

УДК 622.234.573.001.57:622.023.62

д-р техн. наук, проф. В.Г. Перепелица,  
канд. техн. наук, ст. науч. сотр. Л.Д. Шматовский,  
канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр. А.Н. Коломиец,  
инженер А.И. Пугач  
(ИГТМ им. Н.С.Полякова НАН Украины)

## **МЕТОДИКА ОПТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В ЗАБОЯХ РАЗЛИЧНЫХ ФОРМ С ЦЕЛЮ ПОВЫШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ВЫРАБОТОК**

Приведена методика моделирования распределения напряжений в забоях различных форм с использованием объемных или плоских моделей из оптически активных материалов.

## **METHOD OF OPTICAL SIMULATION FOR STRESSES DISTRIBUTION IN THE COALFACES OF DIFFERENT TYPES WITH THE AIM TO IMPROVE ROADWAY STABILITY**

The article presents method of optical simulation for stresses distributed in the coalfaces of different types by using or plane models made of optically active materials.

Экспериментальные исследования напряженного состояния горных пород в окрестности забоев, проводимые в натуральных условиях, позволяют получить наиболее достоверные данные. Однако трудоемкость, продолжительность и практическая неосуществимость варьирования напряженным состоянием в достаточно широких пределах существенно снижают эффективность использования этого метода.

В этой связи для получения качественной картины и некоторых количественных характеристик распределения напряжений в забоях различных форм целесообразно применить метод оптического моделирования с использованием объемных или плоских моделей из оптически активных материалов. Этот метод широко используется для изучения напряжений вокруг горных выработок при решении различных горнотехнических задач [1,2,3 и др.]. Основные методические положения оптического моделирования изложены в работах [1,2,3 и др.].

Горные породы при этом способе моделирования принимаются как сплошные изотропные упругие тела. Основными критериями подобия являются геометрическое подобие систем, подобие условий на границах и подобие начальных состояний систем.

Геометрическое подобие предполагается выполнить созданием одинаковой формы выработок в моделях и натуре, а также обеспечением масштаба подобия

$$\alpha = \frac{L_n}{L_m} = 200, \quad (1)$$

где  $L_n, L_m$  - соответствующие размеры выработки природы и модели.

Условиями на границах модели являются напряжения, соответствующие начальным напряжениям в центре будущей выработки.

Выбор начальных условий производится на основе исследований [3], определяющих поле напряжений вокруг выработки как неравнокомпонентное. В этой связи соотношение между напряжениями, действующими в горизонтальной  $G_r$  и вертикальной  $G_e$  плоскостях, приняты:

$$\lambda = \frac{\sigma_r}{\sigma_e} = 0,4, \quad (2)$$

где  $\lambda$  - коэффициент бокового отпора.

За основу принята вертикальная составляющая  $G_e$ , имеющая наибольшую величину и определяемая в соответствии с глубиной разработки, согласно [2], как

$$\sigma_e = \gamma H, \quad (3)$$

где  $\gamma$  - усредненный объемный вес пород над рассматриваемой точкой, Н/м<sup>3</sup>;  
 $H$  - глубина расположения рассматриваемой точки, м.

Подобие начальных состояний систем при исследовании упругих изотропных тел удовлетворяется автоматически, поскольку деформации и напряжения при этом не зависят от первоначальных состояний, а определяются суммой сил, действующих на данную систему, вне зависимости от времени ее приложения.

Для моделирования выбраны следующие модели забоев выработок: цилиндрическая выработка с плоским забоем; сводчатая выработка с частично оконтуривающей по своду и бокам щелью; цилиндрическая выработка с опережающей кольцевой щелью; цилиндрическая выработка с полусферическим забоем. Диаметр проводимой в натуре выработки принят равным 3,2 м, длина опережающей - щели - 3 м, ширина - 0,4 м, глубина разработки - 1000 м.

Объемные модели представляют собой цилиндры, диаметр и высота, которых равны друг другу и составляют 120 мм. Схемы моделей приведены на рис.1. Нагрузка на модель определена из условий создания в ней напряжений, не превосходящих предел пропорциональности материала модели.

Вертикальные напряжения в натуре на глубине 1000 м при среднем объемном весе налегающих пород  $25 \cdot 10^5$  Н/м<sup>3</sup>, согласно (3), равны:

$$\sigma_{e.n.} \gamma H = 25 \cdot 10^6, \text{ Па.}$$

Горизонтальные напряжения при коэффициенте бокового отпора  $\lambda = 0,4$  будут

$$\sigma_{r.n.} = \sigma_{e.n.} \cdot \lambda = 10 \cdot 10^6, \text{ Па.}$$

Принимая масштаб силового подобия  $\beta = 50$ , соответствующие давления для модели определяются:

$$\sigma_{e.m.} = \frac{\sigma_{e.n.}}{\beta} = 0,5 \cdot 10^6, \text{ Па,}$$

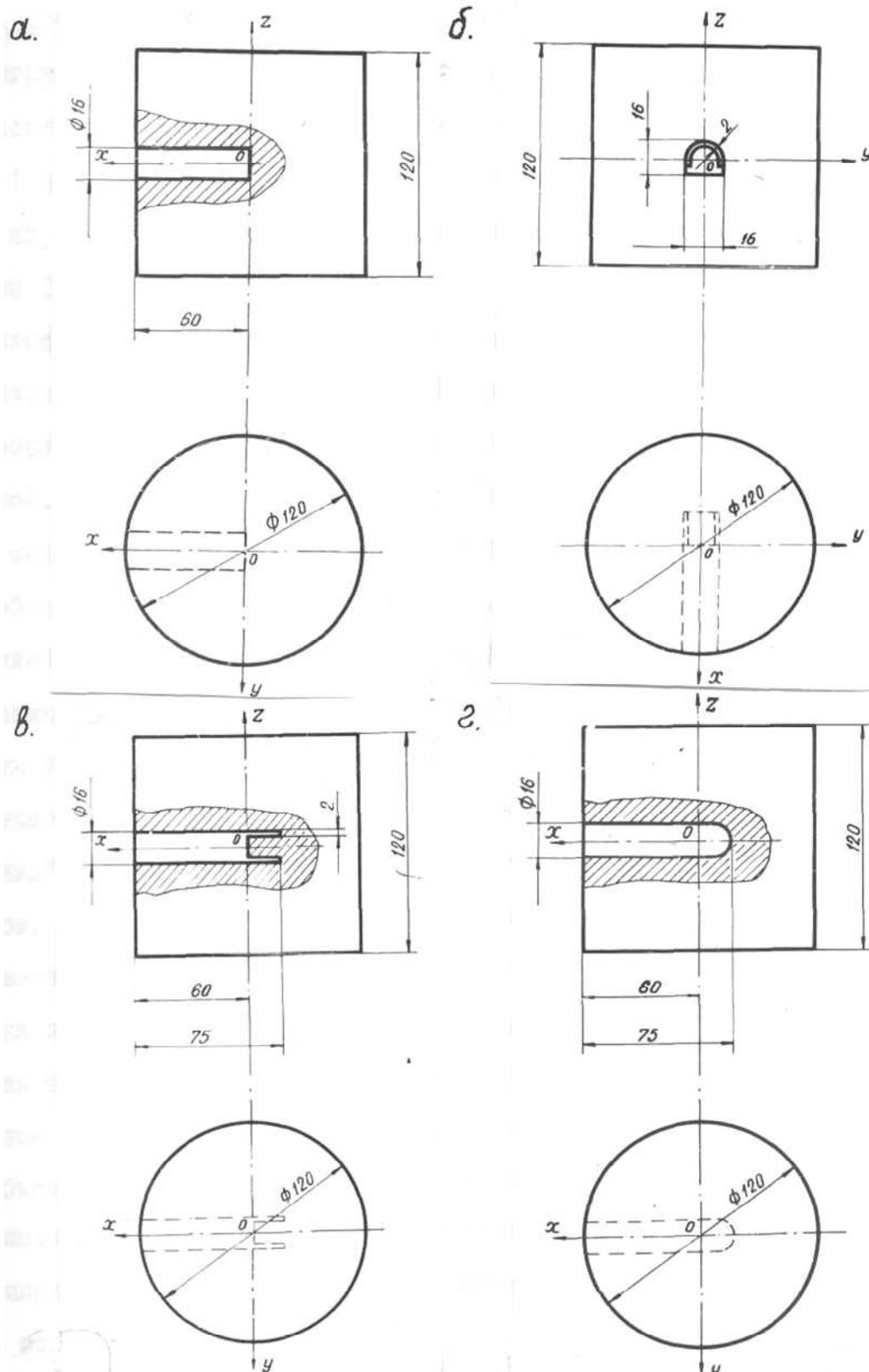


Рис.1 – Схемы моделей: а) цилиндрической горизонтальной выработки с плоским забоем; б) сводчатой выработки с частично оконтуривающей по своду и бокам щелью; в) цилиндрической выработки с опережающей кольцевой щелью; г) цилиндрической выработки с полусферическим забоем

$$\sigma_{Г.м.} = \frac{\sigma_{Г.н.}}{\beta} = 0,2 \cdot 10^6, \text{ Па.}$$

Исходными материалами для изготовления моделей взяты эпоксидная смола ЭД-6, на 100 весовых частей которой добавляется 30 весовых частей малеинового ангидрида и 15 весовых частей пластификатора - дибутилфталата.

Из указанных компонентов приготавливаются модели, в которых высверливаются отверстия, имитирующие выработку с соответствующей формой забоя, а специальным приспособлением образуются опережающие щели. Температурные режимы полимеризации, отжига и "замораживания" моделей выдерживаются, согласно известным методикам [4,5]. Предел пропорциональности материала при температуре "замораживания" достигает  $1,2 \cdot 10^6$  Па.

Нагружение моделей производится в специальном нагрузочном устройстве, принципиальная схема которого приведена на рис.2. Модель I помещается в камеру 3, в которую затем подается сжатый воздух из баллона 8 через редукционные вентили 6 и 7. С помощью мембраны 10 камера разделена на две несообщающиеся полости, что позволяет создавать неравнокомпонентное нагружение моделей. Вертикальное давление передается на модель через мембрану 10, а горизонтальное - создается сжатым воздухом в полости под мембраной. Давление воздуха в полостях контролируется образцовым манометром 5. Отверстие в модели I, имитирующее выработку, сообщается с внешней средой с помощью трубки 4. Это исключает появление по контуру отверстия противодавления в результате расширения воздуха при нагреве. Камера с моделью опускается в масляную утепленную ванну, температура нагрева контролируется контактными термостатами 9. После прогрева до температуры "замораживания" к модели прикладывается постоянная нагрузка сжатым воздухом, а затем при достижении комнатной температуры модель разгружается. В полученных таким способом моделях после снятия нагрузки внутренние напряжения полностью сохраняются [5].

Для того чтобы при исследовании по пути светового луча напряженное состояние практически не менялось, то есть было плоским, объемные модели, расчленяются на шлифы толщиной 2 мм. Распиловка модели производится в проточной воде алмазными дисками. Полученная при распиловке гладкая поверхность не требует дальнейшей механической обработки.

Выбор сечений соответствующих шлифов (рис.3) производится с таким учетом, чтобы получить картину распределения напряжений для наиболее характерных участков выработки. Для каждой модели необходимо сделать вертикальное сечение, проходящее через плоскость  $XOZ$ , и 5...9 горизонтальных сечений, параллельных плоскости  $XOY$ . Расположение сечений и линий расшифровки показано на рис.4, 5.

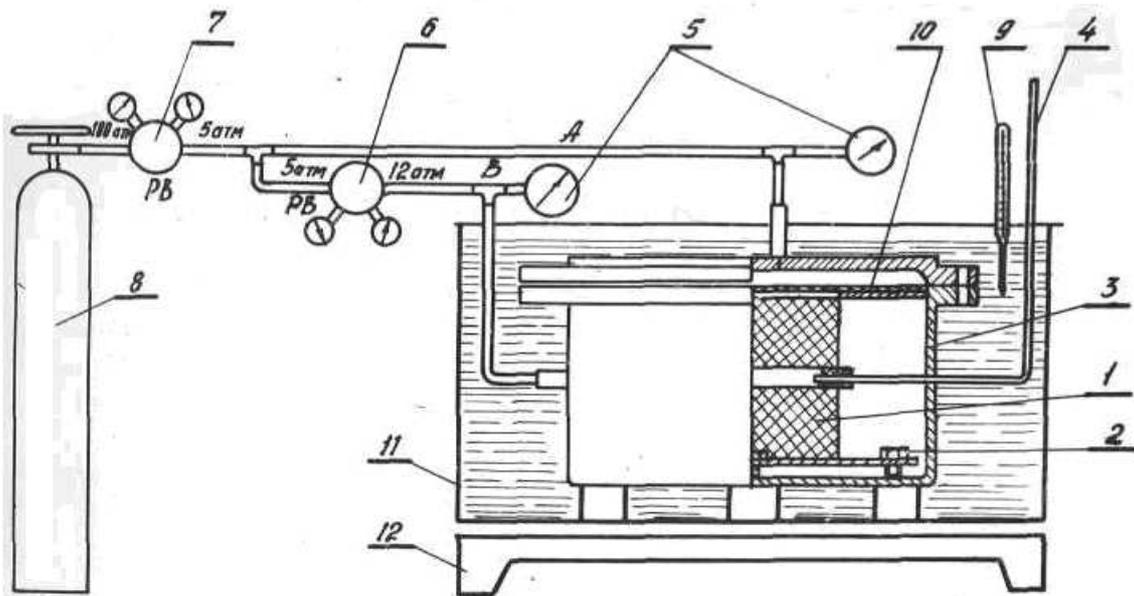


Рис.2 – Схема нагрузочного устройства

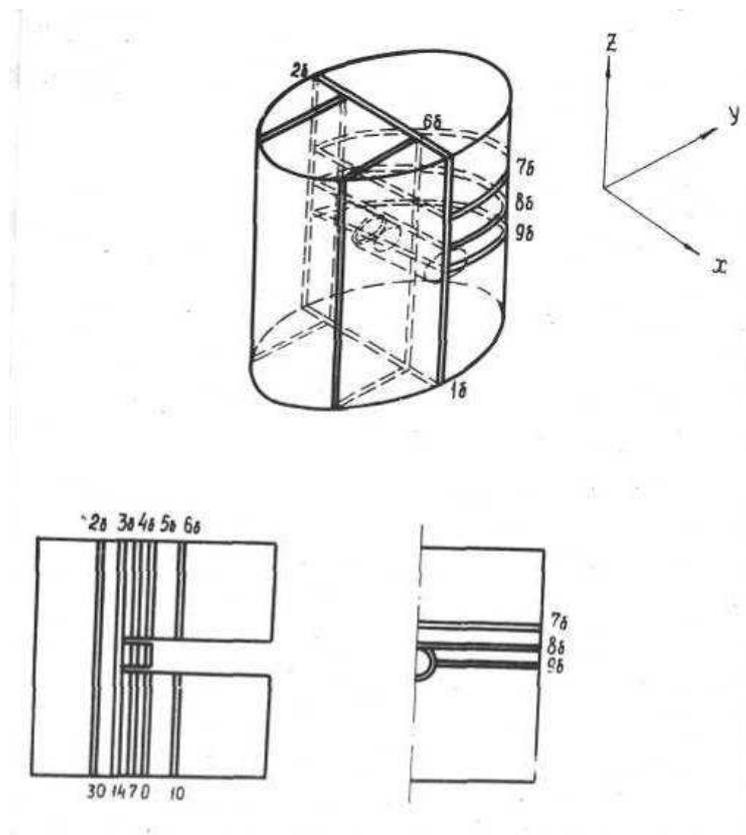


Рис.3 – Схема расположения шлифов модели

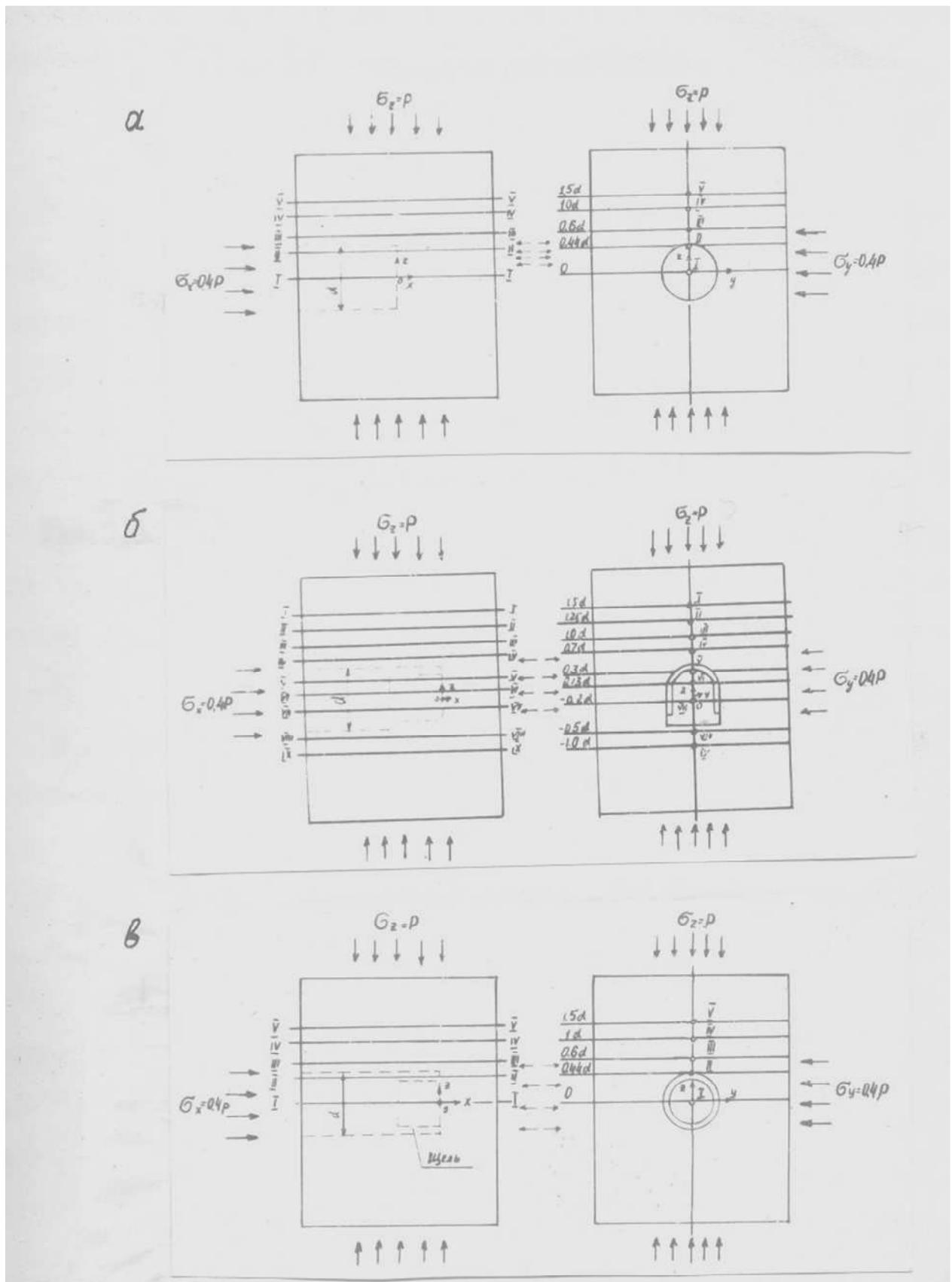


Рис.4 – Схема расположения сечений и линий распиловки в моделях:  
 а) с плоским забоем; б) с частично оконтуривающей щелью;  
 в) с кольцевой опережающей щелью

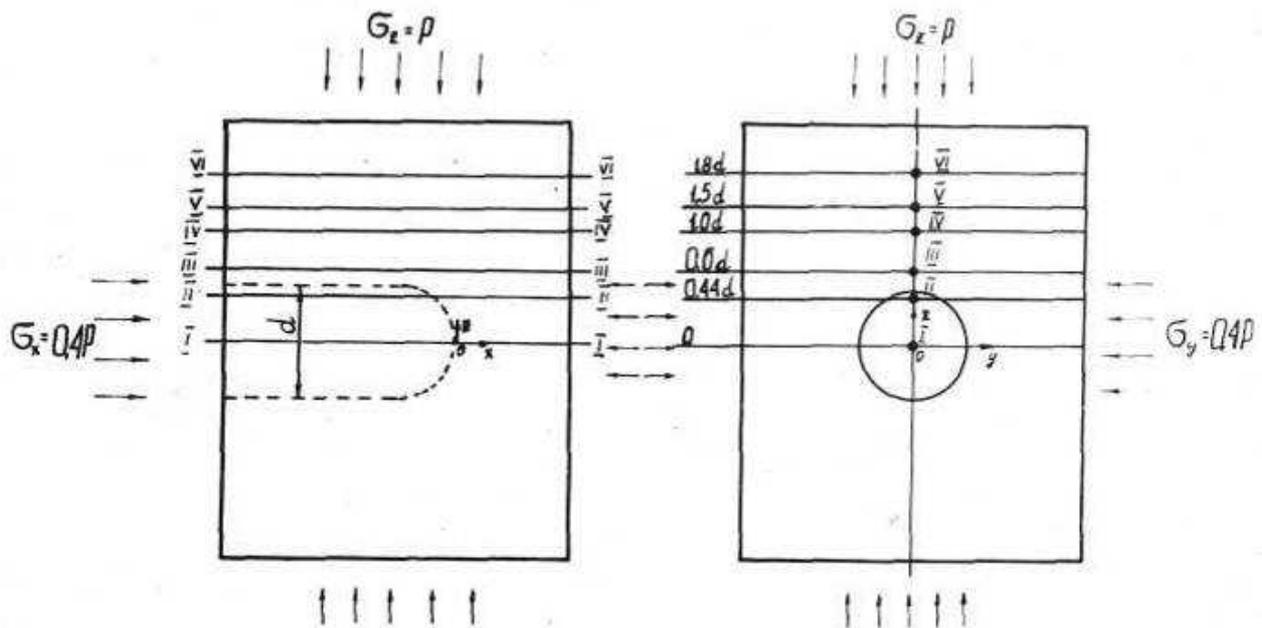


Рис.5 Схема расположения сечений и линий расшивки в модели с полусферическим забоем

При распиловке моделей на шлифы необходимо максимально использовать их симметрию относительно горизонтальной плоскости, проходящей через ось выработки. Это позволяет получить необходимые горизонтальные и вертикальные срезы распиловкой только одной модели, используя для получения шлифов определенного типа одну из ее симметричных частей. При нарушении этой симметрии, что будет иметь место в модели с выработкой сводчатой формы, необходимо изготовить две идентичные модели с последующей распиловкой каждой из них на вертикальные либо горизонтальные шлифы.

Напряжения в полученных таким образом срезах из объемных моделей анализируются на поляризованной установке (рис.б), состоящей из источника света 1, поляризатора 2 с пластиной в четверть волны и анализатора 3 с пластиной в четверть волны. Получаемая интерференционная картина снимается фотоаппаратом 4.

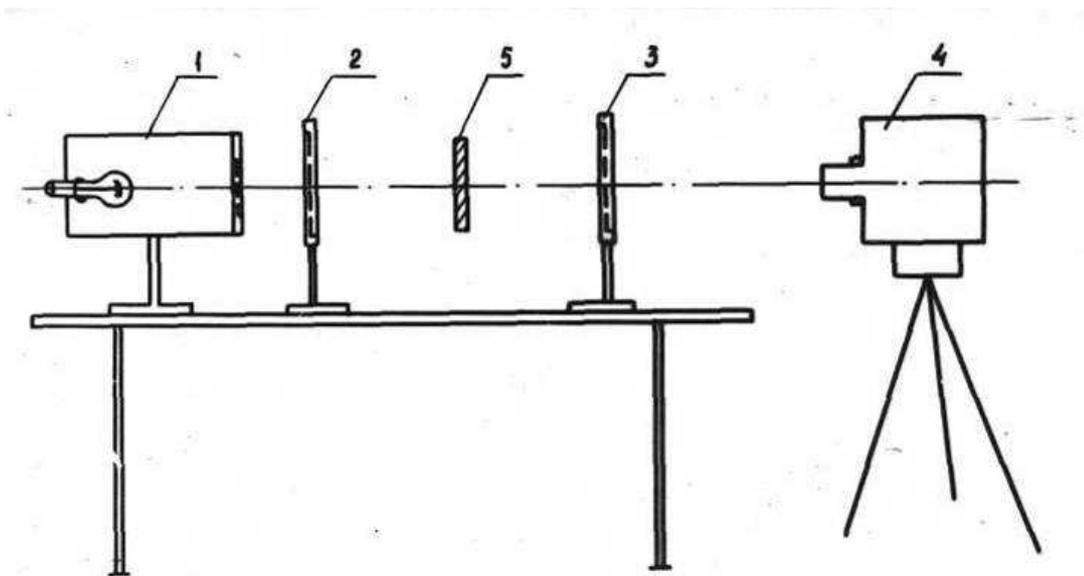


Рис.6 – Схема поляризационной установки

Фотографирование распределения величин максимальных касательных напряжений (изохром) производится в монохромическом свете, поляризованном по кругу с помощью пластинок в четверть волны. Картина изоклин-линий главных напряжений определенного направления снимется в плоскополяризованном свете при различных углах поворота плоскости поляризации, соответствующих параметрам изоклин. Для получения поля изоклин с параметрами в интервале от 0 до 1,57 рад скрещенные анализатор и поляризатор устанавливаются на нулевом столбе с последующим синхронным поворотом их на 0,17...0,26 рад. При каждом фиксированном положении анализатора и поляризатора производится фотографирование изоклин на фотопленку. Полученные фотоснимки интерференционных картин изоклин и изохром в масштабе 1:1 подвергаются дальнейшему анализу.

Поляризационно-оптический метод исследования позволяет непосредственно определить в плоских пластинах направление главных нормальных напряжений. Разность этих напряжений определяется из выражения

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{\delta}{cd}, \quad (4)$$

где  $\sigma_1, \sigma_2$  - соответственно максимальные и минимальные главные напряжения;  $\delta$  - разность хода в порядках полос;  $c$  - оптическая постоянная материала;  $d$  - толщина исследуемой пластины.

Для определения разностей ( $\sigma_1 - \sigma_2$ ) используется метод полос, как наиболее эффективный при исследовании моделей, изготовленных из материалов с высокой оптической чувствительностью. В этом случае представляется возможным получить картину распределения напряжений с достаточно большим порядком полос, чтобы определить разность значений ( $\sigma_1 - \sigma_2$ )

простым подсчетом числа полос [5].

Из анализа фотоснимков интерференционных картин также будут получены картины направлений главных касательных напряжений (изостаты). Расшифровку необходимо вести по линиям, расположенным на вертикальной плоскости симметрии моделей, параллельным оси выработки и отстоящим от нее на расстояниях, различных для каждой модели.

Для разделения главных напряжений следует применить наиболее распространенный метод графического интегрирования дифференциальных уравнений равновесия.

Полученные на основе приведенной методики данные о качественном и количественном характере распределения напряжений, обусловленных, как горным давлением, так и конфигурацией забоя, позволят обоснованно подойти к выбору способа проведения и крепления выработки, а также обеспечения ее устойчивости в период эксплуатации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борисенко В.Г. Исследование напряжений вокруг выработок в условиях объемной задачи / В.Г. Борисенко, Г.В. Вардересян // Известия ВУЗов, 1965. - № 12. – С. 23-27.
2. Трумбачев В.Ф. Применение оптического метода для исследования напряженного состояния пород / В.Ф. Трумбачев, Л.С. Молодцова. – М.: АН СССР, 1963. – 95 с.
3. Трумбачев В.Ф. Изучение распределения напряжений вокруг горизонтальных выработок оптическим методом / В.Ф. Трумбачев // Исследование горного давления. - М., 1960. – С. 23-27.
4. Сурков А.И. Исследование напряженного состояния пород вокруг горных выработок на объемных моделях методом фотоупругости / А.И. Сурков. - Л.: ВНИМИ, 1961. – Вып. 4. – 94 с.
5. Сурков А.И. Исследование напряжений на объемных моделях оптическим методом: научная и техническая информация / А.И. Сурков, В.Ф. Трумбачев. – М.: ЦИТИ угля, 1958. – Вып. 3. – 25 с.