исследований является необходимость учета изменения свойств пород в зависимости от степени взрывной разгрузки. Поэтому использовать метод ЭГДА для воспроизведения зоны взрывной разгрузки не представляется возможным. Найденные методом ЭГДА границы зоны взрывной разгрузки в [3] здесь используются как граничные условия (отправные точки) для дальнейших исследований геомеханических параметров.

Для решения поставленной задачи наиболее удобным и в достаточной мере достоверным методом исследований является проведение численного эксперимента методом конечных элементов (МКЭ), поскольку аналитическое решение задачи весьма затруднено. Кроме того, неизбежные принятые идеализации в аналитическом решении малопримемлемы для отражения реального состояния выработки после взрывной разгрузки, поскольку ее форма имеет сложную конфигурацию, а свойства пород в зоне разгрузки существенно изменяются.

Наиболее предпочтительным методом исследования НДС пород при производстве взрывной разгрузки следует считать численное моделирование методом конечных элементов (МКЭ). В данной работе использован многофункциональный программный комплекс для расчета, исследования и проектирования конструкций различного назначения (программный комплекс ПК ЛИРА) [4].

Научной новизной использования МКЭ в данном исследовании можно считать учет изменения свойств пород в зоне их взрывной разгрузки. Поскольку в МКЭ свойства материала вводятся в виде упругих модулей, т.к. решается плоская упругая задача, то мы вынуждены учесть влияние взрывной разгрузки на упругие свойства материала (породы). В качестве базового показателя при численном моделировании разгрузки принимаем изменение модуля упругости материала E (модуль

Юнга). Эти изменения учтем с помощью коэффициента разгрузки, определяемого по формуле:

$$k_E = \frac{E_p}{E_0}, \quad (2)$$

где E_p, E_0 - модуль Юнга горных пород в зоне разгрузки и вне её, Па.

Кроме того, следует учесть изменение коэффициента Пуассона и плотности горных пород после взрывной разгрузки. Эти величины, как показали дальнейшие исследования, не столь значительно влияют на изменения НДС горных пород, и учитываются соответствующими коэффициентами, определяемыми по аналогичным формулам:

$$k_v = \frac{\nu_p}{\nu_0}; \quad k_\rho = \frac{\rho_p}{\rho_0}, \quad (3)$$

где $\nu_p, \nu_0, \rho_p, \rho_0$, - соответственно коэффициент Пуассона и плотность пород в зоне взрывной разгрузки и вне её.

При моделировании методом МКЭ соответствующие коэффициенты, показывающие изменение свойств горной породы в зоне разгрузки, изменялись в пределах:

$$0,01 \leq k_E \leq 1; \quad 1 \leq k_v \leq 2,5; \quad 0,93 \leq k_\rho \leq 1,$$

где значение коэффициента, равное 1 характеризует неразрушенный материал.

Как видно из приведенных данных, плотность пород при полной взрывной разгрузке изменяется незначительно, что взято из практики ведения работ по взрывной разгрузке. Из принятых в этом исследовании определений предложенные коэффициенты разгрузки являются коэффициентами подобия при моделировании НДС массива горных пород.

4 Параметры модели при моделировании методом МКЭ

Исследуем напряженное состояние массива горных пород вокруг типичной горной выработки, пройденной по алевролиту с упругими свойствами $E_0=20$ ГПа, $\nu_0=0,2$ и плотность пород $\rho_0=2,7$ т/м³. Высота выработки арочного сечения принята равной $2b=2,9$ м, ширина $2a=4$ м, радиус контура кровли $r_0=2$ м, что геометрически соответствует реальным типовым поперечным сечениям горных выработок.

Рассматривались случаи с различным исходным напряженным состоянием массива. Напряжения по вертикальному направлению условно принято равным 100 МПа, а коэффициент бокового распора массива для разных моделей принимался дискретно переменным $\lambda=0, 0,5, 1$, т.е. рассматривались предельные случаи нагружения массива – безраспорное ($\lambda=0$), гидростатическое ($\lambda=1$) и промежуточное ($\lambda=0,5$).

Общий вид модели приведен на рис. 2, где указаны основные ее

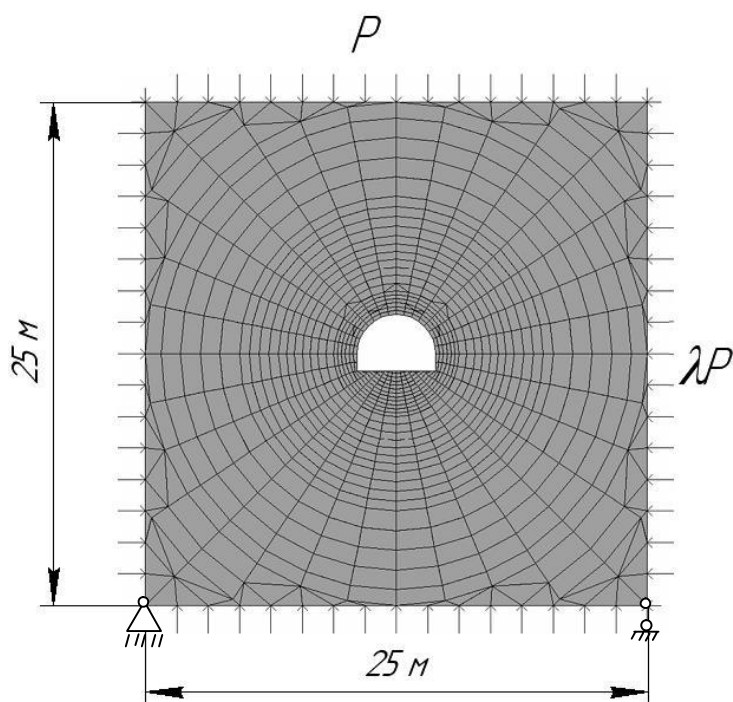


Рисунок 2 – Конечно-элементная модель горной выработки в массиве

размеры и разбиение на конечные элементы. Особо важным является выбор конечных размеров горного массива в модели, чтобы избежать влияния краевых эффектов. Для этого выработку поместили в массив с размерами, одинаковыми по высоте и ширине и равными 25 м. Это значит, что граница расположена на относительном расстоянии от выработки, более 6 радиусов. Поэтому, учитывая закономерности распределения напряжений в плоской задаче теории упругости, искажения напряжений из-за

влияния границ не будут превышать $\Delta = 1/6^2 \cdot 100\% < 3\%$, что вполне допустимо для задач такого типа.

В табл.1 даны сведения о числе решенных задач при проведении исследований и изменяемых параметрах модели. Как видно из таблицы, всего было рассмотрено 10 конечно-элементных моделей, для которых были выполнены расчеты НДС при разных коэффициентах бокового распора λ и разных степенях разгрузки k_E горных пород в кровле выработки. Для каждой степени разгрузки k_E принимали соответствующие механические свойства разгруженных пород – плотность ρ_p , модуль деформации E_p , коэффициент Пуассона ν_p .

Таблица 1 - Исходные данные для моделирования НДС в различных задачах методом МКЭ

№ модели	λ	Механические свойства разгруженных пород			
		k_E	E_p , ГПа	ν_p	ρ_p , т/м ³
1	1	1	20	0,2	2,7
1.1	1	0,2	4	0,3	2,6
1.2	1	0,05	1	0,4	2,5
1.3	1	0,01	0,2	0,5	2,4
2	0,5	1	20	0,2	2,7
2.1	0,5	0,2	4	0,3	2,6
2.2	0,5	0,05	1	0,4	2,5
3	0	1	20	0,2	2,7
3.1	0	0,2	4	0,3	2,6
3.2	0	0,05	1	0,4	2,5

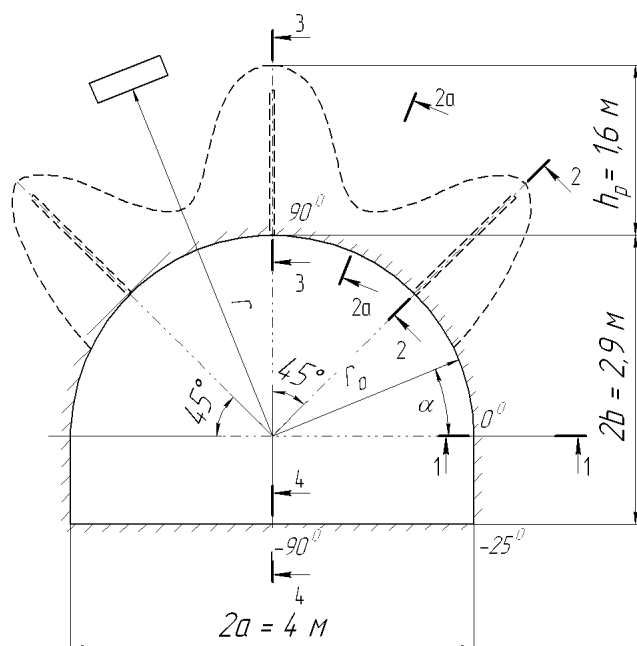


Рисунок 3 – Горная выработка с зоной разгруженных пород

После выполнения взрывных работ по разгрузке пород вокруг выработки формируется зона пониженных напряжений, в которой породы разбиты трещинами и взаимодействуют с окружающим массивом, сохранившим исходные механические свойства. Общий вид горной выработки с контуром разгруженной зоны показан на рис. 3. Здесь же указаны направления (1-1, 2-2 и др.), по кото-

рым изучалось НДС массива в окрестности выработки и значения текущего угла α на контуре выработки.

5. Закономерности изменения НДС в окрестности выработки при взрывной разгрузке пород

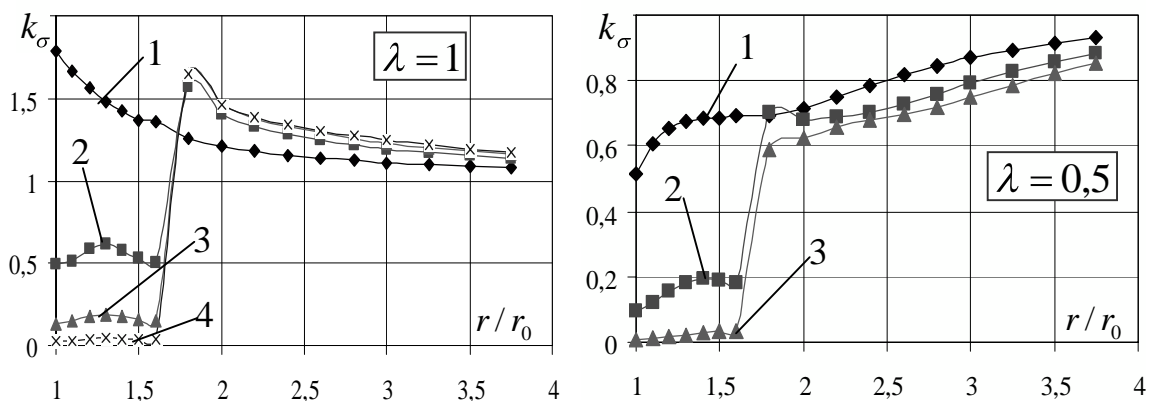
Обработку результатов расчетов НДС проводили с помощью программы Excel и представляли в виде графиков. С целью обобщения результатов на любые возможные случаи исходного напряженного состояния массива все напряжения были заменены их коэффициентом концентрации, который вычислялся по формуле:

$$k_{\sigma} = \frac{\sigma_k}{P}, \quad (5)$$

где σ_k - напряжения в зоне разгрузки и массиве горных пород, Па;

P – задаваемые напряжения на контуре модели, Па.

Рассмотрим графики изменения напряжений при взрывном разрушении пород. Графики рис. 4 дают представление об изменении концентрации k_{σ} тангенциальных напряжений в кровле по мере удаления в глубь массива на безразмерное расстояние в единицах радиуса выработки r/r_0 .



1 – $k_E=1$; 2 – $k_E=0,2$; 3 – $k_E=0,05$; 4 – $k_E=0,01$;

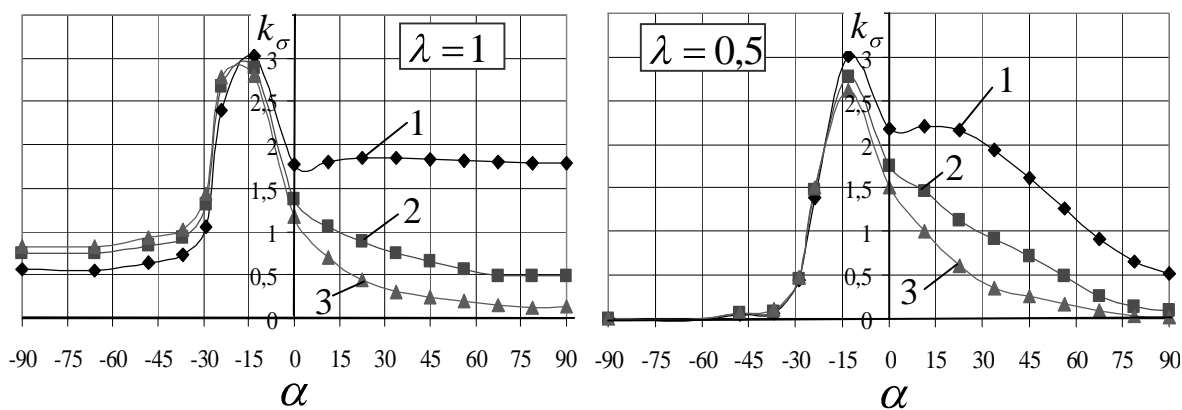
Рисунок 4 - Коэффициенты концентрации напряжений k_{σ} в кровле (по направлению 3-3 рис.3)

Сравнивая график исходного напряженного состояния с графиками коэффициента концентрации k_{σ} после разгрузки, можно сделать вывод, что наибольшее его снижение (в 3-5 раз) достигается уже при степени взрывной разгрузки пород, равной 0,2, поэтому не целесообразно стремиться к большей степени разгрузки (0,1 и менее). Это дает важный ориентир по назначению конечных пределов степени разгрузки (0,2-0,3) при выборе геомеханических параметров взрывных работ.

Концентрация напряжений k_σ резко уменьшается на контуре выработки и смещается вглубь массива на границу зоны взрывной разгрузки, где, по сути, уже является неопасной для устойчивости выработки.

Рассмотрим закономерности распределения напряжений по контуру горной выработки до и после взрывной разгрузки, представленные на рис. 5. Из этого распределения следует, что разгрузка происходит не только в области взрывания шпуров, но и на всем контуре выработки даже при разных коэффициентах бокового распора. По сравнению с исходной концентрацией, когда $k_E=1$ уже при $k_E=0,2$ на контуре выработки под углом $\alpha=45^\circ$ напряжения уменьшаются в 2-3 раза, а в боках при $\alpha=15^\circ$ снижение напряжений также весьма значительно (в 1,5-2 раза).

Такая особенность перераспределения напряжений свидетельствует о высокой эффективности управления устойчивостью выработки, которая увеличивается в разы, что позволяет обеспечить ее высокую эксплуатационную готовность без дорогостоящих ремонтов и перекреплений. В угловых точках контура ($\alpha=-25^\circ$) напряжения остаются неизменными и не играют существенной роли, поскольку приурочены к почве выработки.

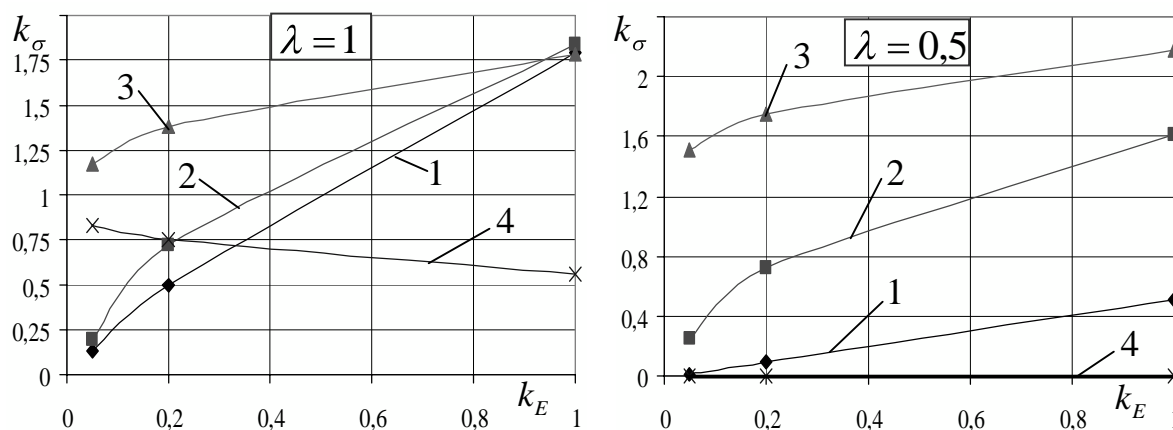


1 – $k_E=1$; 2 – $k_E=0,2$; 3 – $k_E=0,05$

Рисунок 5 - Изменение концентрации напряжений k_σ по углу $|\alpha| < 90^\circ$ на контуре выработки (см. рис.3)

Отметим, что в почве выработки ($-90^\circ < \alpha < -25^\circ$) наблюдается некоторое незначительное повышение напряжений (на 10-20%), что находится в пределах естественного их разброса при проведении выработки за счет качества её оконтуривания при ведении взрывных работ и вариации свойств пород.

Из графиков рис. 6, которые отражают зависимость k_σ от степени разгрузки k_E , видно, что вполне достаточно для производственных целей ограничиться разгрузкой пород в кровле $k_E=0,2$ для того, чтобы получить существенное повышение устойчивости горной выработки.



1 – кровля ($\alpha= 90^0$); 2 – кровля ($\alpha= 45^0$); 3 – бока ($\alpha = 15^0$); 4 – почва,
 Рисунок 6 – Изменение напряжений k_σ в различных точках контура выработки при изменении коэффициента разгрузки k_E

6. Выводы:

1. Метод управления устойчивостью горной выработки путем взрывной разгрузки пород кровли от напряжений позволяет значительно уменьшить их концентрацию не только в кровле, но и по всему контуру;
2. Для достижения существенного снижения концентрации напряжений на контуре можно ограничиться степенью разгрузки пород в пределах 0,2 -0,3 и не стремиться разрушить породы в кровле до полной потери их связности;
3. При взрывной разгрузке пород можно для большинства горно-геологических условий сооружения выработок обеспечить снижение напряжений в кровле в 3-5 раз и в боках в 2-3 раза;
4. Способ обеспечения устойчивости горных выработок взрывной разгрузкой пород в кровле обладает высокой эффективностью и позволяет существенно повысить устойчивость породных обнажений, что особенно актуально для ведения горных работ на больших глубинах при интенсивном проявлении горного давления.

Рассмотрена сущность нового метода управления устойчивостью горной выработки путем взрывной разгрузки пород кровли от напряжений. Методом конечных элементов изучены закономерности распределения напряжений при разгрузке. Даны рекомендации по определению геомеханических параметров взрывной разгрузки.

The essence of a new management method by stability of mine working by explosive unloading from pressure of a roof rocks is considered. Laws of distribution of stress-straine at unloading was investigated by the method of final elements. Recommendations about definition of geomechanical parametres of explosive unloading are given.

Библиографический список

1. Литвинский Г.Г., Гайко Г.И., Кулдыркаев Н.И. Стальные рамные крепи горных выработок. – Київ: Техніка, 1999. – С. 213.

2. Патент 29057 Україна, МПК⁸ E 21 D 11/00. Спосіб вибухового розвантаження порід навколо виробки / Литвинський Г.Г., Павлов Є.Є. ; заявник і патентовласник Донбас. держ. техн. ун-т. - № а200711987 ; заявл. 30.10.2007 ; опубл. 10.01.2008, Бюл. № 1. – 3 с.: іл.

3. Литвинский Г.Г., Павлов Е.Е. Моделирование параметров взрывной разгрузки пород в кровле выработки. Сб. научных трудов Совершенствование технологии стр-ва шахт и подземных сооружений – Донецк: Норд-Пресс, Вып. 12, 2006. – с. 107-108.

4. Программный комплекс ПК ЛИРА – Киев: НИИАСС. 1995-2002г.