

В.Г. Перепелица, д-р техн. наук,
Л.Д. Шматовский, канд. техн. наук,
Р.А. Замковой, инженер 1 кат.,
П.С. Дударко, инженер 1 кат.,
ИГТМ НАН Украины

**ДИНАМИКА РАЗВИТИЯ ТРЕЩИН ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ
ПРОЦЕССА ЛОКАЛЬНОГО ГИДРОРАЗРЫВА НА МОДЕЛЯХ
ИЗ ОПТИЧЕСКИ АКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Приведена методика аналізу результатів експериментальних досліджень процесу локального гідророзриву на моделях із оптично активних матеріалів

**THE DYNAMICS OF DEVELOPMENT OF CRACKS AT THE MODELING
PROCESS OF LOCAL HYDRAULIC BREAK ON THE MODELS, WHICH
CONSIST OF THE OPTICAL-ACTIVE MATERIALS**

The methods of the analysis of experimental investigations of the process of local hydraulic break on the models, which consist of the optical-active materials, are adduced

Для экспериментальной проверки численно-аналитического метода исследования напряженно-деформированного состояния углепородного массива вокруг цилиндрической нагнетательной камеры при локальном гидроразрыве (ЛГР) нашел целесообразное применение метод моделирования с использованием моделей из оптически активных материалов. Этот метод широко используется для изучения напряжений вокруг горных выработок при решении различных горно-технических задач [1-2]. Проверка в натуральных (шахтных) условиях, позволила бы получить более достоверные данные, но её трудоёмкость и неосуществимость варьирования некоторыми параметрами изучаемого процесса существенно снижает эффективность такого подхода. Основные методические положения оптического моделирования изложены в работах [1-8].

Исследованиями предусматривалось изучение процесса локального внутрискважинного гидравлического разрыва в модели обладающей оптическими свойствами с целью получения качественных и некоторых количественных параметров гидроразрыва и заполнения образовавшихся трещин сыпучим газопроводящим материалом.

В данной работе предполагается решение следующих задач:

- установить место зарождения трещин и их пространственное ориентирование относительно продольной оси скважины и оси визирования;
- определить площадь образовавшейся трещины с учетом поправок на преломление материала модели и пространственного ориентирования трещины;
- определить критическое давление гидроразрыва в материале модели при конкретных размерах нагнетательной камеры, а также среднюю скорость и ускорение развития трещины.

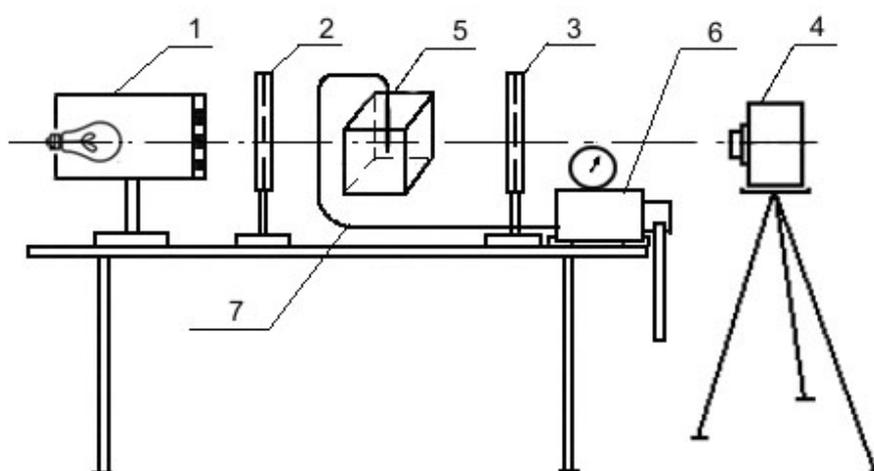
Исходным материалом для изготовления моделей взят плексиглас (орг-

стекло), обладающий достаточной оптической активностью. Применение оргстекла в качестве материала модели обусловлено возможностью визуального контроля процесса трещинообразования.

Развитие трещин под действием внутрискважинного давления в плексигласе, как и в хрупких горных породах, подчиняется механизму хрупкого разрушения, что подтверждается структурометрическим осмотром поверхностей, образованных трещинами внутреннего давления, а также полным смыканием берегов трещин при приложении внешнего сжимающего напряжения [9].

Моделирование процесса гидроразрыва и последующего заполнения трещин сыпучим газопроводящим материалом выполнялось на специально созданном для этих целей лабораторном стенде.

Общий вид стенда и схема расположения его основных узлов приведены на рис. 1.



1 – источник света; 2 – поляризатор; 3 – анализатор; 4 – цифровой фотоаппарат (видеокамера); 5 – оптическая модель; 6 – ручной насос высокого давления (БН-10) с манометром; 7 – трубопровод к герметизатору нагнетательной камеры

Рис. 1 – Схема лабораторного стенда

Стенд оборудован источником освещения 1, поляризатором 2 и анализатором 4, высоконапорным ручным гидравлическим насосом с образцовым манометром 6, трубопроводом 7 к герметизатору нагнетательной камеры оптической модели 5.

Методика проведения лабораторных исследований включала: подготовку моделей из оргстекла; сверление нагнетательных скважин в моделях; герметизацию безраспорным способом камер нагнетания различной длины посредством штуцера с резьбовым соединением; нагнетание рабочей жидкости до давления, приводящего к гидроразрыву и развитию трещин; подращивание трещин за счет подачи в них сыпучего газопроводящего материала; определение силовых параметров разрушения и пределов их изменения; изучение кинетики распространения трещин при различных режимах внутрискважинного нагружения; определение площади и величины раскрытия трещин, а также степени их заполнения

сыпучим материалом с целью предотвращения смыкаемости берегов трещин. Для поэтапной регистрации процесса разрушения моделей из оптически активного материала (оргстекла) трещинами гидравлического разрыва используется скоростная киносъемка и фоторегистрация.

Подготовка моделей из оргстекла (плексигласа) производилась в два этапа. На первом этапе крупные по габаритам плексигласовые блоки с помощью проволоки накаливания распиливаются на более мелкие размерами 200x200x200 мм. Затем на фрезерном станке боковые грани каждого блока обрабатываются фрезой диаметром 250 мм на малых оборотах при интенсивном охлаждении режущей кромки фрезы. В результате фрезерной обработки граней кубических блоков им придается взаимоперпендикулярность граней, а путем шлифования – прозрачность.

Сверление нагнетательных скважин диаметром 10 мм и глубиной 100 мм в моделях проводилось согласно масштабу геометрического подобия и натуре (1). Расположение скважин – симметричное, по отношению к боковым граням. В одной модели высверливается скважина диаметром 10 мм на глубину 90 мм, а затем на глубину 10 мм диаметром 5 мм.

Геометрическое подобие выполняется созданием одинаковой формы скважины для гидроразрыва в моделях и натуре, а также обеспечением масштаба подобия:

$$\alpha = \frac{L_H}{L_M} = 5, \quad (1)$$

где L_H , L_M – соответствующие размеры скважины в натуре и модели.

В соответствии с масштабом подобия определяются размеры как гидроразрывной скважины, так и нагнетательной камеры.

За счет резьбового соединения штуцера со стенками верхней части скважины по длине до 100 мм, зазоры которого перед вкручиванием обрабатываются эпоксидным клеем, обеспечивается надежная герметичность. При этом в системе «ручной насос – трубопровод – нагнетательная камера» выдерживается давление до 60,0 МПа, что вполне достаточно для осуществления гидроразрыва.

Нагнетание рабочей жидкости производится ручным насосом (рис. 1, поз. б) высокого давления (БН-10). Скорость нарастания давления при этом не должна превышать 1-2 МПа/с. Регистрация давления при производстве гидроразрыва осуществляется манометром.

Модель из плексигласа (рис. 1, поз. 5) при этом размещается между плоскими поляризаторами (рис. 1, поз. 2, 3), что дает возможность вести видеозапись изменения поля напряжений, а также трещинообразование в проходящем поляризованном свете от источника (рис. 1, поз. 1) света.

Регистрация процесса разрушения модели осуществляется в реальном режиме времени с помощью цифровой видеокамеры «Sony DCR-NC30E» (рис. 1, поз. 4), позволяющей производить высококачественную видеозапись

на магнитный носитель с частотой 25 кадр/с и последующим переносом отдельных кадров на цифровой носитель – чип-карту.

Кроме того, для контроля видеозаписи видеокамерой производится дополнительная видеосъемка цифровым фотоаппаратом «Sony DSC-T5» (рис. 1, поз. 4) с частотой 30 кадр/с, что дает возможность анализировать видеоклипы на мониторе компьютера.

Для обработки на компьютере полученных при моделировании данных целесообразно использовать специальную программу для работы с видеоизображениями, например «Sony Vegas 5.0», которая предоставляет возможность сделать точную раскадровку видеозаписи.

С применением поляризационной установки (рис. 1) в процессе лабораторных исследований было выполнено 5 экспериментов.

Для определения площади трещины и ее динамики развития использовано компьютерную программу для редактирования графики «Adobe Photoshop CS2», которая позволяет наложить изображения (кадры) послойно для определения границ трещины за один кадр (1/30 с). На рис. 2 представлена схема развития трещины одного из 5-ти экспериментов без цветовой гаммы, изменяющегося поля напряжений.

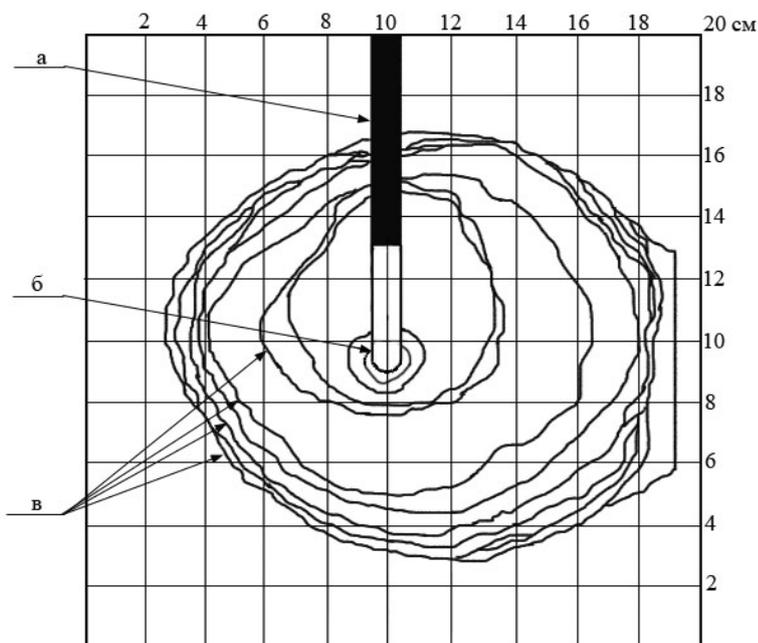
В общем, анализируя результаты эксперимента гидроразрыва можно сделать следующие выводы:

- зарождение трещины происходит со дна нагнетательной камеры экспериментальной скважины, при этом трещина приобретает форму, близкую к овальной (как видно по схеме (рис. 2));
- плоскость трещины ориентированна под некоторыми углами к продольной оси скважины и к оси визирования;
- с течением времени образование трещины происходит в разных направлениях неравномерно, трещина (ее площадь) растет до предела ограниченного размерами модели.

Зная приращение берега трещины по любому направлению от дна нагнетательной камеры и время, за которое произошло приращение, можно определить скорость роста трещины (по результатам раскадровки образование трещины до выхода ее на грань модели длилось 0,4 с (12 кадров)).

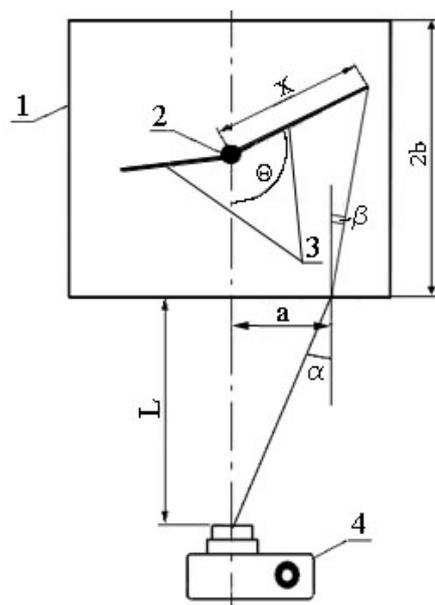
Согласно общепринятой методике, по схеме развития трещины (рис. 2) проложив вектор в любом направлении от дна нагнетательной камеры можно было определить приращение берега трещины за время кадра (1/30 с). Но, как уже отмечалось, трещина имеет определенные наклоны относительно продольной оси скважины и оси визирования, к тому же следует учитывать преломление света материала модели, следовательно, изображения трещины, полученные при видеосъемке, имеют мнимый характер.

Введение поправок на угол отклонения трещины и преломление света даст возможность определить реальные размеры трещины, а также скорость ее развития. Расчетная схема для нахождения реального размера трещины, где для упрощения трещина представлена как прямая линия 3 от скважины 2, изображена на рис. 3.



а – герметизатор; б – нагнетательная камера; в – границы трещины, определенные по кадрам видеосъемки

Рис. 2 – Схема развития трещины



1 – модель; 2 – скважина; 3 – трещина; 4 – цифровая фотокамера
 Рис. 3 – Расчетная схема для определения реального размера трещины с учетом преломления материала модели и угла отклонения от визирной оси

Исходя из расчетной схемы (рис. 3) фактическая длина трещины равна:

$$x = \frac{\left(\sqrt{a^2 + b^2}\right) \cdot \sin\left[90^\circ - \arctg(b/a) + \beta\right]}{\sin\left[180^\circ - \Theta - \beta\right]}, \quad (2)$$

где a – видимая (мнимая) длина трещины; b – половина длины модели (расстояние до скважины); β – угол преломления света

$$\beta = \arcsin [\sin(\arctg(a/L))/n], \quad (3)$$

где L – расстояние по визирной оси от передней грани модели до фотокамеры; n – показатель преломления света в плексигласе (оргстекло)[10]; Θ – угол отклонения относительно оси визирования (определяется транспортиром).

В итоге вычислений по формулам (2, 3) определены реальные размеры трещины при различных углах трещины относительно оси визирования (рис. 4).

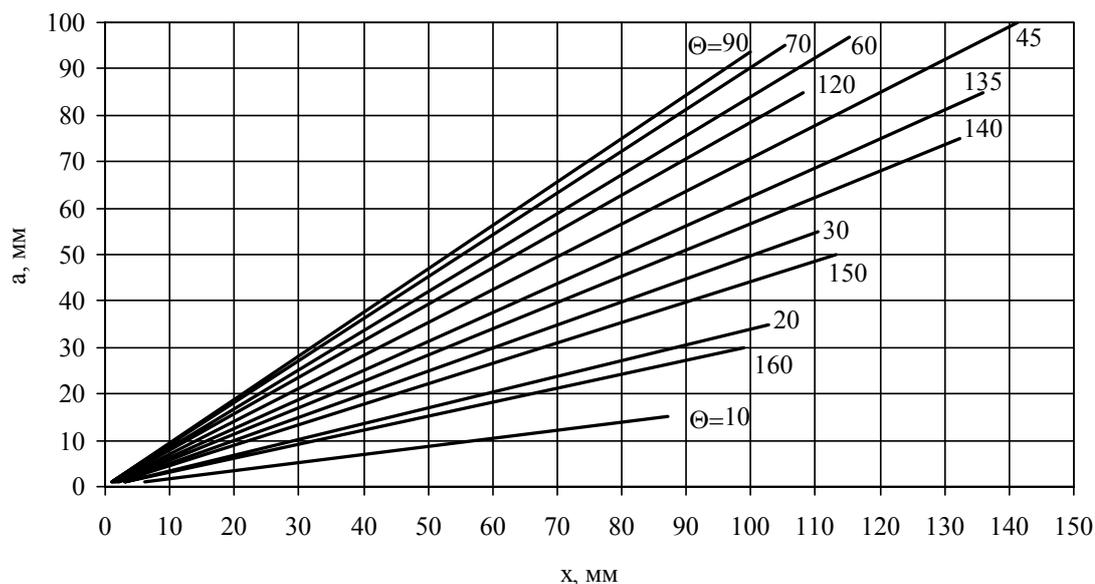


Рис. 4 – Зависимость реальной длины трещины x от длины a , определенной палеткой, при различных углах Θ относительно оси визирования

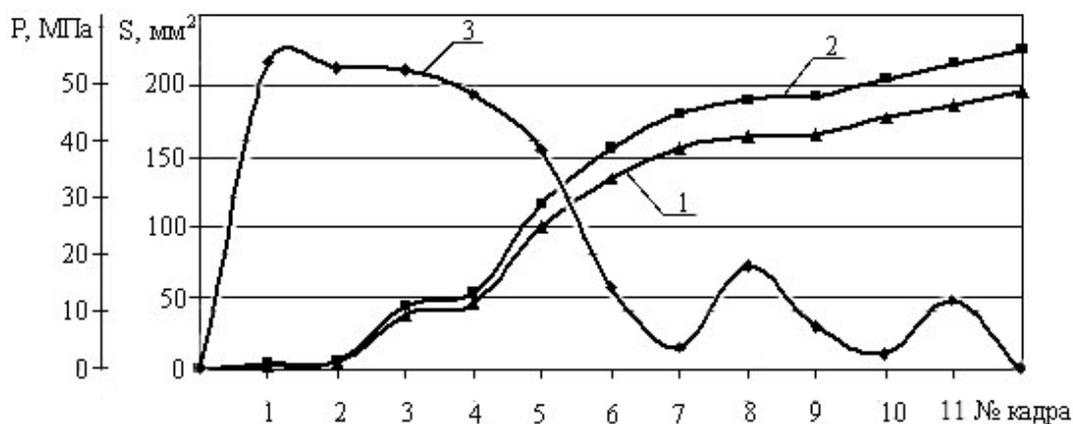
При этом следует отметить, что при образовании трещины вдоль оси визирования определить фактическую длину трещины невозможно и эксперимент следует считать неудавшимся.

В нашем же случае трещина образовалась практически перпендикулярно оси визирования, что дает хорошую возможность для анализа динамики ее развития.

На рис. 5 представлено два графика увеличения площади трещины за время гидроразрыва (поз. 1, 2); она увеличивается до выхода ее на грань модели. График 1 – изменение площади, определяемой с помощью палетки, а график 2 показывает изменение реальной площади с учетом поправок на отклонение трещины от визирной оси и преломление плексигласа.

Итак, площадь (определенная с помощью наложения палетки) образовавшейся трещины составляет $S=195,5 \text{ см}^2$, а с учетом поправок величина реальной площади больше видимой и равна $S=225,8 \text{ см}^2$. Погрешность при определении равна 13%.

Разрыв начинается при критическом давлении около $P_{KP} = 54,0$ МПа (рис. 5, поз. 3), что меньше предела прочности материала (плексигласа) модели на разрыв $\sigma_p = 60,0$ МПа. С увеличением площади до $180,0$ см² давление ритмично падает, после чего наблюдаются всплески давления с затуханием до 0, что свидетельствует о неравномерности процесса трещинообразования, хотя площадь продолжает расти до выхода на грань модели.



1 – видимая площадь; 2 – реальная площадь; 3 - давление

Рис. 5 – Динамика изменения площади трещины при различных давлениях

Зная реальные размеры трещины и приращение её берега, можно определить скорость её азования.

В процессе гидроразрыва трещина принимает форму близкую к овальной (рис. 2), поэтому скорость приращения ее берега на различных участках относительно продольной оси скважины – неодинакова.

В таблице 1 приведены скорости приращения берега трещины, определенные путем наложения векторов в 4-х направлениях от дна нагнетательной камеры (места зарождения трещины) до конечной границы трещины под произвольными углами к продольной оси.

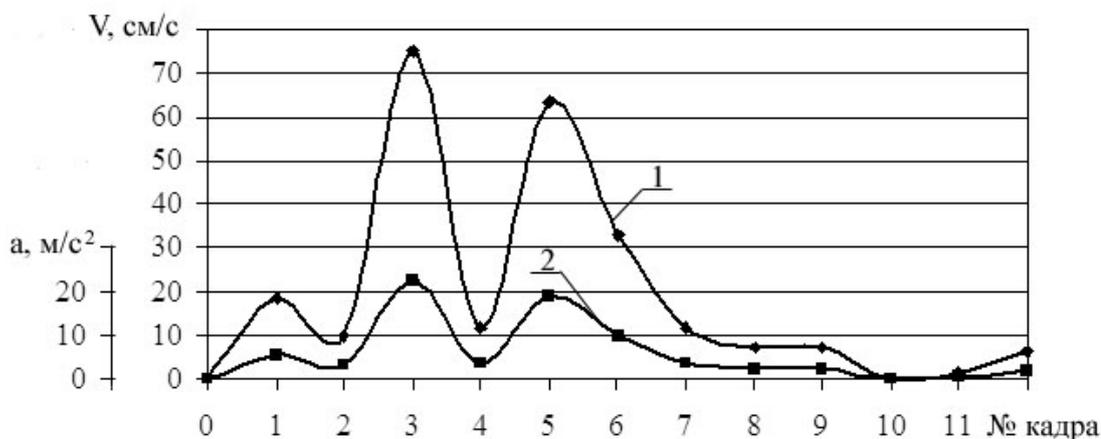
Таблица 1 – Скорости роста трещины в различных направлениях от дна скважины, м/с

№ кадра / градусы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
20°	0,15	0,13	1,53	0,05	0,28	0,36	0,06	0	0,08	0	0	0
90°	0,21	0,11	0,52	0,21	0,89	0,57	0,03	0,11	0	0	0,05	0,26
180°	0,16	0,06	0,14	0,09	0,87	0,17	0,25	0,09	0,10	0	0	0
315°	0,23	0,16	0,81	0,12	0,49	0,21	0,12	0,08	0,11	0	0	0

Из анализа данных, приведенных в таблице 1, следует, что скорость роста трещины в 10 кадре равна 0, но по графику 2 (рис. 5) площадь трещины продолжает расти. Вероятно, есть приращение берегов трещины в других на-

правлениях. Скорость роста при этом изменяется от 0 до 1,53 м/с.

Динамика изменения скорости и ускорения роста площади трещины до выхода ее на грань модели представлена на рис. 6.



1 – скорость; 2 – ускорение

Рис. 6 – Динамика изменения скорости и ускорения развития площади трещины

Скорость увеличения площади трещины изменяется в пределах от 0 до 0,75 м/с, однако при этом отмечается три экстремума: 0,75; 0,63 и 0,18 м/с (рис. 6, поз. 1), что подтверждает неравномерность изменения площади в процессе гидроразрыва. Ускорение имеет аналогичную динамику, как видно по графику 2 (рис. 6), и изменяется от 0 до 22,5 м/с² с тремя экстремальными значениями: 22,5; 19,0; 5,5 м/с².

Анализируя вышеприведенные результаты моделируемого процесса гидроразрыва можно сделать следующие выводы:

- зарождение трещины происходит со дна нагнетательной камеры экспериментальной скважины, при этом трещина приобретает форму, близкую к овальной;

- плоскость трещины ориентированна под некоторыми углами к продольной оси скважины и к оси визирования, что дает погрешность равную 13% при определении размеров трещины;

- с течением времени образование трещины происходит в разных направлениях неравномерно, трещина (ее площадь) растет до предела ограниченного размерами модели;

- процесс гидроразрыва протекает неравномерно во времени со скоростью роста площади трещины от 0 до 0,75 м/с и ускорением – 0-22,5 м/с².

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борисенко С.Г., Вардерасян Г.В. Исследование напряжений вокруг выработок в условиях объемной задачи // Горный журнал. Известия Вузов. – 1965. - № 12. – С. 23-27.
2. Трумбачев В.Ф., Молодцова Л.С. Применение оптического метода для исследования напряженного состояния пород. – М.: АН СССР, 1963. – 95 с.
3. Трумбачев В.Ф. Изучение распределения напряжений вокруг горизонтальных выработок оптическим методом // Исследование горного давления. – М., 1960. – С. 23-27.

4. Савин Г.Н. Концентрация напряжений около отверстий. – М.-Л.: Гостехиздат, 1951. – 496 с.
5. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. – М.: Наука, 1965. – 388 с.
6. Сурков А.И. Исследование напряженного состояния пород вокруг горных выработок на объемных моделях методом фотоупругости. – Л.: ВНИМИ, 1961. – Вып. 4. – 94 с.
7. Сурков А.И., Трумбачев В.Ф. Исследование распределения напряжений на объемных моделях оптическим методом // Научная и техническая информация. – М.: ЦИТИ Угля, 1958. – Вып. 3. – 25 с.
8. Фрохт М.М. Фотоупругость: Поляризационно-оптический метод исследования напряжений. – М.-Л.: Гостехиздат, 1950. – Т. 2. – 488 с.
9. Кулинич В.С., Шевелев Г.А., Егоров С.И. Методы и средства определения параметров геомеханического состояния газоносного породного массива. – Донецк: ЦБНТИ, 1994. – 202 с.
10. Законы, формулы, задачи физики. Справочник. Гофман Ю.В. – К., «Наук. думка», 1977. – 567 с.

УДК 622.271

Б.Е. Собко, вед. науч. сотр.,

В.В. Марченко, мл. науч. сотр., НГУ

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ВСКРЫШНЫХ РАБОТ ПРИ ОСВОЕНИИ РОССЫПНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Надані діючі та можливі до застосування технологічні схеми розробки розсипних горизонтальних родовищ та розроблена методика вибору найбільш раціональної з них.

DEVELOPING PROCEDURE OF CHOOSING THE MOST EFFICIENT APPLICATION PROCESSING SCHEME OF LEVEL DISSEMINATED DEPOSITS FIELD DEVELOPMENT

The existing and possible to application processing schemes of level disseminated deposits field development are presented and procedure of choosing of most efficient scheme.

В Украине разработан и принят ряд общегосударственных и отраслевых программ развития минерально-сырьевой базы страны, среди них «Национальная программа развития и реформирования горно-металлургического комплекса до 2010 года», которая направлена на развитие и усовершенствование горно-добывающей отрасли. В этой связи разработка методов выбора рациональных схем разработки месторождений повышающих эффективность и стабильность работы горно-добывающего предприятия является своевременной и актуальной научной задачей.

Большое разнообразие применяющихся, а также освоение технологически возможных схем производства вскрышных и добычных работ на эксплуатируемых и вновь осваиваемых россыпных месторождениях вызывает необходимость выбора наиболее рациональной и эффективной из них.

Как показывает теория и практика проектирования открытой разработки горизонтальных месторождений [1], залегающих на глубинах до 15-20 м, основными технологическими схемами их разработки являются бестранспортные и транспортные схемы, при этом широко применяется гидромониторный размыв полезного ископаемого и его гидротранспорт на обогатительную фабрику.

Для месторождений, залегающих на глубинах 25÷50 м характерно применение технологических схем с комбинированной системой разработки, кото-