

# РОЗРОБКА РОДОВИЩ КОРИСНИХ КОПАЛИН

УДК [622.233:622.235]:622.831.312

К.С. Ищенко, канд. техн. наук, ст. научн. сотр.

Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова  
НАН Украины, г. Днепропетровск, Украина,  
e-mail: ishenko\_k@i.ua

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МАССИВЕ ДОБЫЧНОГО БЛОКА КРУТОПАДАЮЩЕЙ РУДНОЙ ЗАЛЕЖИ

K.S. Ishchenko, Cand. Sci. (Tech.), Senior Research  
Fellow

N.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics of National  
Academy of Science of Ukraine, Dnipropetrovsk, Ukraine,  
e-mail: ishenko\_k@i.ua

## SIMULATION OF THE GEOMECHANICAL PROCESSES IN THE BLOCK OF THE ROCK MASSIF CONTAINING STEEP ORE DEPOSIT EXCAVATION

**Цель.** Исследование характера и численное решение распределения поля напряжений массива, сформированного вокруг камеры добычного блока при статическом и динамическом нагружении.

**Методика.** Проведено несколько серий экспериментальных исследований в лабораторных условиях по изучению характера распределения поля напряжений вокруг добычного блока на моделях с использованием метода фотоупругости и разработанного стенда, а также численное моделирование напряженно-деформированного состояния (НДС) массива в добычном блоке крутопадающей рудной залежи методом конечных элементов (МКЭ), механики сплошных сред, изучено влияние напряженного состояния модели на характер ее разрушения взрывом.

**Результаты.** Представлены результаты экспериментального и теоретического исследования НДС массива по трем схемам предложенной модели добычного блока в упругопластической постановке с использованием МКЭ. Установлено, что в массивах горных пород крутопадающей рудной залежи при различных углах падения пласта полезного ископаемого на глубоких горизонтах рекомендуется закладывать буровые выработки ближе к центральной части камеры по оси ее в границах с одной стороны камеры, а с другой – в зоне повышенных напряжений или в зонах перераспределения напряжений.

**Научная новизна.** Установление характера, закономерностей распределения и численных значений полей напряжений вокруг камеры добычного блока крутопадающей рудной залежи до ведения буровзрывных работ позволит обоснованно подходить к корректировке параметров буровзрывных работ, месту заложения скважин и условию их бурения, что ведет к повышению эффективности работы скважинных зарядов взрывчатых веществ (ВВ) по отбойке полезного ископаемого.

**Практическая значимость.** В процессе отбойки горных пород в добычном блоке крутопадающей рудной залежи повышается эффективность работы скважинных зарядов по отбойке полезного ископаемого, снижается удельный расход ВВ и средств взрывания (СВ), разубоживание полезного ископаемого и улучшаются показатели работы погрузочных и транспортных средств.

**Ключевые слова:** *напряженное состояние, добычной блок, камера, буровзрывной способ отбойки, метод фотоупругости, численное моделирование*

**Введение.** Несмотря на создание новых технологий разрушения, основанных на нетрадиционных подходах (терморазрушение, воздействие потоками частиц высокой энергии и т. п.), взрыв остается эффективным способом при широком применении ресурсовосберегающих и экологически безопасных методов подготовки горной массы на рудниках,

которые основываются на глубоком изучении особенностей механизма разрушения полиминеральных сред во взаимосвязи с газодинамическими явлениями при взрыве. Один из путей совершенствования взрывной технологии – использование геомеханических характеристик массива, в частности напряженно-деформированного состояния, физико-механических свойств пород, хрупкости пород, которая зависит от структуры, минералогического состава и ориентировки кристаллов, а также

от размеров и формы разрушаемых тел, вида напряжений и скорости деформирования [1–2].

Исследования влияния предварительного нагружения сплошной среды на характер ее последующего динамического разрушения приобретают в горном деле все большую актуальность в связи с переходом на многих месторождениях очистных работ на глубины, где уже нельзя не принимать во внимание исходное напряженное состояние массива горных пород.

Измерения исходного поля напряжений массива горных пород в различных регионах на разных глубинах показали, что все компоненты тензора напряжений являются сжимающими. Значение вертикальной компоненты близко к величине  $\gamma H$ , где  $H$  – расстояние от земной поверхности, а  $\gamma$  – объемный вес вышележащих пород. Главные же горизонтальные составляющие напряжения можно представить как  $\alpha\gamma H$ , причем коэффициент  $\alpha$ , называемый коэффициентом бокового отпора, больше нуля и определяется из выражения

$$\alpha = \frac{\mu}{1 - \mu},$$

где  $\mu$  – коэффициент Пуассона, равный для разных пород 0,25÷0,35.

В случае  $\alpha = 1$  давление в массиве будет подчиняться гидростатическому закону, т. е. горизонтальная составляющая давления будет равна вертикальной, то при увеличении глубины залегания пород и вертикальной нагрузки коэффициент Пуассона возрастает, а при его значении  $\mu = 0,5$  они переходят в пластическое состояние.

На рудных месторождениях, где в основном применяются взрывные работы,  $\alpha > 1$ , что обусловлено действием в этих регионах тектонических сил.

Отсюда следует, что увеличение запасов упругой энергии массива происходит за счет роста уровня сжимающих напряжений. Ведение проходческих и очистных работ приводит к значительному перераспределению исходного поля напряжений, однако, преобладающим механическим состоянием массива является состояние объемного сжатия. В этих условиях достижение качества разрушения горных пород при росте глубины разработки поддерживается путем увеличения энергетических затрат, т. е. увеличением массы используемых взрывчатых веществ (ВВ) [3].

Особенно негативно сказывается понижение уровня ведения очистных работ на условии разработки железорудных и урановых месторождений Украины, где применяются камерные системы разработки поэтажными ортами и штреками с поочередной выемкой блоков и заполнением выработанного пространства твердеющей закладкой.

Одним из перспективных путей преодоления сложившейся ситуации является учет при разработке технологий освоения месторождений основных закономерностей разрушения предварительно

напряженной сплошной среды. В этой связи большое значение имеет тот факт, что в условиях всестороннего сжатия породного объема увеличение значений напряжений ухудшает качество разрушения массива, а при определенном их уровне трещиноватости после взрыва может полностью отсутствовать. Наличие же в сплошной среде растягивающих напряжений, напротив, улучшает степень разрушения горных пород, приводит к меньшему расходу взрывчатых веществ. Таким образом, для разработки эффективных методов отбойки и последующей выемки рудных месторождений на больших глубинах приобретают большое значение исследования собственного поля напряжений массива в рудном блоке вокруг добычной камеры для определения максимально возможных зон действия растягивающих напряжений, влияющих на рудоподготовку крутопадающей рудной залежи, представляет особый интерес.

**Цель работы** – исследование характера и численное решение задачи распределения поля напряжений массива, сформировавшегося вокруг добычной камеры крутопадающей рудной залежи до ведения взрывных работ и от взрыва одиночного заряда ВВ.

Методикой исследований предусматривалось проведение трех этапов работ:

1. Экспериментальные исследования формирования поля напряжений вокруг добычной камеры рудного блока на моделях.

2. Имитационное моделирование напряженного состояния массива горных пород вокруг добычной камеры с использованием метода конечных элементов.

3. Экспериментальные исследования совместного влияния статических и динамических нагрузок на разрушение твердых сред взрывом на моделях.

#### **Изложение основного материала.**

**1. Экспериментальные исследования формирования поля напряжений вокруг добычной камеры на моделях.** Для изучения формирования поля напряжений вокруг добычной камеры в массиве горных пород использовался метод фотоупругости или оптико-поляризационный метод. Метод является основой физического моделирования геомеханических процессов в массиве горных пород при разрушении их статическими и динамическими нагрузками, который обосновали в своих работах Ванягин И.Ф. и Боровиков В.А. В основе этого метода лежит способность некоторых прозрачных материалов под воздействием возникающих в них напряжений временно приобретать свойства двойного лучепреломления поляризованного света. К числу оптически активных материалов можно отнести как листовое, так и объемное органическое стекло (полиметилметакрилат) со стабильными прочностными, механическими и оптическими константами. В нашем случае для изготовления моделей применялось листовое органическое стекло постоянной толщины 0,015 м. С помощью ленточной или дисковой пилы в лаборатории вырезали модели размером 0,2х0,15 м, а лобзиком – элементы камеры в виде прямоугольника с геометрическими параметрами: шириной – 0,05 м и длиной – 0,1 м с соблюдением геометрического и силового подобия. На подго-

товленных зеркальных поверхностях модели, для удобства при изучении характера и обработки результатов формирования поля напряжений, фломастером наносили квадратную сетку с шагом 0,002 м.

Методикой экспериментальных исследований предусматривалось три серии экспериментов с выбранными схемами модели горного массива с камерой под углом наклона к горизонтальной плоскости,

равной 90, 85 и 75°. Экспериментальные исследования проводились в лабораторных условиях ИГТМ НАН Украины с использованием разработанного способа имитации напряженно-деформированного состояния массива горных пород на моделях с добычной камерой и стенда для его реализации, приоритет которого защищен патентом Украины [4]. Схема и оборудование стенда представлены на рис. 1.

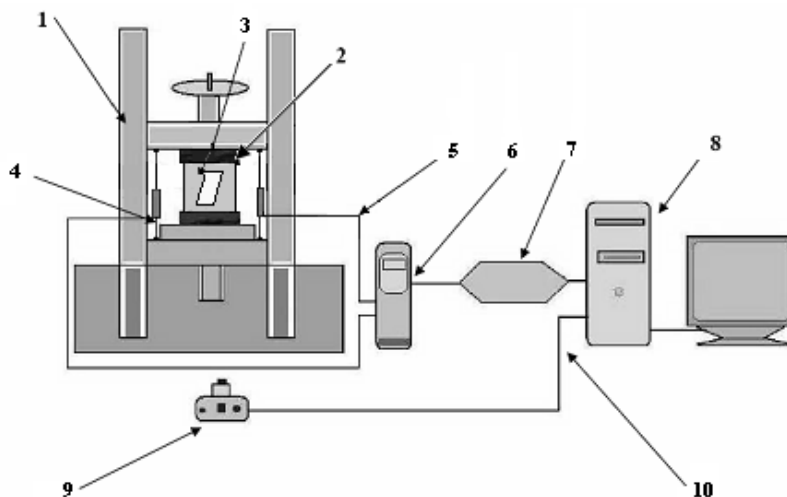


Рис. 1. Схема стенда для имитации НДС массива: 1 – пресс гидравлический; 2 – прижимные плиты пресса; 3 – модель; 4 – бесконтактные магнитные датчики (БМД); 5 – соединительный кабель; 6 – аналого-цифровой преобразователь (АЦП); 7 – интерфейс RS-232; 8 – системный блок ПК; 9 – цифровая фотокамера; 10 – USB порт

Перед проведением экспериментальных исследований опробования подготовленного оборудования проверяют согласованность систем стенда и проводят его тарировку. Затем между прижимными плитами пресса устанавливают подготовленную к экспериментальным исследованиям плоскую модель, согласно выбранным схемам, и пригружают ее. На горизонтальной поверхности, соответствующей высоте нижней плиты пресса, устанавливают по центру оптической линии с одной стороны источник света, поляризатор, а с другой – анализатор и фотокамеру. А поскольку оптически активный материал в напряженном состоянии анизотропен и с разной скоростью пропускает световые волны во взаимно перпендикулярных направлениях, то образуется так называемая разность хода двух упомянутых лучей и на экране анализатора появляется ряд полос – изохром, окрашенных в различные цвета разной интенсивности. По окраске этих полос судят о напряженном состоянии модели, поскольку каждая изохрома соответствует определенному уровню разности максимальной и минимальной компонент главных напряжений ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ). Изучение распределения полей напряжений проводилось в процессе изменения нагрузки на модель с фиксированным шагом через каждые 2,5 МПа нагружения, результаты которых приведены на рис. 2.

В ходе исследований установлено, что основная концентрация и форма распределения напряжений начинает формироваться в углах камеры как в ви-

сячем, так и в лежачем боку. От действия статической сжимающей нагрузки, равной 2,5 МПа, в модели впереди камеры по оси ее появилось поле светлых тонов с границей, которая предшествует появлению изохром первого порядка (рис. 2, б, в). С увеличением нагрузки до 5,0–10,0 МПа, рис. 2, б, в, увеличивается площадь участка, ограниченная изохромой первого порядка с одной стороны и стенкой камеры с другой. При этом, при нагрузке 10,0–17,5 МПа, картина распределения напряжений резко меняется. Так в моделях с углом наклона камеры 85 и 75° по оси ее происходит перераспределение напряжений как в лежачем, так и в висячем боку камеры с последующим перемещением к днищу камеры. В углах камеры – в кровле и днище ее, появились концентрические изохромы высоких порядков, соответствующие большим напряжениям, которые характерны для всех типов моделей, только отличаются площадью, ограниченной изохромой.

**2. Имитационное моделирование напряженного состояния массива горных пород вокруг добычной камеры с использованием метода конечных элементов.** Для подтверждения результатов экспериментальных исследований решим задачу определения напряженного состояния пород вокруг камеры в упругопластической постановке с помощью метода конечных элементов. Воспользуемся методом конечных элементов (МКЭ) в форме метода перемещений. Алгоритм решения задачи предполагает следующую последовательность проведения расчета по МКЭ:

- разбиение тела на конечные элементы и назначение узлов, в которых определяются перемещения;
- построение матрицы жесткости и векторов нагрузки конечных элементов;
- составление системы алгебраических уравнений и решение их;
- определение по найденным перемещениям напряженно-деформированного состояния тела.

Рассмотрим следующие схемы массива горных пород с камерой с углом наклона ее к горизонтальной плоскости, равной: а – 90°; б – 85°; в – 75°. Для оценки напряженного состояния будем использовать параметр, характеризующий степень разнокомпонентности поля напряжений  $Q = (\sigma_1 - \sigma_3)/\gamma H$ , где  $\sigma_1$ ,  $\sigma_3$  – максимальная и минимальная компоненты тензора главных напряжений;  $\gamma$  – усредненная плотность вышележащих горных пород;  $H$  – глубина разработки.

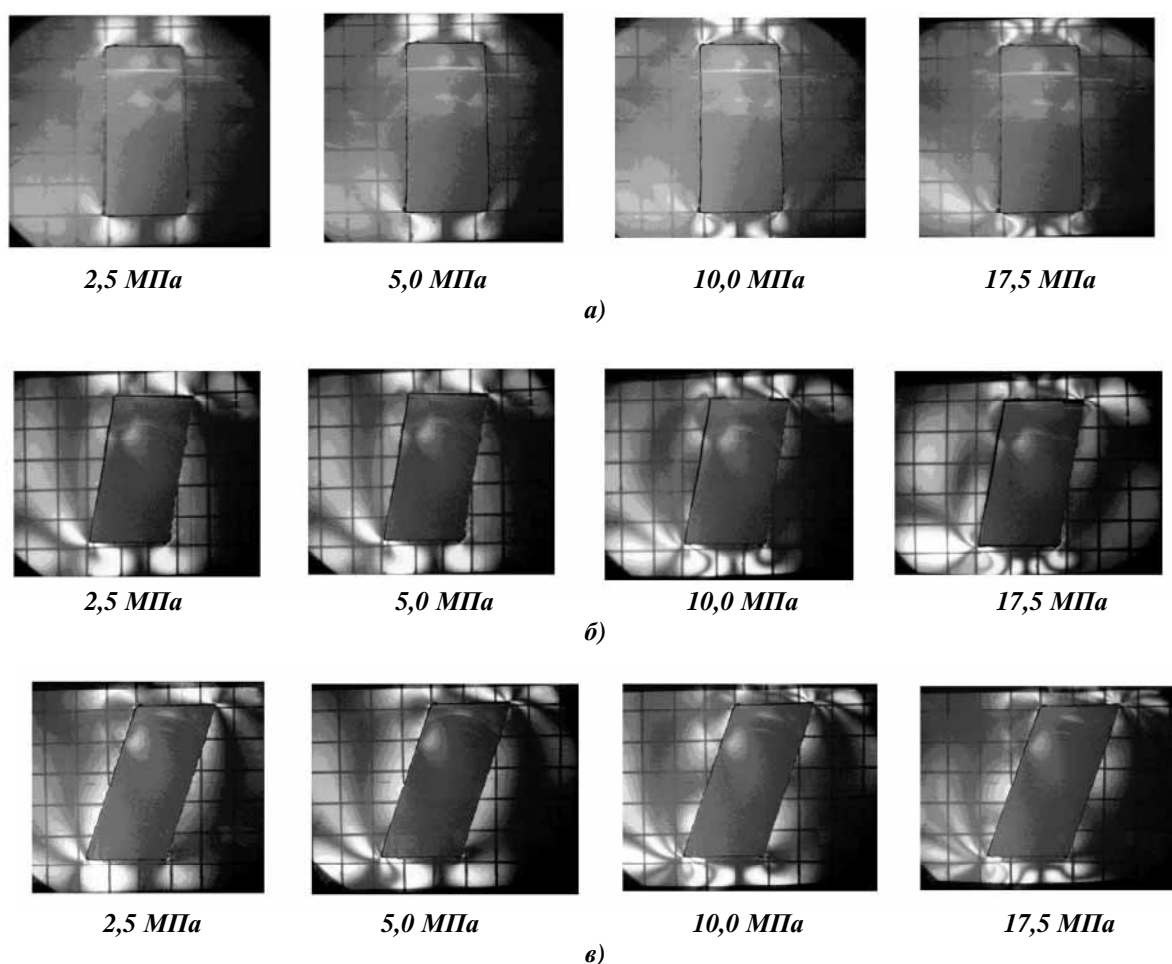


Рис. 2. Характер распределения поля напряжений в зависимости от прикладываемой нагрузки в модели с камерой прямоугольной формы, направленной под углом к горизонтальной плоскости, равной: а – 90°; б – 85°; в – 75°

На рис. 3 показаны распределения значений параметра  $Q$  для рассматриваемых моделей при максимальной нагрузке.

Рассмотрим распределение напряжений вокруг камеры при угле наклона ее к горизонтальной плоскости, равной 90°. На рис. 3, а видно, что зона повышенной разнокомпонентности формируется на поверхности кровли, дна камеры и в углах ее ( $0,8 < Q < 1,2$ ).

В случае, когда камера имеет угол наклона, равный 85°, зона в центральной части по оси камеры, как в лежачем, так и в висячем боку, наиболее разгружена ( $Q = 0,4-0,8$ ), рис. 3, б, но ограничена с одной стороны стенками камеры, а с другой – границей

повышенных напряжений ( $Q = 0,8-1,2$ ). При формировании камеры в рудном блоке с углом наклона, равном 75°, концентрация главных напряжений аналогична, что и для камер с углом наклона 90 и 85° – на поверхности кровли и дна камеры. Наиболее разгружена зона для модели массива с углом наклона камеры 75° по оси ее ( $Q = 0,4-0,8$ ) с последующим перераспределением напряжений при увеличении нагрузки со смещением ее к дну и в кровлю камеры с увеличением ее площади. На рис. 4 приведено распределение значений параметра  $Q$ , проходящего через центр камеры вдоль ее оси в модели добычного блока крутопадающей рудной залежи.

3. Экспериментальные исследования совместного влияния статических и динамических нагрузок на

**разрушение твердых сред взрывом на моделях.** Для изучения совместного влияния статических и динамических нагрузок на характер разрушения моделей разработана методика, суть которой заключается в следующем.

В качестве материала для исследований было выбрано органическое стекло толщиной 30 или 40 мм. Из листового органического стекла изготавливались модели с размерами: длиной – 180 мм и шириной 150 мм. Для имитации массива горных пород с добычной камерой, с протяженным сводом обрушения внутри модели, вырезалась полость в виде паралле-

лограмма со стороной 40 и 80 мм под углом наклона к горизонтальной плоскости, равным 75°. Нагружение моделей проводилось на гидравлическом прессе ПСУ-125 с фиксированием статической нагрузки динамометром, установленным между прижимными плитами преса и моделью. Динамическое нагружение осуществлялось микрочарядами тена, массой 80 мг, формируемыми в различных приконтактных зонах с полостью (камерой) в „модели горного массива“. Инициировали заряды ВВ нихромовым мостиком с навеской азида свинца. Экспериментальные исследования проводились во взрывной камере ГП „НИГРИ“.

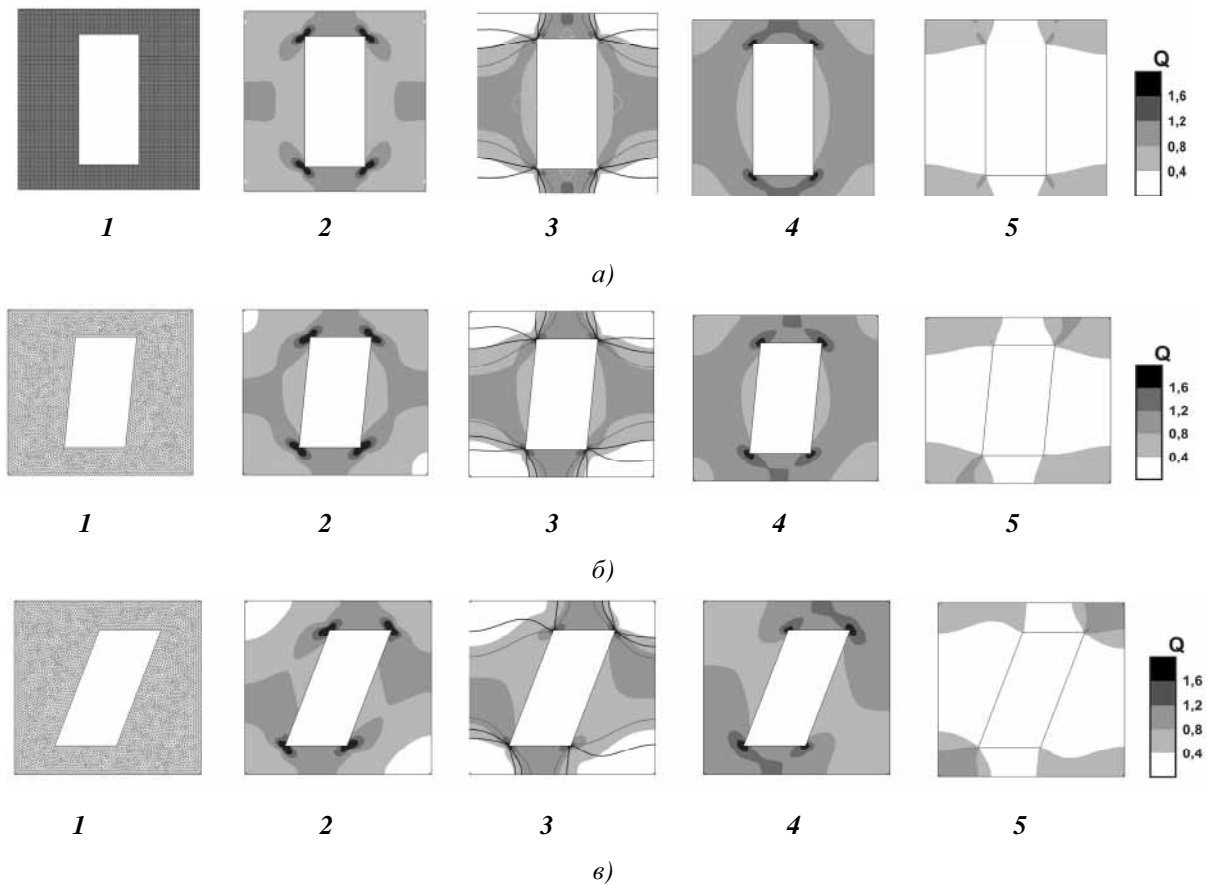


Рис. 3. Распределение значений параметра  $Q$  для моделей горного массива с камерой при углах наклона ее к горизонтальной плоскости: а – 90°; б – 85°; в – 75°; 1 – конечно-элементная сетка; 2 – интенсивность напряжений; 3 – разность главных напряжений и минимальное; 4 –  $\sigma_{mas}$  – максимальные главные напряжения; 5 –  $\sigma_{min}$  – минимальные главные напряжения

Методикой экспериментальных исследований предусматривалось проведение нескольких серий экспериментов:

- изучение формирования статического поля напряжений вокруг добычной камеры с протяженным сводом обрушения;
- взрывание заряда ВВ в центральной части добычной камеры с протяженным сводом обрушения, в зоне повышенных напряжений при нагруженной и ненагруженной модели;
- взрывание заряда ВВ в приконтурной зоне, в висячем и лежащем боках добычной камеры нагруженной и ненагруженной модели.

По результатам выполненных исследований планируется провести анализ, дать оценку качественной и количественной картины взаимодействия статических и динамических полей напряжений в моделях, сформулировать выводы о характере взаимодействия статических нагрузок, действующих на отбиваемый объем полезного ископаемого, междукамерные целики, потолочины, с динамическими нагрузками, возникающими при проведении взрывных работ в очистных и подготовительных выработках, получить их ожидаемые численные значения.

Для реализации запланированных исследований и получения полной информации по результатам их про-

ведения нами использован апробированный поляризационно-оптический метод исследования напряжений.

В процессе экспериментальных исследований подготовленную модель с камерой и полостью для заряда ВВ в вертикальном положении размещали в специально изготовленном устройстве, которое обеспечивает устойчивость и симметричность модели при размещении ее между прижимными плитами прессы с фиксированной длительностью нахождения модели в нагруженном состоянии во времени. Затем, размещенную в специальном устройстве модель, устанавливали между прижимными плитами прессы в поле зрения поляризационно-оптической установки и пригружали. Результаты формирования поля напряжений при изменяющейся нагрузке на модель фиксировали фотокамерой. Модель нагружали с интенсивностью 18,0; 20,0 и 34,0 МПа. На рис. 5 приведен характер распределения поля напряжений в зависимости от интенсивности прикладываемой нагрузки в модели с камерой прямоугольной формы с вытяженным сводом обрушения и углом наклона к горизонтальной плоскости, равным 75°.

ливали между прижимными плитами прессы в поле зрения поляризационно-оптической установки и пригружали. Результаты формирования поля напряжений при изменяющейся нагрузке на модель фиксировали фотокамерой. Модель нагружали с интенсивностью 18,0; 20,0 и 34,0 МПа. На рис. 5 приведен характер распределения поля напряжений в зависимости от интенсивности прикладываемой нагрузки в модели с камерой прямоугольной формы с вытяженным сводом обрушения и углом наклона к горизонтальной плоскости, равным 75°.

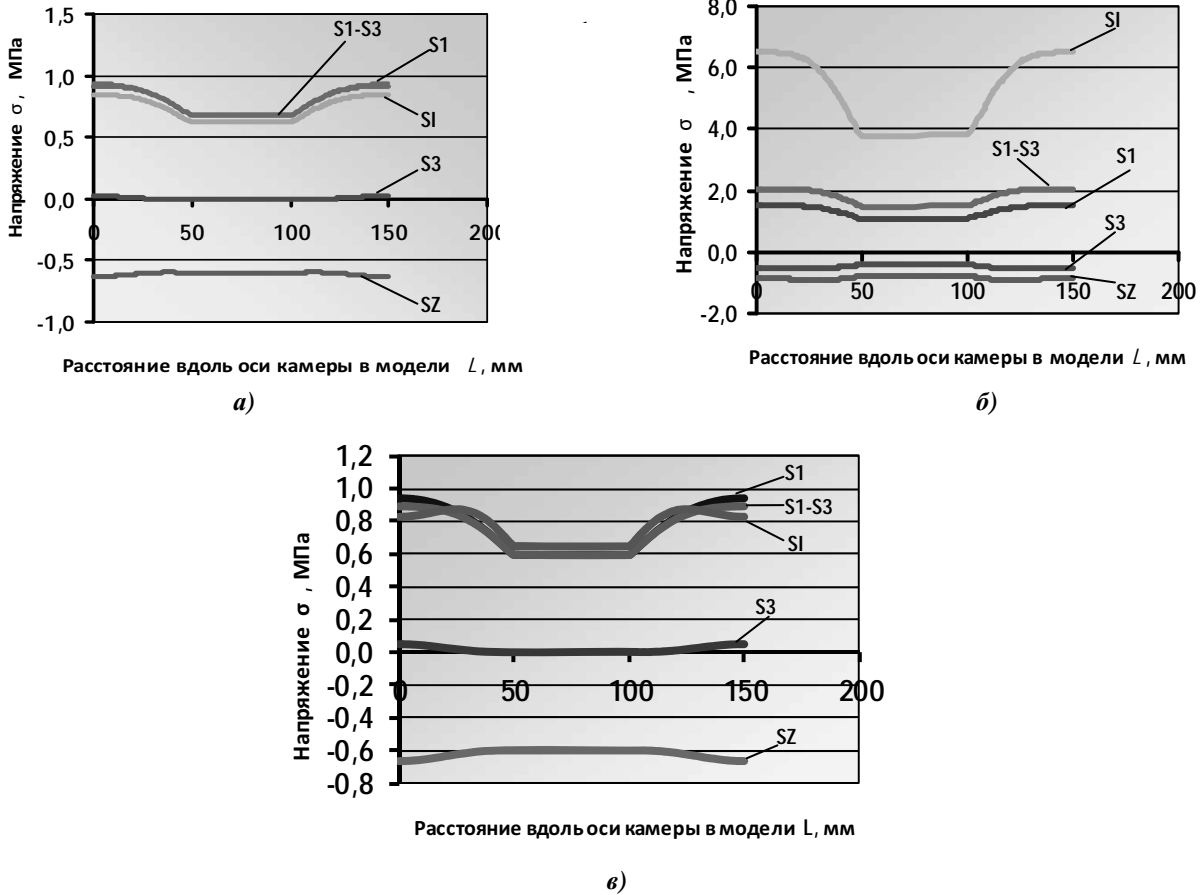


Рис. 4. Распределение значений напряжений вдоль оси камеры в модели добычного блока крутопадающей рудной залежи при углах наклона ее к горизонтальной плоскости, равных: а – 90°; б – 85°; в – 75°; S1 –  $\sigma_1$  – максимальные главные напряжения; S3 –  $\sigma_3$  – минимальные главные напряжения; S1-S3 –  $\sigma_1 - \sigma_3$  – разность максимальных и минимальных главных напряжений; SZ –  $\sigma_z$  – напряжения, перпендикулярные в плоскости модели; Si –  $\sigma_i$  – интенсивность напряжений

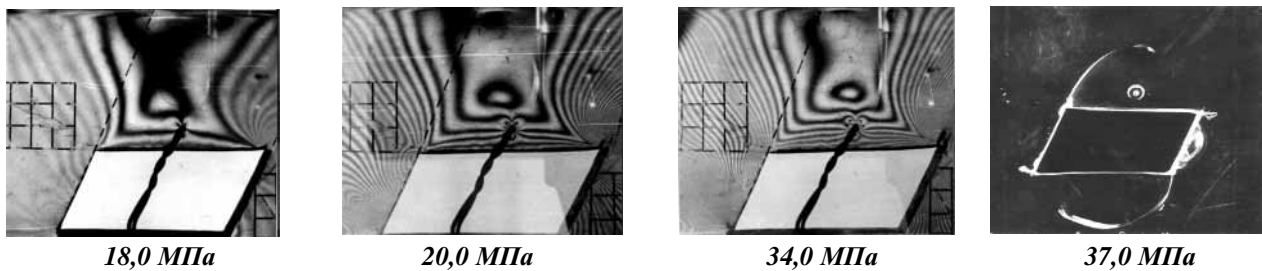


Рис. 5. Зависимость характера распределения поля напряжений от интенсивности прикладываемой нагрузки в модели с камерой прямоугольной формы с вытяженным сводом обрушения

Как видно на рис. 5, при осевой нагрузке, равной 18,0 МПа, можно заметить интенсивную концентрацию изохром на углах камеры, которые в первый момент развития поля напряжений имеют нечеткий, размытый вид. Над верхней частью полости наблюдается появление области пониженных напряжений, перемещение границ которой от верхней кромки полости обнажения с ростом осевой нагрузки увеличивается. С увеличением нагрузки до 20,0 МПа и далее до 34,0 МПа озохромы имеют четкий вид, а при нагрузке 37,0 МПа модель разрушилась. Трещины, сформированные после разрушения модели, хорошо видны на рис. 5. Зарождение трещин начиналось в тупых углах полости, имеющей свообразную форму с максимальной точкой удаления от кромки полости в центре свода обрушения, равной 40 мм, то есть 1/2 величины стороны полости. Анализируя результаты исследований, можно отметить, что зона пониженных напряжений располагается на высоте  $0,6 h_{св}$ , где  $h_{св}$  – максимальная высота свода обрушения.

Для выявления особенностей разрушения взрывом модели, имитирующей массив горных пород, в подготовленной модели в зоне повышенных напряжений формировалась взрывная полость диаметром 3 мм, в которой располагался заряд тэна массой 80 мг. Иницирование заряда осуществлялось нихромовым мостиком с навеской азида свинца. Сравнительные исследования характера разрушения моделей проводились для случая, когда имеются ненагруженная и нагруженная модель при 3/4 значениях критической нагрузки, которая составляла 28,0 МПа. Анализ результатов экспериментов показывает, что объем нарушений, вызванных взрывом заряда ВВ, весьма интенсивен с равномерным развитием трещинообразования и протяженностью трещин равной длины для ненагруженной модели, а нагруженная модель значительно меньше нарушена трещинами, причем направление их идет по линии наименьшего сопротивления (ЛНС) к поверхности полости и к ее углам. Эти результаты подтверждают тот факт, что модель, находящаяся в напряженном состоянии, существенно влияет на характер ее разрушения взрывом.

Аналогичные исследования проводились на моделях с изменяющимися параметрами статической нагрузки в зоне пониженных напряжений. Параметры моделей оставались постоянными, как и при предыдущих экспериментах, с той лишь разницей, что взрывная полость с зарядом ВВ располагалась в центральной части свода обрушения над полостью, равной 1/4 высоты камеры (10 мм), а также в моделях с расположением зарядов над висячим и лежащим боком камеры на расстоянии от границ ее, равном 35 мм в зоне влияния сжимающих напряжений.

Модели перед взрыванием зарядов подвергались статической нагрузке, равной:  $P = 0$ ;  $P = 18,0$ ;  $P = 34,0$  МПа. Результаты разрушения моделей взрывом показали, что с увеличением осевой нагрузки на модель угол раствора воронки уменьшается со следующими значениями: при  $P = 0$  МПа –  $\beta = 161^\circ$ ; при  $P = 18,0$  МПа –  $\beta = 158^\circ$  и при  $P = 34,0$  МПа –  $\beta = 154^\circ$ . С увеличением осевой нагрузки заметно прослежива-

ется более упорядоченное распространение трещин в вертикальном направлении, а площадь обрушения верхней плоскости полости составила, соответственно, 65; 54 и 49%.

Следующим этапом экспериментальных исследований являлось изучение влияния на результаты взрыва изменяющихся параметров поля напряжений в модели. Характеристика модели и условия нагружения оставались без изменений согласно описанной выше методике с единственной разницей, что динамическое нагружение моделей осуществлялось как при отсутствии нагрузки, так и с осевой нагрузкой, равной 18,0 МПа, что составляет 50% от критической для данных параметров модели. Причем, заряд ВВ располагался на расстоянии 36 мм от верхней кромки полости (камеры) как в центре ее, так в лежащем и висячем боках полости. Сравнивая результаты взрывов заряда ВВ в модели под нагрузкой и без нагрузки, обращает внимание тот факт, что в моделях, взорванных без нагрузки, картина радиальных трещин симметрична относительно заряда, а трещины в этом случае не распространяются до поверхности полости. Иная картина в моделях, взорванных при статической нагрузке 18,0 МПа. Здесь трещины строго ориентированы в вертикальном направлении, причем некоторые трещины достигли верхней кромки полости.

Анализируя результаты взрывания заряда ВВ при постоянной его массе, как и во всех сериях экспериментов, расположенном по вертикали на расстоянии, равном  $0,9 h_{пол.}$ , где  $h_{пол.}$  – высота обнаженной полости (камеры) – 36 мм над лежащим боком, получены результаты, отличные от предыдущих. Так, при взрывании ненагруженных моделей прослеживается равномерное распределение трещин вокруг заряда, а при нагрузке 18,0 МПа модель была рассечена в верхней части двумя основными трещинами. Направление одной из двух трещин развивалось по предполагаемому контуру свода обрушения, с наклоном в  $65^\circ$  к горизонтали, а другая трещина прослеживается почти в вертикальном направлении вверх и вниз от заряда ВВ. Аналогичная картина видна при разрушении модели в области лежащего бока камеры с наклоном  $65-70^\circ$  к горизонтали в сторону полости.

**Выводы.** Таким образом, результаты исследований показали, что в массивах горных пород крутопадающей рудной залежи при различных углах падения пласта полезного ископаемого на глубоких горизонтах рекомендуется закладывать буровые выработки ближе к центральной части камеры по оси ее в границах с одной стороны камеры, а с другой – зоны повышенных напряжений и в зонах перераспределения напряжений с меньшими их показателями ( $Q = 0,4-0,8$ ), перемещающимися к днищу камеры как в лежащем, так и в висячем ее боках. При совместном участии в разрушении среды статических и динамических нагрузок форма и степень разрушения ее изменяется. Так, статическое поле напряжений, ориентированное в определенном направлении, способствует развитию трещин на значительные расстояния, что приводит к перераспределению количественных характеристик напряжений в окружающей

заряд среде. Следовательно, по результатам выполненных исследований можно обоснованно подходить к корректировке параметров буровзрывных работ, месту заложения скважин и условиям их бурения, что позволит повысить эффективность работы скважинных зарядов по отбойке полезного ископаемого, снизить удельный расход ВВ и СВ, разубоживание полезного ископаемого и тем самым улучшить показатели работы погружных и транспортных средств.

### Список литературы / References

1. Кропоткин П.Н. Тектонические напряжения в земной коре / П.Н. Кропоткин // Геотектоника. – 1996. – № 2. – С. 10–15.

Kropotkin, P.N. (1996), "Tectonic tensions in the earth's crust", *Geotektonika*, no.2, pp. 10–15.

2. Адушкин В.В. Геомеханика крупномасштабных взрывов / В.В. Адушкин, А.А. Спивак – М.: Наука, 1993. – 187 с.

Adushkin, V.V. and Spivak, A.A. (1993), *Geomechanika krupnomasshtabnykh vzryvov* [Geomechanics of Large-Scale Blast], Nauka, Moscow, Russia.

3. Курленя М.В. Геомеханические проблемы разработки железорудных месторождений Сибири / Курленя М.В., Еременко А.А., Шрепп Б.В. – Новосибирск: Наука, 2001. – 240 с.

Kurlenya, M.V., Eryemenko, A.A. and Shrepp, B.V. (2001), *Geomekhanicheskie problem razrabotki zhelezorudnykh mestorozhdeniy Sibiri* [Geomechanical Problems of Development of Iron-Ore Deposits of Siberia], Nauka, Novosibirsk, Russia.

4. Пат.№ 76838 Україна МКВ 7 E21C 39/00 Спосіб імітації напружено-деформованого стану гірського масиву на моделях / Іщенко К.С., Круковська В.В., Круковський О.П., Іщенко О.К.; заявник і власник патента ІГТМ НАН України. – № а 2011 01078; Заявл. 31.01.2011; Надр.25.01.13; Бюл. №2.

Ischenko, K.S., Krukovskaya, V.V., Krukovskiy, A.P. and Ischenko, A.K. (2013), Patent No.76838, Ukraine MKV 7 E21C 39/00, "The method of imitation of the stressed-deformed state of rock massif on models", Declarant and patent owner IGTM of NAN of Ukraine. No. a 2011 01078, Declared: January 31, 2011, Published: January 25, 2013, bulletin no.2.

**Мета.** Дослідження характеру та чисельне рішення розподілу полів напружень масиву, що формується навколо камери блоку, що видобувається при статичному чи динамічному навантаженні.

**Методика.** Проведені декілька серій експериментальних досліджень у лабораторних умовах з вивчення характеру розподілу поля напружень навколо блоку, що видобувається, на моделях з використанням методу фотопружності та розробленого стенду, а також чисельне моделювання напружено-деформованого стану (НДС) масиву у блоці з видобутку круто падаючого рудного покладу методом кінцевих елементів (МКЕ), механіки суцільних середовищ, вивчений вплив напруженого стану моделі на характер її руйнування вибухом.

**Результати.** Представлені результати експериментального й теоретичного дослідження НДС масиву за трьома схемами запропонованої моделі блоку, що видобувається, у пружно-пластичній постановці з використанням МКЕ. Встановлено, що в масивах гірських порід крутого рудного покладу при різних кутах падіння пласта корисних копалин на глибоких горизонтах рекомендується закладати бурові виробки ближче до центральної частини камери по вісі її в межах з одного боку камери, а з іншого – у зоні підвищених напружень або в зонах перерозподілу напружень.

**Наукова новизна.** Встановлення характеру, законності розподілу та чисельні значення полів напружень навколо камери блоку, крутопадаючого рудного покладу, що видобувається, до ведення вибухових робіт дозволить обґрунтовано підходити до коригування параметрів буропідричних робіт, місця розташування вибухових свердловин і умови їх буріння, що веде до підвищення ефективності роботи свердловинних зарядів вибухових речовин (ВР) по відбійці корисних копалин.

**Практична значимість.** У процесі відбійки гірських порід у блоці рудного крутопадаючого покладу, що видобувається, підвищується ефективність роботи свердловинних зарядів по відбійці корисних копалин, знижуються питомі витрати ВР і засобів ініціювання (ЗІ), розубожування корисної копалини та покращуються показники роботи завантажувальних і транспортних засобів.

**Ключові слова:** напружений стан, блок, що видобувається, камера, буровибуховий спосіб відбійки, метод фотопружності, чисельне моделювання

**Purpose.** To study the character and to find the computational solution of distribution of the field of tensions of the rock massif formed round the extraction chamber under static and dynamic load.

**Methodology.** A few series of laboratory modeling of the character of stress field distribution around the extraction chambers have been carried out using the photoelasticity method and the developed stand. Using the continuum mechanics and finite-element method, we have carried out the numerical modeling of rock massif stressed-deformed state for the block where steep ore deposit is being extracted. We have determined the influence of the stressed-deformed state of the model on the character of its destruction by explosion.

**Findings.** We present the results of the experimental and theoretical researches of rock massif stressed-deformed state for three different schemes of the rock massif block model in elastic-plastic putting using the finite-element method. Based on the results we recommend locating drilling rooms in the central part of the chamber along its axis and in the zones of maximal stress or the zones of rearrangement of stress condition in the rock massif containing steep ore deposit with different inclination angles in deep horizons.

**Originality.** Estimation of the character and laws of distribution, and numerical values of the fields of ten-



sions around the extraction chamber in steep ore deposit before drilling and blasting will allow us to substantiate adjustment parameters of drilling and blasting, location of mining holes and conditions of their drilling. This will improve the efficiency of blasthole charges.

**Practical value.** We can improve the efficiency of blasthole charges during breaking ground, reduce the

consumption of explosives and blasting agents, improve the quality of ore and performance of loading and transport facilities.

**Keywords:** *stressed state, rock block, chamber, drilling and blasting, method of photoelasticity, numeral modeling*

*Рекомендовано до публікації докт. техн. наук О.М. Шахноком. Дата надходження рукопису 12.04.13.*

УДК 622.063.23, 666.9.015

**И.Г. Сахно, канд. техн. наук, доц.**

Государственное высшее учебное заведение „Донецкий национальный технический университет“, г. Донецк, Украина, e-mail: sahno\_i@mail.ru

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА НАПРАВЛЕННОГО РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД НЕВЗРЫВЧАТЫМИ РАЗРУШАЮЩИМИ СМЕСЯМИ

**I.G. Sakhno, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor**

State Higher Educational Institution “Donetsk National Technical University”, Donetsk, Ukraine, e-mail: sahno\_i@mail.ru

## STUDY OF THE MECHANISM OF THE DIRECTED DESTRUCTION OF ROCK BY NON-EXPLOSIVE DESTROYING MIXTURES

**Цель.** Разработка и исследование нового статического способа направленного разрушения горных пород, основанного на создании при помощи специального патрона на стенках шпура концентраторов растягивающих напряжений. Рост напряжений обеспечивается за счет увеличения в объеме невзрывчатой разрушающей смеси, помещенной в патрон.

**Методика.** В работе предложен способ направленного разрушения и устройство для его реализации. С помощью метода конечных элементов проведено исследование напряженно-деформированного состояния разрушаемого предложенным способом объекта. Получены зависимости коэффициента концентрации растягивающих напряжений на стенках шпура от конструктивных размеров патрона. На основании проведенных аналитических исследований с использованием решений классической теории упругости, а также теории разрушения Гриффитса-Ирвина, в работе предложена методика расчета параметров способа направленного разрушения.

**Результаты.** Получен положительный эффект от применения предлагаемого способа в лабораторных условиях. Проведена опытно-промышленная проверка предложенных технических решений при направленном разрушении блоков гранита с прочностью на одноосное сжатие 6–16 МПа в условиях Хлебодаровского рудоуправления.

**Научная новизна.** Впервые предложен способ направленного разрушения горных пород невзрывчатыми разрушающими смесями, исследована физика процесса и определены его параметры.

**Практическая значимость.** Заключается в том, что использование предложенного способа разрушения позволяет обеспечить направленное разрушение пород любой прочности при исключении динамического воздействия на массив. Применение предложенного способа позволит управлять местом возникновения и траекторией роста магистральной трещины.

**Ключевые слова:** *разрушение горных пород, невзрывчатая разрушающая смесь, саморасширение, напряжения*

**Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными и практическими задачами.** Вопрос совершенствования технологий безопасного и управляемого разрушения горных пород находится в центре внимания ученых многих стран. Одним из перспективных направлений безопасного разрушения является применение статических методов. Наиболее изученными являются механические методы (клиновой, гидроклиновой, алмазно-канатное пиление, камнерезные буровые установки и комбайны), электротермические (тепловой пробой, диэлектрический нагрев, разрушение сверхвысокими частото-

тами, разрушение в стоячей электромагнитной волне), методы, основанные на энергии жидкости (гидродинамический, физико-химический импульсный разрыв, разрядно-импульсное разрушение, гидроудар, гидрорезание, флюидоразрыв) и электромагнитные (взрывание электрических проводников, электрический пробой, плавление лазерным излучением, электромагнитным излучением).

Промышленные масштабы применения в горной практике получили только механические методы. Остальные методы находятся на стадии научно-исследовательских и проектных разработок. Их промышленное использование сдерживается отсутствием специального оборудования, малой надежностью,