

УДК [622.233:622.235]:622.831.312

К.С. Ищенко¹, канд. техн. наук, ст. научн. сотр.,
 А.П. Круковский¹, канд. техн. наук, ст. научн. сотр.,
 В.В. Круковская¹, канд. техн. наук, ст. научн. сотр.,
 А.К. Ищенко²

1 – Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова
 НАН Украины, г. Днепропетровск, Украина,
 e-mail: ishenko_k@i.ua

2 – Государственное высшее учебное заведение
 „Национальный горный университет“, г. Днепропетровск,
 Украина, e-mail: Kam1c@ua.fm

ФИЗИЧЕСКОЕ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД В ЗАБОЕ ВЫРАБОТКИ

К.С. Ishchenko¹, Cand. Sci. (Tech.),
 Senior Research Fellow,
 А.Р. Krukovskiy¹, Cand. Sci. (Tech.),
 Senior Research Fellow,
 V.V. Krukovskaya¹, Cand. Sci. (Tech.),
 Senior Research Fellow,
 А.К. Ishchenko²

1 – N.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics
 of National Academy of Science of Ukraine, Dnipropetrovsk,
 Ukraine, e-mail: ishenko_k@i.ua

2 – State Higher Educational Institution “National Mining
 University”, Dnipropetrovsk, Ukraine,
 e-mail: Kam1c@ua.fm

PHYSICAL AND NUMERAL MODELING OF STRESSED-DEFORMED STATE OF THE ROCK MASSIF IN THE WORKING FACE

Цель. Исследование характера и численное решение распределения поля напряжений массива, сформировавшегося вокруг забоя выработки до проведения буровзрывных работ.

Методика. Проведено несколько серий экспериментальных исследований в лабораторных условиях по изучению характера распределения поля напряжений вокруг забоя выработки на моделях с использованием метода фотоупругости и разработанного стенда, а также численное моделирование напряженно-деформированного состояния массива в забое подготовительной выработки методом конечных элементов (МКЭ) и механики сплошных сред. Предложенный комплекс оборудования является составной частью нового способа моделирования НДС вокруг выработки.

Результаты. Представлены экспериментальные и теоретические исследования моделирования НДС массива по пяти схемам предложенной модели забоя выработки в упругопластической постановке с использованием МКЭ. Исследованиями установлено, что в забоях выработок как прямой, так и криволинейной конфигурации рекомендуется в центральной части выработки располагать комплекты шпуров с увеличенными технологическими параметрами. Это позволит переместить зону разгрузки впереди забоя выработки и увеличить зону пониженных напряжений.

Научная новизна. Установление характера, закономерностей их распределения и численные значения полей напряжений вокруг подготовительной выработки в центральной части по ходу ее перед ведением буровзрывных работ

Практическая значимость. В процессе отбойки горных пород за цикл взрывания комплекта врубовых, отбойных, вспомогательных и оконтуривающих шпуровых зарядов по всему сечению выработки улучшатся условия их работы и показатели проходки.

Ключевые слова: *напряженное состояние, забой выработки, буровзрывной способ проходки, метод фотоупругости, численное моделирование*

Введение. Форма забоя, наличие и количество пробуренных шпуров изменяют поле напряжений вокруг выработки. Вмещающие породы разгружаются от горного давления, из состояния всестороннего сжатия переходят к неравнокомпонентному.

При ведении буровзрывных работ изменение напряженно-деформированного состояния (НДС) массива в призабойной зоне горной выработки влияет на процесс трещинообразования как при формировании врубовой полости, так и при взрыве отбойных, вспомогательных и оконтуривающих зарядов. Поэтому основные показатели взрыва: коэффициент использования шпуров, удельный расход взрывчатых веществ, кучность навала породы, увеличение разброса которой сопровождается повреждением призабойной

крепи, – также зависят от напряженного состояния, сформировавшегося в забое горной выработки до проведения взрывных работ. Таким образом, исследование собственного поля напряжений массива вокруг выработки с элементами подготовки к проведению буровзрывных работ – формирование в забое комплекта врубовых, отбойных и оконтуривающих шпуров – представляет особый интерес.

Цель работы – исследование характера и численное решение распределения поля напряжений массива, сформировавшегося вокруг забоя выработки до ведения взрывных работ.

Методика и результаты исследований. Методикой исследований предусматривалось проведение двух этапов работ:

1. Экспериментальные исследования формирования поля напряжений в забое выработки на моделях.

2. Моделирование напряженного состояния массива горных пород в забое выработки с использованием метода конечных элементов.

1. Экспериментальные исследования формирования поля напряжений в забое выработки на моделях. Для изучения формирования поля напряжений вокруг выработки в массиве горных пород использовался метод фотоупругости или оптико-поляризационный метод. 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), основные физико-механические характеристики которого приведены в таблице.

Таблица

Физико-механические свойства органического стекла

Материал	Плотность, $\rho \cdot 10^3$, кг/м ³	Скорость продольной волны, C_p , м/с	Скорость поперечной волны, C_s , м/с	Прочность на разрыв, σ_p , МПа	Прочность на сжатие, $\sigma_{сж}$, МПа	Модуль Юнга, $E \cdot 10^3$, МПа
Органическое стекло	119,5	2740	1360	60	90	8,7

В нашем случае для изготовления моделей применялось листовое органическое стекло постоянной толщины 0,015 м. С помощью ленточной или дисковой пилы в лаборатории вырезают модели размером 0,2x0,15 м, с помощью лобзика – элементы выработки, с соблюдением геометрического и силового подобия, и доводят на лекальных планках до нужного размера. Поверхность контура модели обрабатывают на фрезерном станке и полируют пастами, например, ГОИ до чистоты поверхности не ниже V 13.

Формирование элементов вруба в забое выработки осуществляют сверлением шпуров или скважин острым режущим инструментом, не менее чем за 2 его прохода, во избежание затягивания сверла в отверстие, образования сколов и внутренних деформаций модели. В процессе подготовки моделей к экспериментальным исследованиям зеркальную поверхность ее защищают от царапин и внешних повреждений наклеиванием бумаги поливиниловым спиртом, растворенным в горячей воде. На подготовленных зеркальных поверхностях модели, для обработки результатов формирования поля напряжений, с помощью фломастера наносят квадратную сетку с шагом 0,002 м.

Для исследований были выбраны следующие схемы: а) модель забоя сферической формы; б) модель забоя сферической формы с элементом вруба – компенсационная полость с длиной, равной $h/2$, где h – высота выработки; в) модель забоя прямоугольной формы с элементом вруба – компенсационная полость; г) модель забоя прямоугольной формы с комплектом врубовых шпуров. Методикой экспериментальных исследований предусматривалось пять серий экспериментов с указанными моделями с целью определения характера распределения поля напряжений вокруг забоя выработки. Реализация исследований осуществлялась в лабораторных условиях совместно ГВУЗ „НГУ“ и ИГТМ НАН Украины с использованием стенда, разработанного для моделирования напряженного состояния массива горных пород, в котором проводится подготовительная выработка. Стенд является составной частью оборудования для реализации способа имитации напряженного состояния вокруг выработки, приоритет которого защищен патентом Украины [1]. Схема стенда и общий вид оборудования стенда представлены на рис. 1.

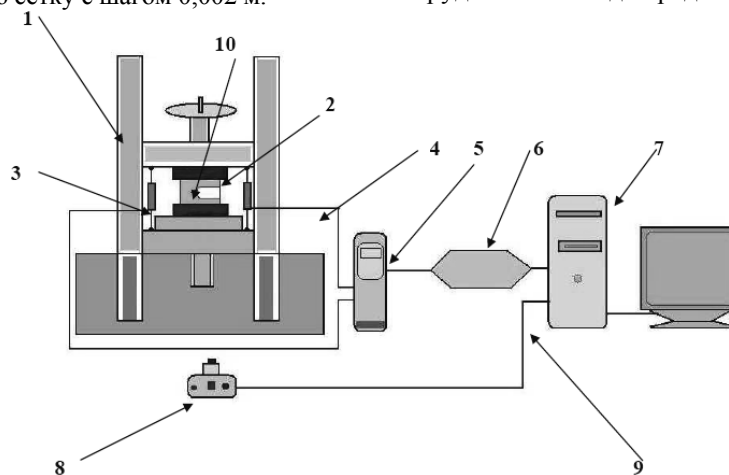


Рис. 1. Схема стенда для имитации НДС массива: 1 – пресс гидравлический; 2 – прижимные плиты прессы; 3 – бесконтактные магнитные датчики (БМД); 4 – соединительный кабель; 5 – аналого-цифровой преобразователь (АЦП); 6 – интерфейс RS-232; 7 – системный блок ПК; 8 – цифровая фотокамера; 9 – USB порт; 10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

Стенд состоит из стационарно расположенного пресса гидравлического испытательного 1 для нагружения моделей, между прижимными плитами 2 которого устанавливают бесконтактные магнитные датчики (БМД) 3, которые коммутированы кабельной системой 4 с многоканальным модулем 5 – аналого-цифровым преобразователем (АЦП), подключенный через интерфейс 6 RS-232 к системному блоку ПК 7. Цифровая фотокамера 8 подключена через USB порт 9 к системному блоку ПК 7 для видеосъемки имитации напряженно-деформированного состояния горного массива в забое выработки модели 10 и передачи ее системному блоку ПК 7 для обработки данных.

Перед проведением экспериментальных исследований запускают подготовленное оборудование, проверяют согласованность систем стенда и проводят его тарировку. Затем между прижимными плитами пресса устанавливают подготовленную к экспериментальным исследованиям плоскую модель согласно выбранным схемам и нагружают ее, а на горизонтальной поверхности, соответствующей высоте нижней плиты пресса, устанавливают по центру оптической линии с одной стороны источник света, поляризатор, а с другой стороны – анализатор и фотокамеру. После включения источника света поляризованный свет, проходя через модель, находящуюся в напряженном состоянии, разлагается на два луча, световые волны которого ориентированы в плоскостях действия двух главных нормальных напряжений. 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. Если обе плоскости, в которых ориентированы лучи, будут вновь совмещены, то произойдет интерференция световых волн и на экране анализатора появится ряд полос – изохром, окрашенных в различные цвета разной интенсивности. По окраске этих полос можно судить о напряженном состоянии модели, поскольку каждая изохрома соответствует определенному уровню разности максимальной и минимальной компонент главных напряжений ($\sigma_1 - \sigma_3$). Для каждой из исследованных моделей в процессе их нагружения определено поле напряжений в виде изохром.

Результаты экспериментов приведены на рис. 2. Анализ результатов распределения напряжений проводился в процессе изменения нагрузки на модель, состояние образцов фиксировалось через каждые 2,5 МПа нагружения.

В ходе исследования моделей с различной конфигурацией забоя выработки и видов элементов вруба характер развития поля напряжений существенно изменился с увеличением нагрузки. От действия статической сжимающей нагрузки в модели впереди забоя выработки выпуклой формы появилось поле светлых тонов, которое предшествует появлению изохромы первого порядка. С увеличением нагрузки до 5,0 МПа (рис. 2, а) вслед за изохромой первого порядка переместилась изохрома второго порядка. При этом площадь уча-

стка, ограниченного изохромами первого и второго порядка, существенно не изменилась, тогда как при нагрузке 10,0–15,0 МПа картина резко меняется. По контуру забоя выработки появились почти концентрические изохромы высоких порядков, соответствующие большим напряжениям. Совершенно иная картина прослеживается на моделях с элементами вруба (рис. 2, б-г). В модели выработки с выпуклой формой забоя, с компенсационной скважиной в центре, на первых этапах изменения нагрузки (2,5 МПа) появилась изохрома первого порядка с измененной конфигурацией, принимающей форму поверхности забоя выработки с выраженным уступным элементом на границе, соответствующей торцу шпура. Площадь, ограниченная изохромой, больше, чем в аналогичных условиях в модели без элементов вруба (рис. 2, а). С увеличением нагрузки до 5,0–10,0 МПа фронт высоких напряжений перемещается в зону вне влияния подготовительной выработки и перераспределяется. Но, в свою очередь, в почве и кровле выработки происходит концентрация напряжений – изохромы, приобретающие овальную форму, вытянутую в направлении проведения выработки. Такая же картина распределения напряжений наблюдается в модели с прямолинейной формой забоя (рис. 2, в). Если же оценивать результаты экспериментов в модели с полным комплектом врубовых шпуров (рис. 2, г), то видно, что при бурении шпуров в этой зоне происходит перераспределение напряжений и разгрузка массива еще до ведения взрывных работ.

Одновременно с изучением характера распределения напряжений в модели исследовалась динамика нагружения модели с фиксированным шагом, равным 2,5 МПа. Полученная информация снималась датчиками, с последующим кодированием сигнала в АЦП, и через интерфейс RS-232 передавалась в системный блок ПК. С использованием программного обеспечения (ПО), адаптированного к программе EXCEL, полученная информация обрабатывается в ПК и выдается в диалоговом окне на мониторе ПК в виде диаграммы „напряжение-деформация“ (рис. 3).

Анализ напряженного состояния массива в моделях выработок с различной конфигурацией поверхности забоя и количеством элементов врубовых шпуров показал, что основная концентрация и форма распределения напряжений впереди и вокруг забоя выработки формируется по оси выработки в зоне влияния технологических параметров проведения выработки – пробуренные шпуры и конфигурация поверхности забоя. Это указывает на то, что при расположении врубовых шпуров в сечении выработки необходимо бурить их на глубину, превышающую зону влияния технологических параметров проведения выработки, и тем самым переместить максимум главных напряжений в зону вне влияния забоя выработки. Выполнение этих операций позволит улучшить работу врубовых шпуровых зарядов по образованию дополнительной свободной поверхности – врубовой полости и улучшить тем самым показатели БВР.

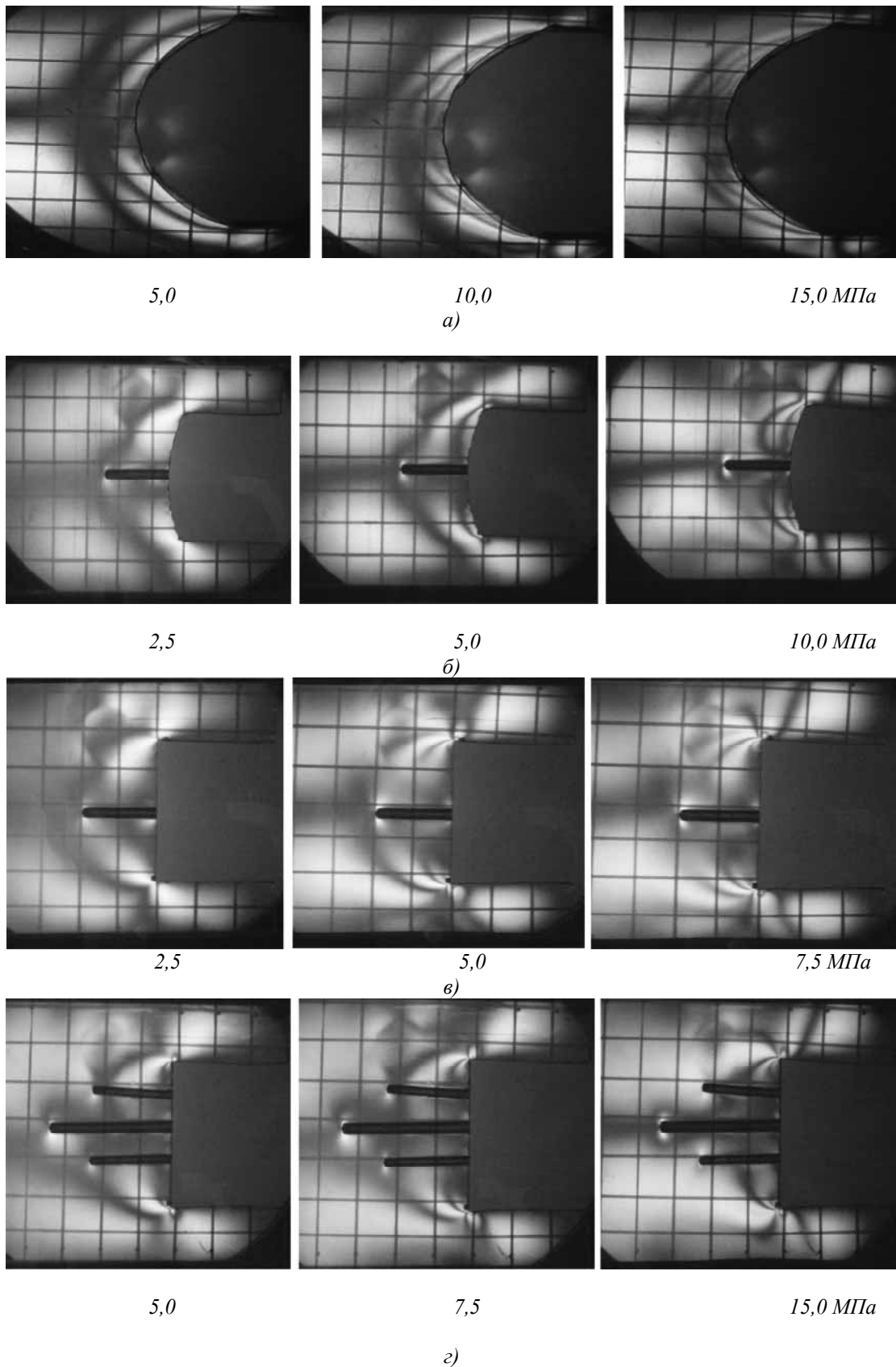


Рис. 2. Характер распределения напряжений в зависимости от прикладываемой нагрузки в модели с забоем: а) сферической формы; б) сферической формы с элементом вруба – компенсационная полость; в) прямоугольной формы с элементом вруба – компенсационная полость; г) прямоугольной формы с врубом

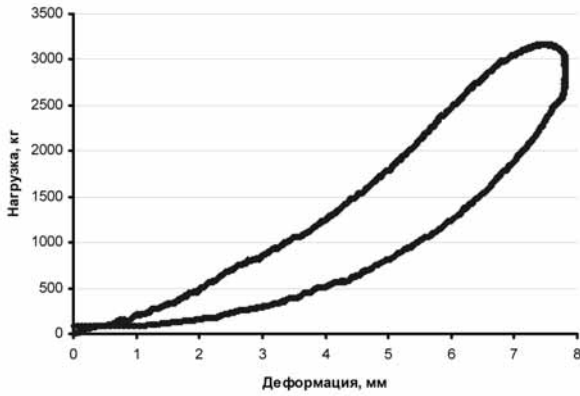


Рис. 3. Типичный вид диаграммы „напряжение-деформация“ при одноосном нагружении модели

2. Моделирование напряженного состояния массива горных пород в забое выработки с использованием метода конечных элементов. Решим задачу об определении напряженного состояния пород в забое выработки, при упругопластической постановке, с помощью метода конечных элементов. Воспользуемся методом конечных элементов (МКЭ) в форме метода перемещений. Алгоритм решения задачи обуславливает 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-деформированное состояние тела.

Рассмотрим следующие схемы забоя выработки: I – забой сферической формы; II – забой сферической формы с элементом вруба – компенсационная полость длиной $h/2$; III – забой сферической формы с элементом вруба – компенсационная полость длиной h ; IV – забой прямоугольной формы с элементом вруба – компенсационная полость; V – модель забоя прямоугольной формы с врубом. Для оценки напряженного состояния будем использовать параметр, характеризующий степень разнокомпонентности поля напряжений

$$Q = (\sigma_1 - \sigma_3) / \gamma H,$$

где σ_1, σ_3 – максимальная и минимальная компоненты тензора главных напряжений; γ – усредненная плотность вышележащих горных пород; H – глубина разработки.

На рис. 4 показаны распределения значений параметра Q для рассматриваемых моделей при максимальной нагрузке.

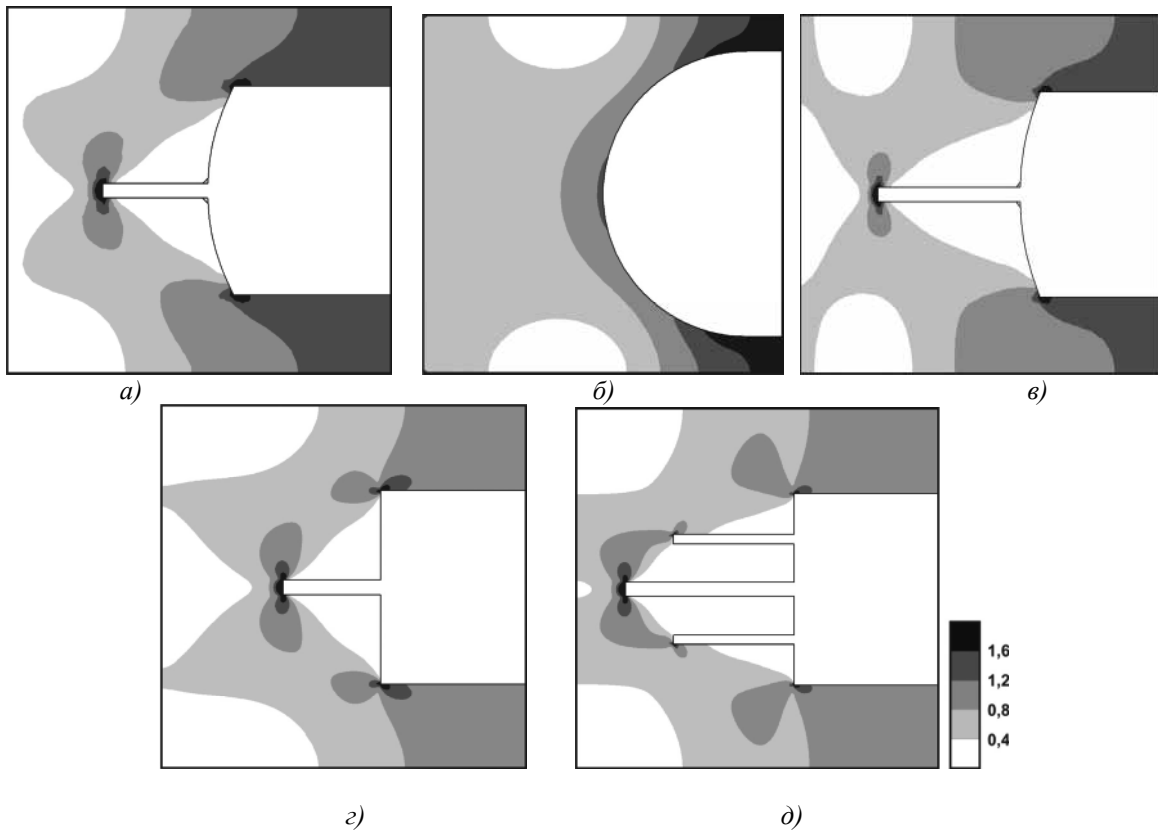


Рис. 4. Распределение значений параметра Q для моделей I–V: а) забой сферической формы; б) забой сферической формы с элементом вруба – компенсационная полость длиной $h/2$; в) забой сферической формы с элементом вруба – компенсационная полость длиной h ; г) забой прямоугольной формы с элементом вруба – компенсационная полость; д) модель забоя прямоугольной формы с врубом

Рассмотрим распределение напряжений в забое выработки криволинейной конфигурации. На рис. 4, а видно, что зона повышенной разнокомпонентности формируется на поверхности, приобретая ее форму ($0,8 < Q < 1,2$).

В случае, когда забой имеет прямолинейную конфигурацию с одиночным компенсационным шпуром длиной $h/2$, зона вокруг шпура наиболее разгружена (рис. 4, з), а максимальные нагрузки ($Q = 1,6$) концентрируются в торце шпура и в углах на переходе „кровля – поверхность забоя“ и „почва – поверхность забоя“. В забое криволинейной конфигурации с центральными шпурами длиной $h/2$ и h (рис. 4, б-в), характер распределения напряжений в зоне компенса-

ционного шпура аналогичен. Видно, что зона разгрузки в области компенсационного шпура практически равна его длине и имеет форму воронки глубиной $h/2$ и h соответственно. Аналогичная картина наблюдается для забоя прямолинейной конфигурации с комплектом врубовых шпуров (рис. 4, д), только разгруженная зона, в которой расположен комплект врубовых шпуров, имеет большие размеры. Также наблюдается концентрация напряжений в контактных областях – „граница вруба – торцевая часть шпура“ ($Q > 1,2$).

На рис. 5 приведены распределения значений параметра Q вдоль оси, проходящей через центр выработки в модели.

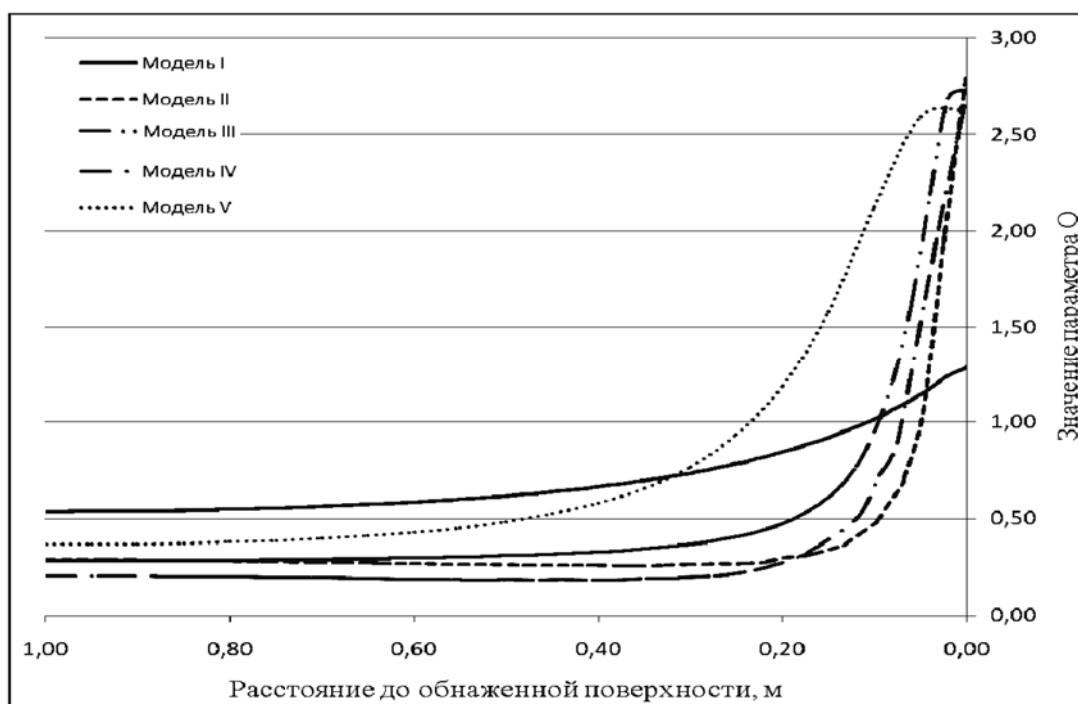


Рис. 5. Распределения значений параметра Q для пяти исследуемых моделей

Выводы. Таким образом, результаты исследований показали, что в забоях выработок как прямой, так и криволинейной конфигурации рекомендуется в центральной части выработки располагать комплекты шпуров с технологическими параметрами, измененными в сторону их увеличения. Это позволит увеличить зону разгрузки и тем самым улучшить условия работы врубовых шпуровых зарядов по образованию врубовой полости с последующим взрыванием отбойных, вспомогательных и оконтуривающих шпуровых зарядов за цикл взрывания по всему сечению выработки.

Список литературы / References

1. Пат. Україна по заявці а 2011 01078 МКВ 7 Е21С 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; замовл. 31.01.2011.

Ishchenko, K.S., Krukovskaya, V.V., Krukovskiy, A.P. and Ishchenko, A.K. Patent of Ukraine 2011 01078 МКВ 7 Е21С 39/00. “A method of imitation of the stressed-deformed state of rock massif on models” Declarant and owner of the patent IGTM of NAN of Ukraine. № а 2011 01078; declared January 31, 2011.

Мета. Дослідження характеру і чисельне рішення розподілу полів напружень масиву, що формуються навколо забою виробки, до проведення буровибухових робіт.

Методика. Проведено декілька серій експериментальних досліджень у лабораторних умовах із вивчення характеру розподілу полів напружень навколо забою виробки на моделях з використанням методу фотопружності і розробленого стенду, а також чисельне моделювання напружено-деформованого стану (НДС) масиву в забої підготовчої виробки методом кінцевих елементів (МКЕ) і механіки суцільного середовища. Запропонований комплекс устаткування є

складовою частиною нового способу моделювання НДС навколо виробки.

Результати. Представлено експериментальні і теоретичні дослідження моделювання НДС масиву по п'яти схемах запропонованої моделі забою виробки в упругопластичній постановці з використанням МКЕ. Дослідженнями встановлено, що в забоях виробки як прямої, так і криволінійної конфігурації рекомендується в центральній частині виробки розташовувати комплекти шпурів зі збільшеними технологічними параметрами. Це дозволить змістити зону розвантаження попереду забою виробки і збільшити зону з низькими показниками напружень.

Наукова новизна. Встановлення характеру, закономірностей їх розподілу і чисельні значення полів напружень навколо підготовчої виробки в центральній частині за ходом її перед початком буровибухових робіт.

Практична значущість. У процесі руйнування гірських порід за цикл підривання комплексу врубових, відбійних, допоміжних і оконтурюючих шпурових зарядів по всьому перетину виробки поліпшуються умови їх роботи і показники проходки.

Ключові слова: *напружений стан, забій виробки, буровибуховий спосіб проходки, метод фотонапруженості, чисельне моделювання*

Purpose. To investigate the stress field character and numerical solution for distribution of stress in field that forms around working face before drilling and blasting.

Methodology. A few series of experimental researches of the character of stress field distribution

around the mining face were conducted in laboratory terms by means of photoelasticity method and using the developed stand, and the method of the numerical simulation of rock massif stressed-deformed state in the face of the preparatory working by the finite element method and the method of continuous medium mechanics. The offered equipment set is the part of new method of the stressed-deformed state modeling.

Findings. The experimental and theoretical researches of modeling the stressed-deformed state of rock massif are presented in five schemes for offered model of working face in elastoplastic construction using finite element method. It was established by researches that the face of working of both line and curve configurations require mounting of holes with increased technological parameters in central part of the working. It will allow to move an unloading area ahead of the face of working and to broaden the unstressed area.

Originality. Character and laws of distribution of numerical values stressed field round the preparatory workings in the central part before drilling and blasting have been determined.

Practical value. When driving the working by drill and fire system use of the right set of blast holes improves work performance.

Keywords: *stressed state, mining face, drill and fire system, method of photoelasticity, numerical simulation*

*Рекомендовано до публікації докт. техн. наук
О.М. Шашенком. Дата находження рукопису 02.09.11*