Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. XLVIII, вып. 1, 1963 г.

УДК 622.83.620.171.5.001.5

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОМ ФОТОУПРУГОСТИ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПОРОД ВОКРУГ ПОДЭТАЖНЫХ ШТРЕКОВ НА МОЩНЫХ КРУТОПАДАЮЩИХ ПЛАСТАХ

Е. А. Зимина, Е. Н. Тарасенко

При разработке мощных крутопадающих пластов с разделением этажа на подэтажи (например, на гидрошахтах) необходимы эффективные средства поддержания подэтажных штреков. Крепь должна обеспечивать надежную устойчивость штреков и простоту ее установки — условия для высоких темпов проходки штреков комбайнами или гидромониторами. Тип такой крепи в первую очередь зависит от величины горного давления, которое является результатом распределения напряжений в массиве пород вокруг выработки.

Наряду с натурными наблюдениями и моделированием с помощью эквивалентных материалов при изучении напряженного состояния массива пород все чаще используется метод фотоупругости. Моделирование этим методом нами применялось для установления характера влияния очистных работ при отработке отдельных подэтажей мощного крутопадающего пласта на распределение напряжений вокруг подэтажных штреков, находящихся в зоне надработки. Работа проводилась применительно к условиям гидроучастка шахты «Красногорская» комбината Кузбассуголь. Решение такой задачи возможно только на объемной модели, так как наличие нескольких подготовительных выработок (подэтажных штреков и ортов) и выработанного пространства создает в массиве пород в натуре объемное напряженное состояние. Моделирование подобных процессов на объемных моделях из оптически активных материалов, в отличие от других методов исследования, позволяет оценивать напряженное состояние в любой точке моделируемого породного массива.

Для правомерности постановки исследований на моделях из оптически активного материала мощный пласт, по которому пройдены выработки, и вмещающие породы приняты в виде сплошного изотропного и линейно деформируемого массива. Такое допущение, как известно, не обеспечивает действительной количественной оценки напряжений в массиве пород, но позволяет с известным приближением получить качественную картину распределения напряжений и установить некоторые практически ценные относительные величины. Сопоставляя результаты с данными, полученными на моделях из эквивалентных материалов и при натурных наблюдениях, можно получить более полное представление о напряженном состоянии породного массива, а следовательно, и устойчивости выработок.

Для моделирования был принят участок мощного (10 *м*) крутопадающего (65—70°) пласта длиной по простиранию 60 *м*, включающий четыре подэтажа наклонной длиной 8 *м* каждый. Изготовлялись две модели: в модели I имитировались только подэтажные штреки и орты, а в модели II — те же выработки, но при наличии выработанного пространства в первом, втором и третьем (считая сверху) подэтажах. Очистные работы вышележащего подэтажа опережали в натуре очистные работы нижележащего на 15—20 *м*.

Объемные модели изготовлялись в виде кубов размером 12×12×12 *см* из оптически активного материала, состоящего из эпоксидной смолы Э-40, малеинового ангидрида (30 весовых частей от веса смолы) и дибутилфталата (5 весовых частей).

Режим отвердения осуществлялся по методике, принятой в лаборатории оптического моделирования Ленинградского горного института

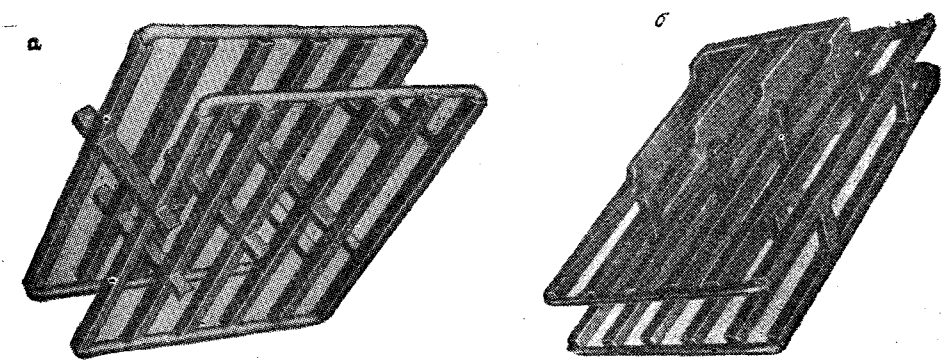


Рис. 1. Вкладыши, моделирующие:
а — подэтажные штреки и орты; *б* — надработку подэтажных штреков очистными работами

для блоков весом более 2 *кг*. Общий срок отвердения 8 суток. Для создания в моделях сети выработок, геометрически подобных натуре, применялись вкладыши из сплава металлов с температурой плавления, равной заданной. Вкладыши (рис. 1) вставлялись в формы моделей до заливки их смолой и после отвердения выплавлялись в термостате при температуре отжига. Геометрический масштаб моделирования 1 : 500.

Для создания нагрузок от собственного веса пород, подобных натурным условиям, модели нагружались центробежными силами в центрифуге. Возникавшие при этом в модели напряжения «замораживались». Температурный режим замораживания в стаканах центрифуги, куда помещались модели, создавался изменением напряжения тока, подводившегося к нагревательным элементам, и регулировался двумя автотрансформаторами [1]. Общее время вращения центрифуги с моделями 23 *ч*.

Коэффициент центрифугирования, характеризующий степень увеличения собственного веса моделей

$$K_{\text{ц}} \quad \frac{\omega^2 R}{g} = \left(\frac{\pi n}{30}\right)^2 \frac{R}{g},$$

где ω — угловая скорость вращения, *об/мин*;

R — радиус вращения центрифуги (в нашем опыте равен 65 *см*);

n — число оборотов коромысла центрифуги, *об/мин*.

После замораживания напряжений по четырем характерным сечениям модели вырезались шлифы толщиной 2—3 *мм*, по которым после соответствующей обработки определялись компоненты напряжений [2, 3].

В качестве таких сечений в модели I с подэтажными штреками были приняты шлифы *1—4* и в модели II с выработанным пространством в тех же местах соответственно *1а—4а*. Шлиф *1а* захватывает выработанное пространство трех верхних подэтажей, шлиф *2а* — двух верхних подэтажей, шлиф *3а* — одного верхнего подэтажа, шлиф *4а* расположен в 11 *м* впереди очистного забоя верхнего подэтажа.

Для расшифровки напряженного состояния массива пород по исследуемым сечениям были получены картины изохром, которые фотографировались на поляризационной установке FMB-56. По полям изохром строились изоклины на оптических установках ППУ-7 и КСП-5. Цена полосы материала моделей $\tau^{1,0} = 0{,}14$ *кг/см*^{2} определена по приготовленному эталону. Величина разности хода лучей δ измерялась методом компенсации и методом полос. Разделение главных напряжений производилось методом численного интегрирования дифференциальных уравнений равновесия, для чего на поле каждого шлифа наносилась сетка.

В статье приведены данные только по двум наиболее характерным шлифам *2* и *2а* (рис. 2, 3, 4).

Для расшифровки напряженного состояния пород вокруг штреков получены изохромы (рис. 2, *а*) и построены изоклины (рис. 2, *б*).

По горизонтальным сечениям *а—а, б—б, в—в* и т. д. (рис. 3) для обоих шлифов определены максимальные касательные напряжения τ_{max}, вертикальные нормальные напряжения σ_z и горизонтальные σ_x. По полученным данным построены графики изменения этих напряжений.

На рис. 4 приведены графики распределения нормальных напряжений σ_z на контурах штреков, пройденных по пласту в висячем и лежачем боках, и величина σ_z в целике между штреками по четырем подэтажам. Графики построены по вычисленным величинам σ_z по четырем шлифам двух моделей. Анализ картин распределения напряжений в этих моделях позволяет сделать следующие выводы о напряженном состоянии массива горных пород после проведения подэтажных штреков и частичной отработки некоторых подэтажей:

1. Как и следовало ожидать, непосредственно в кровле и подошве подэтажных штреков образуется зона пониженных напряжений (см. рис. 2, *а*), переходящая на расстоянии около 1,5 наибольших размеров поперечного сечения выработки в зону повышенных напряжений.

2. Напряжения τ_{max} при наличии пройденных штреков в горизонтальном сечении (в пределах подэтажа) изменяются незначительно, возрастая примерно в 1,5 раза (по сравнению со средним значением) вблизи боков выработки (см. рис. 3, шлиф *2*). В вертикальном направлении с глубиной максимальные касательные напряжения τ_{max} возрастают (см. рис. 3, шлиф *2*). Например, от первого подэтажа сверху к четвертому примерно в два раза.

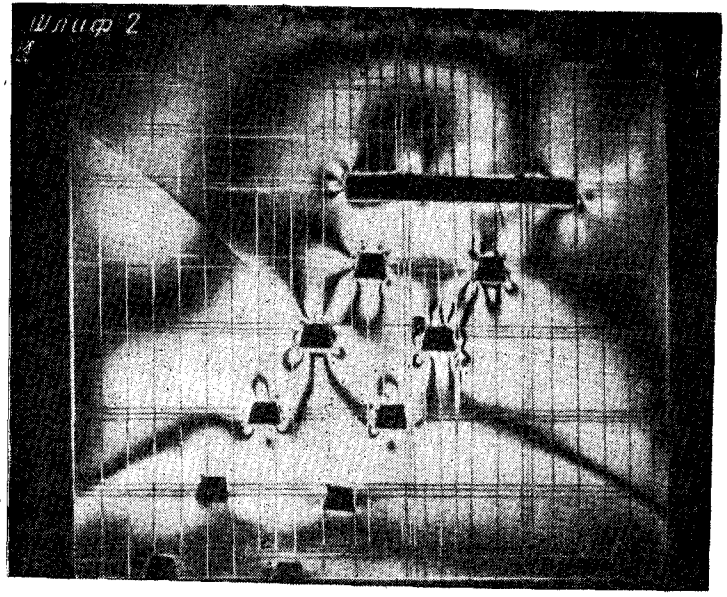
3. Вертикальные нормальные напряжения σ_z во всех точках сжимающие. После проведения штреков характер распределения σ_z по горизонтальным сечениям близок характеру распределения τ_{max} в этих сечениях. Значение σ_z у боков выработки возрастает в 1,5—1,9 раза по сравнению со средней величиной σ_z в этом подэтаже. С глубиной напряжения σ_z постепенно возрастают, увеличиваясь в 1,6—2 раза в четвертом подэтаже по сравнению со средней величиной σ_z в первом подэтаже.

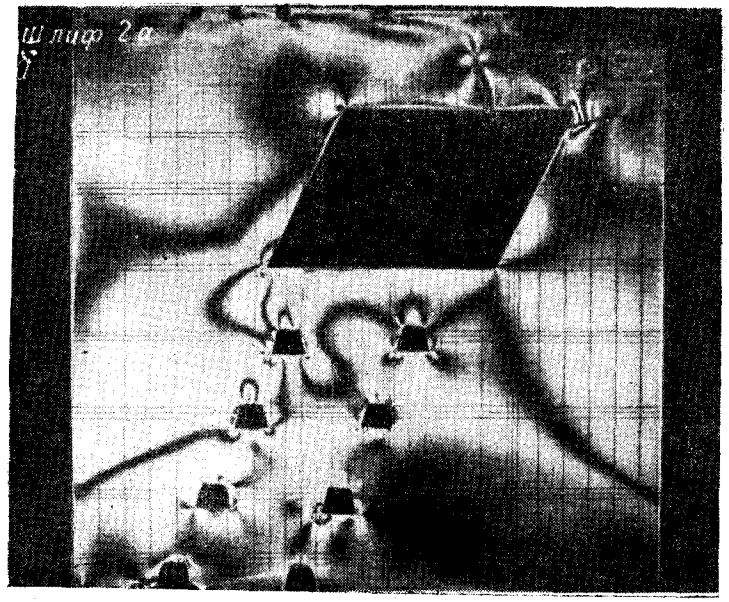
4. Горизонтальные напряжения σ_x составляют примерно 10—15% от вертикальных напряжений σ_z.

5. В районе проведения ортов σ_z и τ_{max} возрастают и достигают максимума вблизи контура ортов.

6. Очистные работы, приводящие к образованию выработанного пространства и обрушению пород, вызывают перераспределение напряжений в массиве. Напряжения τ_{max} и σ_z по сечению *а—а*, расположен-

а





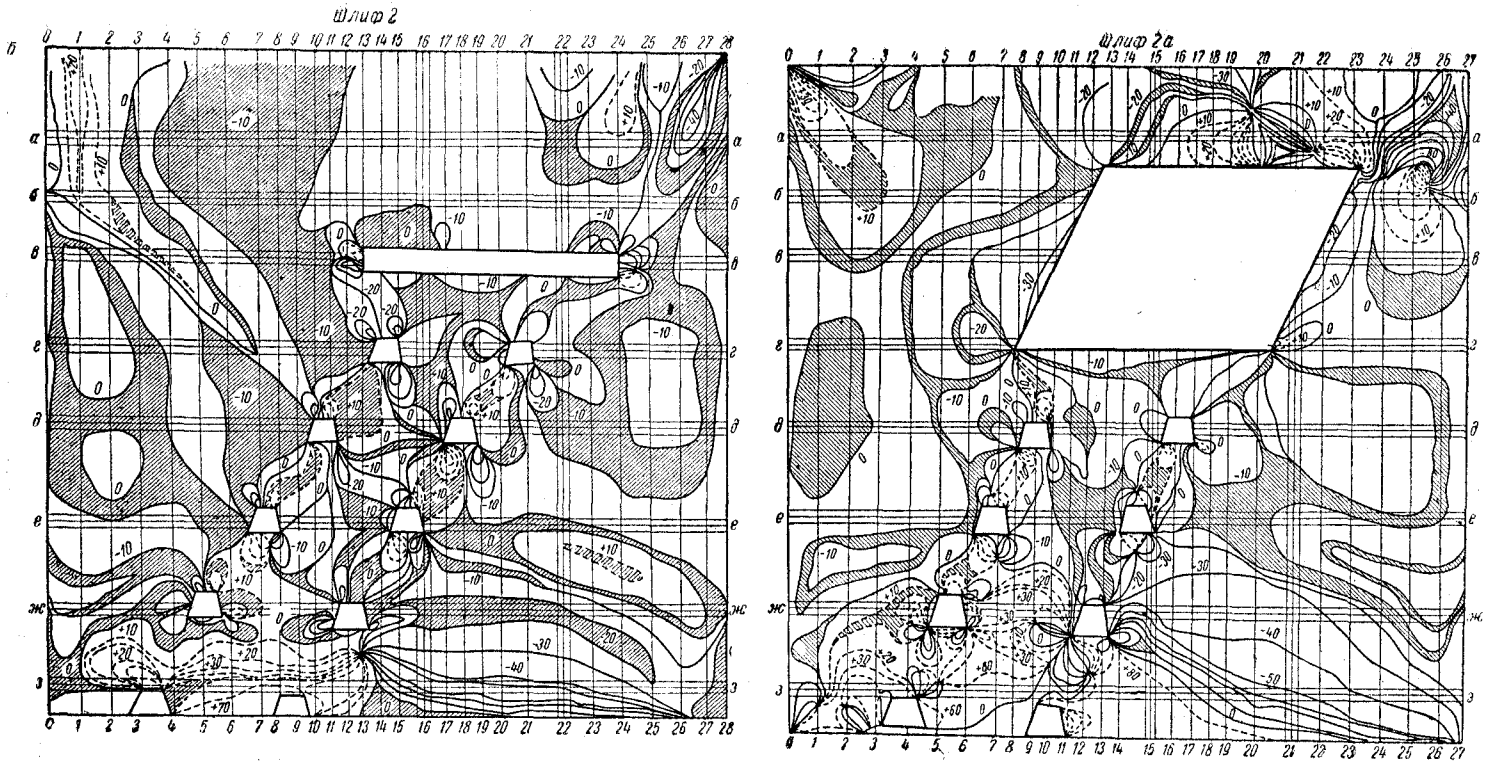


Рис. 2. Картины изохром (*а*) и изоклин (*б*)

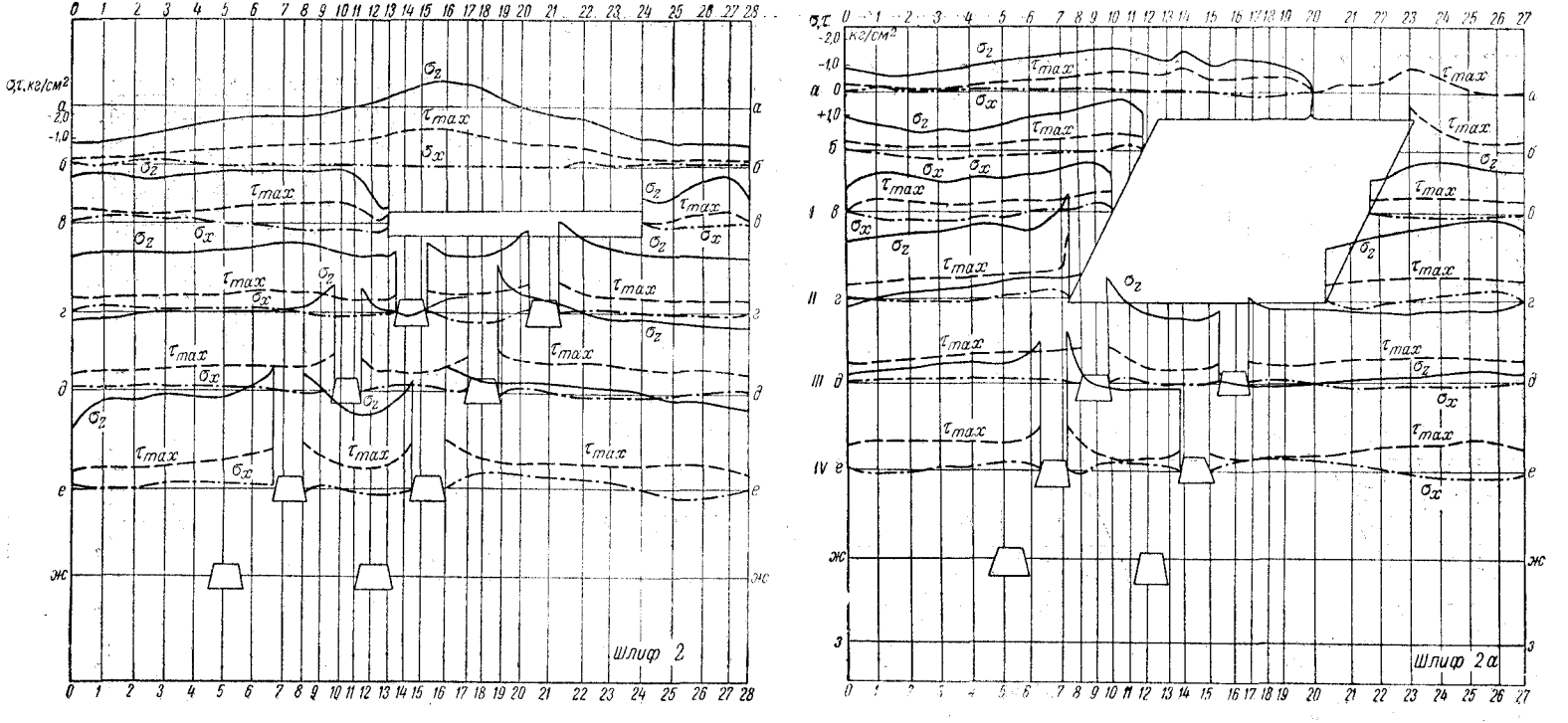


Рис. 3. Распределение напряжений τ_{max}, σ_z и σ_x по шлифам 2 и 2а

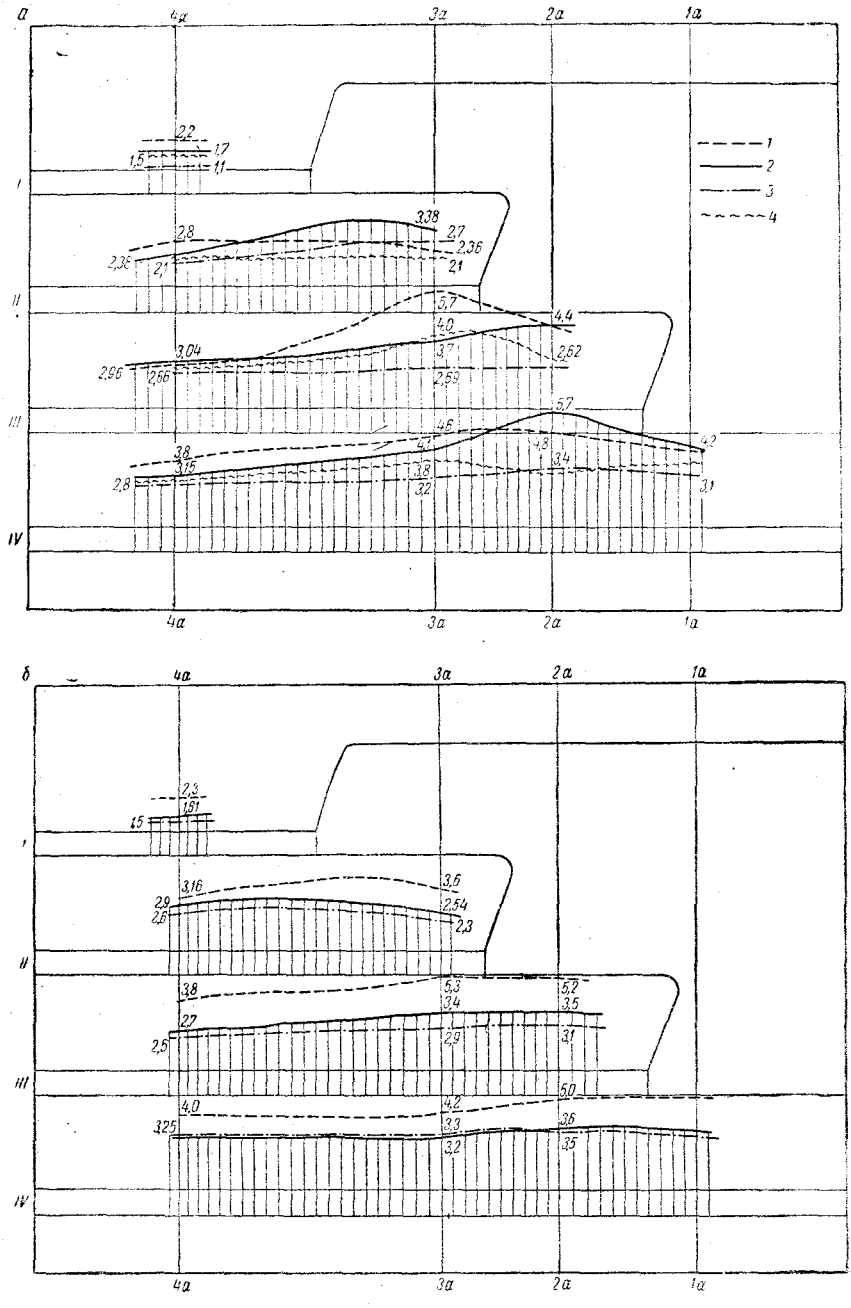


Рис. 4. Распределение нормальных напряжений σ_z на контуре штреков, расположенных в висячем (*а*) и лежачем (*б*) боках пласта по четырем подэтажам:
1 — до выемки; *2* — после выемки; *3* — после выемки в середине целика между штреками (*а*) и со стороны висячего бока (*б*); *4* — в середине целика между штреками до выемки

ному непосредственно над очистным пространством, распределяются неравномерно. В результате большой выемки в шлифе *2а* образовался прогиб кровли и трещина, в зоне которой напряжения падают до нуля (см. рис. 2, *а*). Вблизи выработанного пространства, особенно со стороны лежачего бока, отмечена зона пониженных напряжений. Например, в кровле очистного пространства τ_{max} и σ_z уменьшились примерно в два раза по сравнению с соответствующими величинами в аналогичных сечениях шлифа *2* (см. рис. 3). В нижних сечениях *д—д* и *е—е*, расположенных под очистной выработкой (см. рис. 3, *б*), τ_{max} и σ_z увеличиваются по сравнению с величинами в аналогичных точках шлифа *2* (см. рис. 3, *а*), т. е. там уже имеется зона повышенных давлений.

7. По мере подвигания очистных забоев (рис. 4) нормальные напряжения σ_z на контуре соответствующих подэтажных штреков растут, достигая максимума под выработанным пространством верхнего подэтажа примерно на расстоянии $^1/_3$ величины опережения очистных работ вышележащего подэтажа относительно нижележащего.

Величины σ_z до начала очистных работ (модель I), нанесенные на графики рис. 4, в некоторых точках несколько больше σ_z при очистных работах (модель II). Это не означает, что при очистных работах вертикальные напряжения вокруг подэтажных штреков уменьшаются. Причина уменьшения σ_z в модели II заключается в том, что в результате выемки части массива и замены его крошкой расчетное значение γH в модели II уменьшилось по сравнению с моделью I. Поэтому сравнивать σ_z можно только по относительным величинам (коэффициенту концентрации K_{σ_z}). На графики значения σ_z по модели I нанесены для сопоставления только характера их распределения по подэтажу до и после очистной выемки.

8. Наибольший коэффициент концентрации напряжений K_{σ_z} для модели II при очистной выемке наблюдается в сечении *а—а* над выработанным пространством и достигает в некоторых точках 2,7 и 3. В боках очистного пространства (см. рис. 3, *б*, сечение *б—б* и *в—в*) отмечена разгрузка, приводящая к уменьшению коэффициента концентрации у висячего бока до 2—2,2, а у лежачего — до 1,4—1,6.

В сечениях, расположенных ниже выработки, как уже указывалось, увеличиваются напряжения, а следовательно, и коэффициенты концентрации.

9. Существенное влияние выработанного пространства на подэтажные штреки нижележащих подэтажей сказывается в пределах только одного подэтажа.

Приведенные выводы не противоречат данным, полученным на моделях из эквивалентных материалов и при натурных наблюдениях в шахте. Однако на моделях из оптически активных материалов констатируется напряженное состояние массива пород в пределах упругих деформаций, а в шахтных условиях измеряются нагрузки на крепь выработок, которые являются в основном результатом неупругих деформаций, т. е. в этом случае напряжения в породах выходят за предел упругости.

Развитие моделирования для изучения характера распределения напряжений вокруг выработок методом фотоупругости требует дальнейшей разработки многих пока неразрешенных вопросов. Таким далеко неизученным большим вопросом, особенно при объемном моделировании, является создание граничных условий, близких к натурным, и их влияние на напряженное состояние модели. При этом следует иметь в виду необходимость изучения деформаций и перемещений основания объемной модели при ее нагрузке собственным весом в центрифуге, а также влияние граничных условий с боков модели.

При изучении устойчивости выработок на различной глубине необходимы большие модели. Это затрудняет технологию их изготовления, создание соответствующих нагрузок на них и, наконец, требует изменения конструкции центрифуги для размещения модели.

Нерешенным остается также вопрос о создании оптически активных материалов, с помощью которых можно было бы моделировать деформации пород за пределами упругости, т. е. решить упруго-пластическую и пластическую задачи. Теория пластичности для решения таких задач также разработана недостаточно.

Важнейшим завершающим этапом дальнейших исследований моделирования методом фотоупругости является переход от величин напряжений в модели к их значениям в натуре. Необходимы переводные коэффициенты, которые позволят достаточно точно для практики осуществить этот переход. Для этого вначале надо исследовать проявление горного давления в натурных условиях с замером величин нагрузки на выработку и определением доступными методами напряжений в массиве пород. А затем аналогичные исследования провести в соответствующих точках модели из оптически активного материала. Модель при этом должна максимально полно отвечать условиям подобия с точки зрения создания граничных условий и соблюдения масштаба моделирования.

Накопление данных в этой области позволит подойти к определению переводных коэффициентов. В первую очередь этот вопрос должен решаться применительно к породам крепким, как более близким по своим свойствам к телам изотропным, однородным и линейно деформируемым.

При положительном решении этой задачи объемное моделирование методом фотоупругости приобретет большое научное и практическое значение для решения разнообразных задач, связанных с проявлением горного давления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Городецкий П. И., Лукьянов Ю. М., Абрамов В. И. Большая камеральная центрифуга БКЦ-3 для моделирования напряжений под действием объемных сил. Записки ЛГИ, 1961, т. XLIV, вып. 1.
2. Фрохт М. Фотоупругость, т. I и II. ОГИЗ, 1948.
3. Краснов В. М. О решении пространственной задачи теории упругости оптическим методом. Уч. записки ЛГУ. Серия математич., 1939, вып. 8; 1944, вып. 13.