

УДК 622.831.3

*к.т.н. Фесенко Э. В.*  
*(ЧНУ им. Ю. Федьковича, г. Черновцы, Украина),*  
*к.т.н. Павлов Е. Е.,*  
*студент Кушнирук И. В.*  
*(ДонГТУ, г. Лисичанск, Украина),*  
*студент Матвейчук И. А.*  
*(НТУУ «КПИ», г. Киев, Украина)*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВЗРЫВНОЙ РАЗГРУЗКИ ПОРОД В КРОВЛЕ ВЫРАБОТКИ ТРАПЕЦИЕВИДНОЙ ФОРМЫ

*Рассмотрена сущность способа управления устойчивостью горных выработок путем взрывной разгрузки пород кровли от напряжений. Методом конечных элементов изучены закономерности распределения напряжений при разгрузке. Даны рекомендации по определению геомеханических параметров взрывной разгрузки.*

**Ключевые слова:** *рамная крепь, трапециевидная крепь, несущая способность, напряженно-деформированное состояние, массив горных пород.*

### Введение

Применение рамной арочной крепи в горных выработках находящихся в разных горно-геологических условиях сопровождается частыми деформациями крепи. Не редко это обусловлено нерациональным использованием и выбором формы поперечного сечения выработки. Так, зачастую, в пластовых выработках с нижней подрывкой пород после завершения смещений пород выработка арочной формы поперечного сечения принимает вид прямоугольника. Соответственно, арочная рамная крепь в такой выработке работать полноценно не может. Однако, и трапециевидная крепь имеет свои недостатки, одним из которых следует считать несоответствие несущей способности верхняка, подверженного изгибу, и стоек, работающих, в основном, на сжатие. Даже до наступления режима податливости велика вероятность появления пластических шарниров в верхняке [1]. Недопустимые деформации верхняков заранее заложены в такие конструкции, что делает их малоэффективными и требует существенного изменения. Попытки усилить верхняк подкосами и промежуточными стойками значительно усложняют конструкцию, увеличивают ее

материалоемкость, сокращают полезную площадь сечения и ограничивают транспортные возможности выработки. Этим, до определенной степени, можно объяснить недостаточную распространенность экономически целесообразной трапециевидной формы выработок.

Одним из способов, повышающих несущую способность верхняка трапециевидной рамной крепи выработки, является рассматриваемый в статье способ взрывной разгрузки пород кровли (ВРПК).

Применение взрывной разгрузки в кровле выработки приводит к перераспределению нагрузки на верхняк крепи, так использование одного заряда взрывчатого вещества (ВВ), расположенного в массиве на осевой линии (по центру), приведёт к созданию параболической нагрузки, трёх зарядов – равномерно-распределённой, а при двух зарядах образуется нагрузка, близкая к треугольной, когда максимум приходится на стойки крепи, а минимум на центр верхняка [3].

---

© Фесенко Э. В., 2015

© Павлов Е. Е., 2015

© Кушнирук И. В., 2015

© Матвейчук И. А., 2015

Таким образом, за счёт перераспределения нагрузки на верхняк трапецевидной крепи и оптимального размещения зарядов ВВ можно повысить несущую способность рамной крепи.

Однако, не до конца изученными остались напряжённо-деформированное состояние массива горных пород вокруг трапецевидной выработки до и после взрывной разгрузки и геомеханические параметры способа ВРПК, к которым относятся глубина и степень разгрузки массива от напряжений.

**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 нагрузкой на рамную крепь горной 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.

**Сущность способа взрывной разгрузки пород**

Геомеханическая сущность предложенного способа взрывной разгрузки заключается в управлении устойчивостью горной выработки за счет целенаправленного изменения напряженного состояния и прочности пород вокруг выработки и более благоприятного перераспределения нагрузок на рамную крепь со стороны массива через разгруженную взрывом породную зону.

Взрывная разгрузка достигается путем взрыва двух (рис. 1) зарядов рыхления в кровле выработки [2]. В результате в породном массиве создают трещиноватую зону разгруженных от напряжений пород заданной формы, размеров и степенью трещиноватости. Разгруженные взрывом породы за счет образования трещин и уве-

личения объёма полностью заполняют пустоты закрепного пространства и обжимают крепь распорными усилиями со стороны массива. Рамная стальная крепь устойчиво фиксируется в окружающих породах и оказывается в наиболее благоприятных условиях эксплуатации при проявлениях горного давления.

Способ ВРПК (рис. 1) выполняют следующим образом [2].

При проведении выработки 1 после возведения рамной крепи 2 и монтажа затяжки 3 по контуру выработки бурят в кровле два разгрузочных шпура 4 на расстоянии между зарядом взрывчатки и вертикальной осью выработки  $b$  на глубину  $l_{ш}$  таким образом, чтобы заряды 5 ВВ в разгрузочных шпурах 4 располагались в плоскости рамы крепления и на продолжении линии стойки рамы. Разгрузочные шпуры 4 заряжают зарядами рыхления 5 и взрывают, создавая разгруженные зоны пород.

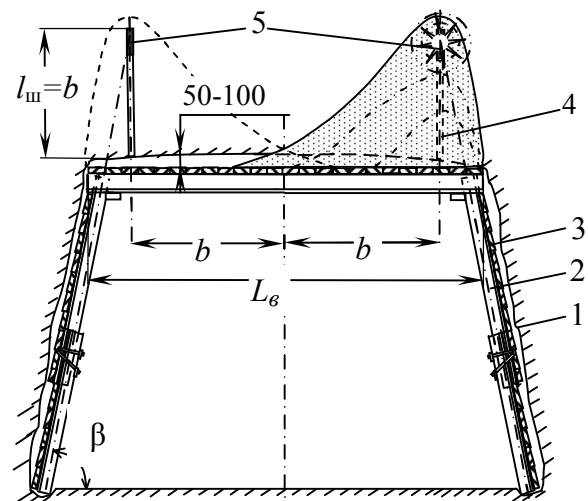


Рисунок 1 – Способ взрывной разгрузки пород вокруг выработки двумя зарядами ВВ

Для рационального управления нагрузкой и повышения работоспособности крепи, два разгрузочных шпура 4 бурят на расстоянии  $b$  между зарядом взрывчатки и вертикальной осью выработки, что позволяет создать предварительное регулирующее нагружение на раму за счет взрывного расширения пород в зоне взрывной раз-

грузки и при действии горного давления перенести нагрузку от кровли на стойки крепи.

За счет такого размещения разгрузочных зарядов обеспечивается наиболее эффективное неравномерное распределение нагрузки на верхняк рамной крепи, когда его максимум создают на стойках рамы, а минимум – на середине верхняка. Это значительно (в 1,5...3 раза) уменьшает максимум изгибающих моментов и тем самым в столько же раз повышает несущую возможность наиболее ответственного конструктивного элемента крепи – верхняка [3].

Ударная волна распространяется от центра заряда по окружности, поэтому для наибольшего восприятия ударной волны на стойки крепи, идеальным является расположение заряда ВВ на продолжении линии стойки рамной крепи, когда выполняется условие  $b=l_{ш}$ .

Если расстояние  $b$  между зарядом взрывчатки и вертикальной осью выработки будет больше  $l_{ш}$ , тогда ударная волна и нагрузка перераспределится на стойку крепи по бокам выработки, а если меньше, то ударная волна и нагрузка перераспределится ближе к центру верхняка крепи.

Если невозможно расположить разгрузочные шпуров на продолжении оси стойки рамы, то их размещение должно отвечать уравнению (1), поскольку при этом достигается нагрузка на верхняк крепи с максимумом на стойках и с минимумом нагрузки в центре, т.е. нагружение на верхняк происходит по закону треугольника [2].

$$\frac{L_b}{4} \leq l_{ш} = b \leq \frac{L_b \cdot \operatorname{tg}\beta}{2(1 + \operatorname{tg}\beta)}, \quad (1)$$

где  $L_b$  – длина верхняка рамной крепи;  $b$  – расстояние от вертикальной оси выработки к заряду;  $\beta$  – угол наклона стойки рамной крепи к горизонту;  $l_{ш}$  – глубина шпура.

При бурении больше (три и больше) или меньше (один посередине) двух разгрузочных шпуров в кровле выработки,

образуются соответственно равномерно-распределённая и параболическая нагрузки, увеличивая при этом пик изгибающего момента в центре верхняка крепи, уменьшая его несущую способность в 1,5...3 раза.

**Методика исследований и параметры модели.** 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 форму, что доказано в результате исследований в работе [4], 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 [4] 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) с помощью программного комплекса ПК ЛИРА [5], поскольку аналитическое решение задачи весьма затруднено.

Исследуем напряженное состояние массива горных пород вокруг типичной горной выработки, пройденной по алевролиту с упругими свойствами  $E_0=20$  ГПа,  $\nu_0=0,3$  и плотность пород  $\rho_0=2,7$  т/м<sup>3</sup>. Высота выработки трапециевидного сечения принята равной  $h=3,0$  м, ширина по почве  $L_n=4,5$  м, что геометрически соответствует реальным типовым поперечным сечениям горных выработок.

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.

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 ( $\lambda=0,5$ ).

Схема модели при моделировании методом конечных элементов приведена на рисунке 2, где указаны основные ее размеры, разбиение на конечные элементы и показаны изополя тангенциальных напряжений до взрывной разгрузки. Размеры модели принимались таким образом, 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 достаточном расстоянии от контура выработки, в 6 раз и более ширины  $L_n$  или высоты  $h$  выработки. Поэтому, учитывая закономерности распределения напряжений в плоской задаче теории упругости, искажения напряжений из-за влияния границ не будут превышать

$\Delta=1/L_n^2=1/6^2*100\%<3\%$ , что вполне допустимо для задач такого типа.

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 половины горной выработки с исследуемыми точками по её контуру показан на рисунке 3.

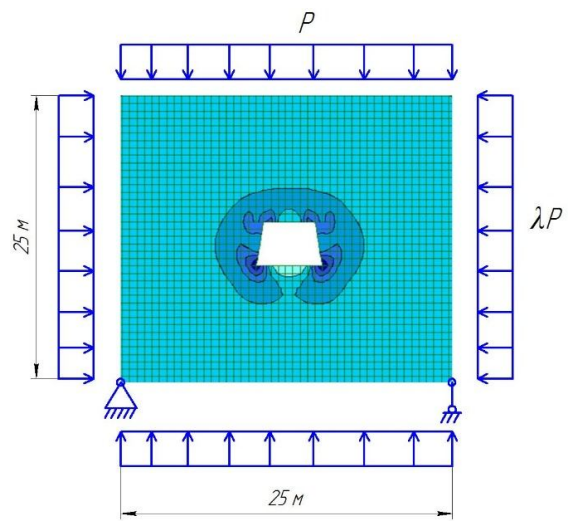


Рисунок 2 – Конечно-элементная модель горной выработки в массиве

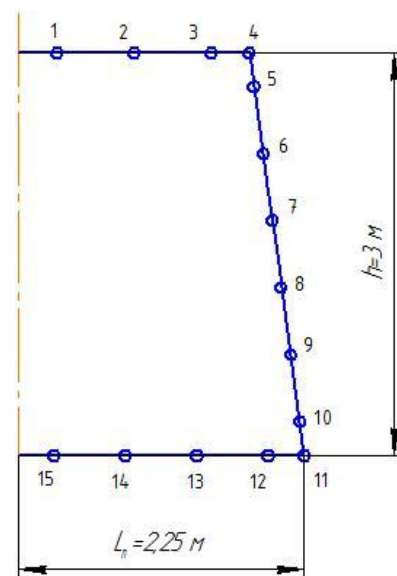


Рисунок 3 – Схема контура выработки

### Закономерности изменения НДС в окрестности выработки при взрывной разгрузке пород

С целью обобщения результатов на любые возможные случаи исходного напряженного состояния массива все напряжения были заменены их коэффициентом концентрации, который вычислялся по формуле:

$$k_{\sigma} = \frac{\sigma_k}{P}, \quad (3)$$

где  $\sigma_k$  – напряжения в зоне разгрузки и массиве горных пород, Па;  $P$  – задаваемые напряжения на контуре модели, Па.

Представленные графики (рис. 4) дают представление об изменении концентрации тангенциальных напряжений (по вертикальной оси) по контуру трапецевидной выработки, где по горизонтальной оси представлены номера точек, соответствующие точкам, показанным на рисунке 3.

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.

Так, в кровле выработки (точки 1-4) при  $\lambda = 0$  (рис. 4 а) напряжения уменьшаются от 2 до 7 раз, при  $\lambda = 0,5$  (рис. 4 б) напряжения уменьшаются от 1,5 до 4 раз, а при  $\lambda = 1$  (рис. 4 в) напряжения уменьшаются от 2,5 до 8 раз.

В боках выработки (точки 5-10) при  $\lambda = 0$  (рис. 4 а) и при  $\lambda = 0,5$  (рис. 4 б) напряжения уменьшаются примерно одинаково от 10 до 20%, а при  $\lambda = 1$  (рис. 4 в) напряжения уменьшаются от 10 до 50%.

Из выше сказанного можно отметить, что по сравнению с исходной концентрацией, уже при  $k_E = 0,25$  на контуре выработки в кровле напряжения уменьшаются в 3-5 раз, а в боках снижение напряжений находится в пределах 10-50%.

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 (точка 11) напряжения остаются неизменными и не играют существенной роли, поскольку приурочены к почве выработки.

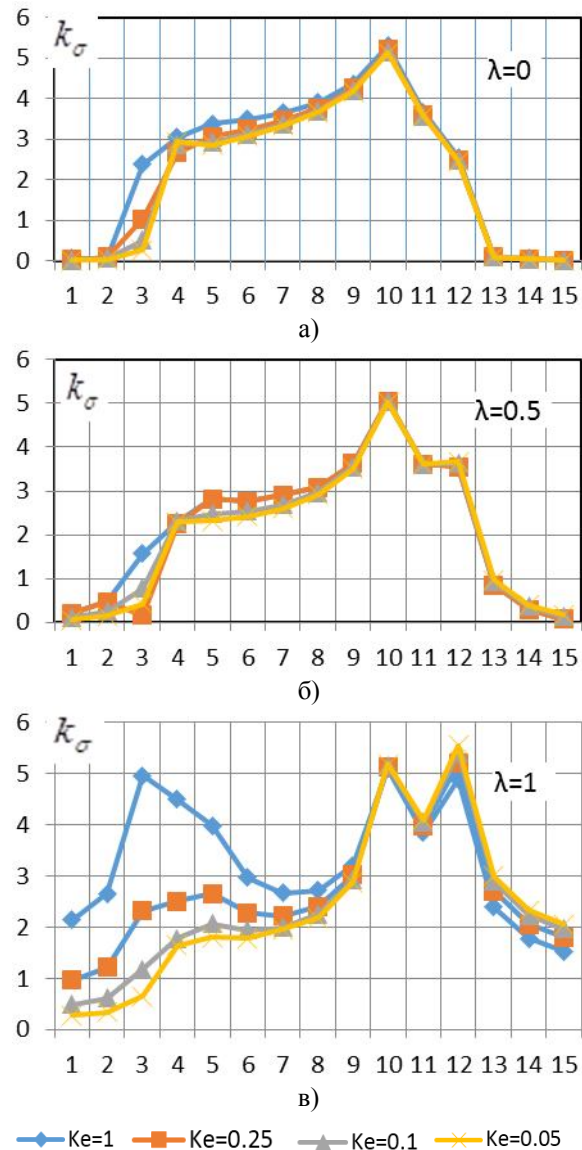


Рисунок 4 – Изменение коэффициентов концентрации напряжений  $k_{\sigma}$  по контуру горной выработки

Отметим, что в почве выработки при  $\lambda = 1$  (точки 12-15) наблюдается некоторое незначительное повышение напряжений (на 10-20%), что находится в пределах ес-

тественного их разброса при проведении выработки за счет качества её оконтуривания при ведении взрывных работ и вариации свойств пород.

#### **Выводы:**

1. Способ 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 ус-

ловий сооружения выработок обеспечить снижение напряжений в кровле в 3-5 раз и в боках в 1,5-2 раза.

4. Лучших результатов способ ВРПК достигает при гидростатическом нагружении массива ( $\lambda = 1$ ). В этом случае можно обеспечить снижение напряжений в кровле в 2,5-8 раз.

Способ обеспечения устойчивости горных выработок взрывной разгрузкой пород в кровле обладает высокой эффективностью и позволяет существенно повысить несущую способность верхняка трапециевидной крепи за счёт рационального перераспределения нагрузки, когда максимум смещается на стойки крепи а минимум приходится на центр.

#### **Библиографический список**

1. Литвинский Г. Г. Стальные рамные крепи горных выработок / Г. Г. Литвинский, Г. И. Гайко, Н. И. Кулдыркаев. – Київ: Техніка, 1999. – 213 с.
2. Пат. 48196 Україна, МПК (200 9) E21D 11/00. Спосіб керування навантаженням на рамне кріплення гірничої виробки / Литвинський Г. Г., Павлов Є. Є.; заявник та патентовласник Донбас. держ. техн. ун-т. - № u200909413; заявл. 14.09.2009; опубл. 10.03.2010, Бюл. № 5.
3. Литвинский Г. Г. Повышение работоспособности рамной крепи путём взрывной разгрузки пород / Г. Г. Литвинский, Е. Е. Павлов // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – Алчевск: ДонГТУ, 2009. – Вып. 29. – С. 12–20.
4. Павлов Е. Е. Моделирование параметров взрывной разгрузки пород в кровле выработки / Е. Е. Павлов, Г. Г. Литвинский // Совершенствование технологии строительства шахт и подземных сооружений: материалы международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, организованной кафедрой «Строительство шахт и подземных сооружений» ДонНТУ. – Донецк: Норд-Пресс, 2008. – Вып. 14. – С. 107–108.
5. Программный комплекс ПК ЛИРА. – Киев: НИИАСС.

*Рекомендована к печати д.т.н., проф. ДонГТУ Бабиюком Г. В., д.т.н., проф. НТУУ «КПИ» Ремез Н. С.*

*Статья поступила в редакцию 05.06.15.*

**к.т.н. Фесенко Е. В.** (ЧНУ ім. Ю. Федьковича, м. Чернівці, Україна), **к.т.н. Павлов Є. Є., студент Кушнірук І. В.** (ДонДТУ, м. Лисичанськ, Україна), **студент Матвійчук І. О.** (НТУУ «КПИ», м. Київ, Україна)

#### **ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕОМЕХАНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВИБУХОВОГО РОЗВАНТАЖЕННЯ ПОРІД В ПОКРІВЛІ ВИРОБКИ ТРАПЕЦІЄВИДНОЇ ФОРМИ**

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

**Ключові слова:** рамне кріплення, трапецієвидне кріплення, несуча спроможність, напружено-деформований стан, масив гірських порід.

**PhD Fesenko E. V.** (ChNU after Yu. Fed'kovych, Chernovtsy, Ukraine), **PhD Pavlov Ye. Ye,** student **Kushniruk I. V.** (DonSTU, Lisichansk, Ukraine), student **Matviychuk I. A.** (KPI, Kyiv, Ukraine)

**STUDYING GEOMECHANICAL PARAMETERS OF ROCKS BLAST DISTRESSING IN THE ROOF OF TRAPEZOIDAL HEADING**

*A subject-matter of the stability control method for mine headings using blast distressing in the roof of headings was studied. Using finite elements method we examined regularities of stress distribution at distressing. Recommendations on determining geomechanical parameters of blast distressing were given.*

**Key words:** framed support, trapezoidal support, bearing strength, strain-and-stressed state, rock massif.