

**ИЗМЕРЕНИЕ
НАПРЯЖЕНИЙ
В МАССИВЕ
КРЕПКИХ
ГОРНЫХ
ПОРОД**

Н. П. ВЛОХ, А. Д. САШУРИН

Книга должна быть возвращена не
позже указанного здесь срока

Количество предыдущих выдач _____

2005—1967

39к.

6П1.2
В 59

**ИЗМЕРЕНИЕ
НАПРЯЖЕНИЙ
В МАССИВЕ
КРЕПКИХ
ГОРНЫХ
ПОРОД**

Н. П. Влох, А. Д. Сашурин



ИЗДАТЕЛЬСТВО „Н Е Д Р А“
Москва 1970

8565

Измерение напряжений в массиве крепких горных пород. Н. П. Влох, А. Д. Сашурин. М., изд-во «Недра», 1970, стр. 120.

В книге изложены экспериментальные методы измерения напряжений в массиве крепких горных пород, применяемые Институт горного дела Минчермета СССР при изучении горного давления на железорудных месторождениях; одновременно сделаны краткий обзор и анализ существующих методов измерения напряжений для аналогичных условий.

В работе приведено теоретическое обоснование методов, необходимые расчетные формулы, конструкции измерительных приборов с применением тензометрических датчиков и фотоупругих материалов; приведена методика измерения напряжений на обнажениях и в глубине горного массива, измерения приращений напряжений во времени.

Описываются примеры применения рассмотренных методов и вопросы, решенные с помощью их на железных рудниках Урала, где было выявлено изменение напряженности горных пород, вызванное ведением очистных работ.

Книга предназначена для научных работников, инженеров и аспирантов, занимающихся исследованием горного давления и прочности инженерных конструкций и сооружений.

Таблиц 17, иллюстраций 41, библиография — 68 названий.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Горное давление является одним из основных факторов, влияющих на безопасность и эффективность разработки месторождений полезных ископаемых подземным способом.

При исследовании вопросов горного давления на месторождениях с крепкими рудами и вмещающими породами в последние годы все шире стали использовать экспериментальные методы измерения напряжений горных пород в производственных условиях. Применение их направлено в настоящее время на решение следующих основных задач по проблеме горного давления:

определение первоначального напряженного состояния горного массива;

изучение закономерностей развития горного давления при разработке месторождения, исследование характера распределения напряжений по отдельным элементам системы разработки и определение величины нагрузки на них на различных стадиях ведения очистных работ.

Важность проблемы измерения напряжений в горном массиве для решения задачи управления горным давлением привела к созданию большого числа экспериментальных методов измерения напряжений, основанных на самых разнообразных свойствах горных пород. Однако наибольшее распространение получили методы, использующие упругие деформационные свойства крепких горных пород. Они уже вышли из стадии лабораторных исследований и повсеместно используются для решения практических задач горного давления. Другие же методы, такие, как радиометрические, сейсмоакустические и электрофизические, в настоящее время находятся на стадии лабораторных и промышленных экспериментов и в практике пока не нашли себе применения, поэтому они в работе не рассматриваются.

Все методы, основывающиеся на упругих деформационных характеристиках крепких горных пород, можно подразделять на три основные группы:

методы измерения напряжений горных пород на их обнажениях;

методы измерения напряжений горных пород в глубине массива;

методы измерения напряжений горных пород во времени.

В данной работе излагается комплекс экспериментальных методов измерения напряжений в крепких горных породах, основывающихся на упругих свойствах, позволяющий на месторождениях с крепкими рудами и породами, обладающими упругими свойствами, производить натурные исследования закономерностей горного давления за сравнительно короткий срок в достаточном объеме. Эти методы используются Институтом горного дела Министерства черной металлургии СССР с 1961 г. для исследования напряженного состояния горных пород на железорудных месторождениях Урала. Результаты этих исследований позволили обоснованно решить ряд вопросов разработки месторождений, связанных с выбором методов управления горным давлением.

Работа написана по материалам научно-исследовательских работ, выполненных в лаборатории горного давления Института горного дела Министерства черной металлургии СССР.

Авторы приносят благодарность коллективу этой лаборатории, принимавшему участие в разработке методов и внедрении их в практику исследования горного давления на железных рудниках Урала.

ГЛАВА I

ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ НА ОБНАЖЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ КРЕПКИХ ГОРНЫХ ПОРОД МЕТОДОМ ЧАСТИЧНОЙ РАЗГРУЗКИ

I. СУЩНОСТЬ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЙ

При подземной разработке месторождений полезных ископаемых большое влияние на безопасность и эффективность горных работ оказывают состояние выработок различного назначения и условия их поддержания. В крепких горных породах выработки обычно не требуют крепления, в слабых и трещиноватых породах устойчивость их обеспечивается соответствующей крепью.

Вопрос о необходимости и выборе требуемой крепи и своевременной установке ее может быть решен на основе правильной оценки степени устойчивости пород, в которых пройдена выработка. Тип крепи зависит от структуры, прочности и напряженного состояния пород, в которых находятся выработки.

Поэтому для оценки и контроля устойчивости горных выработок необходимо знать напряженное состояние на их контуре, о котором наиболее достоверные данные в настоящее время можно получить путем непосредственных измерений величин напряжений пород в натурных условиях.

Для измерения величины и направления главных нормальных напряжений в крепких породах на контуре горных выработок, а также в монолитной и сборной крепи из упругих материалов весьма эффективным является метод частичной разгрузки.

Метод частичной разгрузки предложен И. Матаром [61] для измерения напряжений в элементах металлических конструкций и остаточных напряжений в изделиях из металла. Сущность метода состоит в следующем.

На плоской площадке напряженного элемента сверлится отверстие малого диаметра. В результате образования отверстия в непосредственной близости от него происходит нарушение равновесия напряженного состояния, которое восстанавливается за счет перераспределения напряжений в области влияния отверстия. По измеренным деформациям, вызванным перераспределением напряжений, определяются величина и направление главных нормальных напряжений в точке измерения.

Эффект нарушения равновесия в напряженном состоянии носит локальный характер и с удалением от отверстия быстро зату-

хает. По данным М. М. Фрохта [46] на расстоянии 5—6 радиусов от центра отверстия напряжения от первоначальных отличаются не более чем на 5—6%.

Метод частичной разгрузки применяется при соблюдении следующих основных условий:

материал объекта должен быть упругим и изотропным; напряжения в исследуемом объекте ни до, ни после образования отверстия не должны превышать предела упругости материала;

площадка для измерения должна быть в 5—6 раз больше диаметра отверстия;

в пределах площадки измерения напряженное состояние должно быть однородным.

Теоретической основой метода частичной разгрузки является решение Г. Кирша [57] о распределении напряжений вокруг отверстия в плоскости, находящейся в одноосном однородном напряженном состоянии. Однако использование уравнений этого решения для получения расчетных формул, связывающих измеренные деформации и смещения с величинами напряжений при различных схемах частичной разгрузки, затруднительно, так как они не дают непосредственной связи между напряжениями и смещениями точек в области влияния отверстия. Поэтому для этой цели необходимо иметь

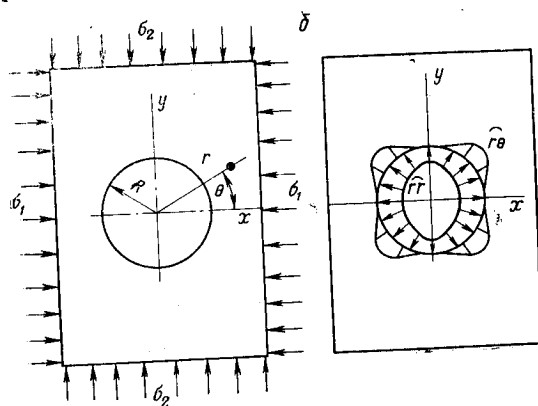


Рис. 1. Схема к выводу формул смещения точек вокруг скважины:
а — фактическое нагружение; б — эквивалентное нагружение

уравнения, определяющие смещения точек от образования отверстия в области его влияния. Они могут быть легко получены с помощью аппарата математической теории упругости [24].

Схема к выводу формул смещения точек вокруг скважины представлена на рис. 1. Действительная система представляет собой плоскость, находящуюся в однородном двухосном напряженном состоянии, в которой образуется отверстие (см. рис. 1, а). Для решения этой задачи действительную систему можно заменить эквивалентной ей в отношении смещений системой (см. рис. 1, б). В ней внешние напряжения задаются на контуре отверстия равными тем напряжениям, которые действовали в напряженной плоскости по контуру будущего отверстия до его образования, но взятыми с обратным знаком. Такая замена производится на основании того, что смещения в напряженной плоскости при

образовании отверстия определяются исключением действия удаленной части плоскости от этого отверстия.

Таким образом, по контуру отверстия действуют напряжения, определяемые следующими выражениями:

$$\left. \begin{aligned} \widehat{rr} &= -\frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos 2\theta \\ \widehat{\theta\theta} &= -\frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos 2\theta \\ \widehat{r\theta} &= \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \sin 2\theta \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где σ_1, σ_2 — главные нормальные напряжения, кг/см^2 ;

$\widehat{rr}, \widehat{\theta\theta}$ — радиальные и тангенциальные нормальные напряжения в полярной системе координат, кг/см^2 ;

$\widehat{r\theta}$ — касательные напряжения по радиальным и тангенциальным площадкам в полярной системе координат, кг/см^2 ;

θ — угол в полярной системе координат.

Граничное условие по контуру отверстия запишется в виде [24]

$$\Phi(z) + \overline{\Phi(z)} - e^{2i\theta} [\bar{z}\Phi'(z) + \Psi(z)] = N - iT, \quad (2)$$

$$\text{где } \Phi(z) = \sum_{k=0}^{\infty} a_k z^{-k},$$

$$\Psi(z) = \sum_{k=0}^{\infty} a'_k z^{-k},$$

$$N - iT = -\frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} e^{2i\theta},$$

e — иррациональное число, равное 2,718...;

a_n, a'_n — коэффициенты рядов Фурье.

Подставляя выражения для $\Phi(z)$, $\Psi(z)$ и $N - iT$ в граничное условие (2) и приравнивая коэффициенты при одинаковых степенях $e^{i\theta}$ в правой и левой частях, получаем следующую систему уравнений для отыскания неизвестных коэффициентов a_k и a'_k рядов Фурье:

$$\left. \begin{aligned} a'_2 \frac{1}{R^2} &= \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \\ \bar{a}_2 \frac{1}{R^2} &= -\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \\ 3a_2 \frac{1}{R^2} - a'_4 \frac{1}{R^4} &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

где R — радиус отверстия, см.

Из этих уравнений легко определяются коэффициенты a_2, a_2', a_4' . Остальные коэффициенты рядов Фурье, которыми задаются комплексные функции $\Phi(z)$ и $\Psi(z)$, равны нулю. Следовательно, выражения для $\Phi(z)$ и $\Psi(z)$ будут иметь следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \Phi(z) &= -\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} R^2 \frac{1}{z^2} \\ \Psi(z) &= \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} R^2 \frac{1}{z^2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} 3R^4 \frac{1}{z^4} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Смещения точек в плоскости подчиняются следующему условию [24]:

$$2G(v_r + iv_\theta) = e^{-i\theta} [\chi\Phi(z) - z\Phi'(z) - \bar{\Psi}(z)], \quad (5)$$

$$\text{где } \varphi(z) = \int \Phi(z) dz = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} R^2 \frac{1}{z};$$

$$\psi(z) = \int \Psi(z) dz = -\frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} R^2 \frac{1}{z} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} R^4 \frac{1}{z^3},$$

где $\chi=3-4\mu$ (для плоского напряженного состояния; μ — коэффициент Пуассона).

Подставляя значения $\varphi(z)$ и $\psi(z)$ в выражение (5) и разделяя действительные и мнимые части, получаем окончательные выражения для радиальных и тангенциальных смещений плоскости, вызванных образованием отверстия

$$\left. \begin{aligned} v_r &= -\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{4G} \left[\frac{R^4}{r^3} - \frac{R^2}{r} (\chi + 1) \right] \cos 2\theta + \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{4G} \frac{R^2}{r} \\ v_\theta &= -\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{4G} \left[\frac{R^4}{r^3} + \frac{R^2}{r} (\chi - 1) \right] \sin 2\theta \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где v_r, v_θ — радиальные и тангенциальные смещения в полярной системе координат, см;

$G = \frac{E}{2(1+\mu)}$ — модуль сдвига, кг/см² (E — модуль упругости, кг/см²);

r — радиус-вектор в полярной системе координат, см.

Полученные уравнения дают непосредственную зависимость между смещениями точек вокруг отверстия и величиной главных нормальных напряжений, действующих в плоскости. Они удобны тем, что дают возможность легко и быстро получать необходимые расчетные формулы для любых схем напряжения по методу частичной разгрузки.

Применение метода частичной разгрузки для измерения напряжений в крепких горных породах основываются на следующих допущениях:

крепкие горные породы обладают упругостью и изотропностью; напряжения в породах до выбуривания скважины и после не превышают их предела упругости.

Поскольку горные породы чаще всего имеют блочную структуру, то метод частичной разгрузки пригоден для тех пород и участков, у которых размеры структурных блоков в несколько раз превышают размеры разгружающего отверстия.

Впервые для измерения напряжений в горных породах метод частичной разгрузки с механическими тензометрами был применен Ж. Талобром [39] (рис. 2).

По углам равностороннего треугольника в шпурах малого диаметра закрепляются реперы, которые связаны между собой механическими или индукционными тензометрами. В центре треугольника выбуривается скважина диаметром 56 мм. Перемещения реперов относительно друг друга измеряются тензометрами.

Переход от измеренных перемещений реперов к величинам напряжений осуществляется либо тарировкой, проводимой в лабораторных условиях на блоке из той же породы, либо восстановлением деформаций с помощью специального круглого гидродомкрата, вставляемого в скважину, образующую при разгрузке.

Применение первого способа дает возможность определить величину вертикальных и горизонтальных нормальных напряжений. Второй способ дает величину и направление главных нормальных напряжений.

Достоинством обоих способов перехода от измеренных смещений к напряжениям является отсутствие надобности в определении упругих постоянных пород.

Однако оба способа сложны и трудоемки и имеют большие погрешности. В первом способе погрешности обусловлены тем, что измерения и тарировка производятся при различном направлении главных нормальных напряжений и различном напряженном состоянии. Измерения обычно производятся в двухосном поле напряжений, а тарировка осуществляется при одноосном нагружении.

При восстановлении деформаций путем нагружения стенок скважины цилиндрическим домкратом погрешности возникают из-

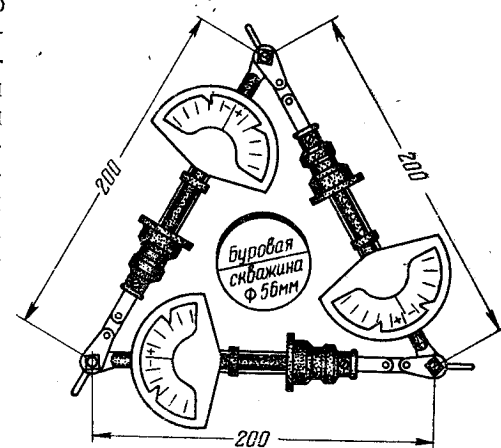


Рис. 2. Метод частичной разгрузки с механическими тензометрами по Ж. Талобру

за неопределенности нагружения поверхности скважины. Нагрузка имеет какое-то промежуточное распределение между сосредоточенной и равномерно распределенной и не соответствует воздействию выбуренной породы.

В дальнейшем в метод частичной разгрузки авторами внесен ряд усовершенствований, исключающих недостатки, связанные с интерпретацией экспериментальных данных для двух схем измерения, описанных ниже.

2. МЕТОД ЧАСТИЧНОЙ РАЗГРУЗКИ С НАКЛЕЙКОЙ ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

В этом варианте метода частичной разгрузки для получения величины напряжений измеряется разность смещений двух точек, лежащих на одном радиусе-векторе, но на различном расстоянии от контура выбуриваемой скважины. Этими двумя точками являются концы тензометрического датчика, наклеиваемого на не-большом расстоянии от скважины.

При измерении напряжений в элементах крепи и на стенках горных выработок встречается три вида напряженного состояния: одноосное с известным направлением напряжений;

двухосное с известным направлением главных нормальных напряжений;

двухосное с неизвестным направлением главных нормальных напряжений.

Для каждого вида напряженного состояния применяется соответствующая ему схема измерения.

В одноосном поле напряжений наклеивается один тензометрический датчик, совпадающий с направлением действия напряжений. Величина напряжений определяется по деформации, измеренной тензометрическим датчиком, из следующей формулы [4]:

$$\sigma_1 = \frac{2E\Delta}{R^2 K^i}, \quad (7)$$

$$\text{где } K^i = \frac{1}{b^i} \left[4 + (1 + \mu) \left(1 - \frac{R^2}{(b^i)^2} \right) \right] - \frac{1}{b^i + B_T} \times \\ \times \left[4 + (1 + \mu) \left(1 - \frac{R^2}{(b^i + B_T)^2} \right) \right];$$

Δi — деформация, измеренная тензометрическим датчиком, см;

b^i — расстояние от центра скважины до тензодатчика, см;

i — номер датчика;

B_T — база тензодатчика, см.

В двухосном поле напряжений с известным направлением главных нормальных напряжений, деформации измеряются по осям симметрии, совпадающим с направлением главных нормальных напряжений. Для этой цели наклеиваются два тензометрических датчика [4, 31].

Главные нормальные напряжения по результатам эксперимента находятся из следующих формул:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{2E \left(\Delta_I + \frac{K_2^I}{K_1^{II}} \Delta_{II} \right)}{R^2 K_1^I \left(1 - \frac{K_2^I K_2^{II}}{K_1^I K_1^{II}} \right)} \\ \sigma_2 &= \frac{2E \left(\Delta_{II} + \frac{K_2^{II}}{K_1^I} \Delta_I \right)}{R^2 K_1^{II} \left(1 - \frac{K_2^I K_2^{II}}{K_1^I K_1^{II}} \right)} \end{aligned} \right\}, \quad (8)$$

$$\text{где } K_1^i = \frac{1}{b^i} \left[4 + (1 + \mu) \left(1 - \frac{R^2}{(b^i)^2} \right) \right] - \frac{1}{b^i + B_T} \times \\ \times \left[4 + (1 + \mu) \left(1 - \frac{R^2}{(b^i + B_T)^2} \right) \right]; \\ K_2^i = \frac{1}{b^i} \left[4 - (1 + \mu) \left(1 + \frac{R^2}{(b^i)^2} \right) \right] - \frac{1}{b^i + B_T} \times \\ \times \left[4 - (1 + \mu) \left(1 + \frac{R^2}{(b^i + B_T)^2} \right) \right].$$

В практике исследования горного давления наибольшее распространение имеет двухосное поле напряжений с неизвестным направлением главных нормальных напряжений. В этом случае необходимо определить три компонента, характеризующие напряженное состояние в точке, величины главных нормальных напряжений σ_1 , σ_2 и угол φ , определяющий их направление. Для этой цели деформации разгрузки измеряются по трем направлениям: два датчика наклеиваются по двум взаимно перпендикулярным осям симметрии, а третий под углом 45° к ним (рис. 3).

Расчет величины и направления главных нормальных напряжений производится по формулам:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1, \sigma_2 &= E \frac{(\Delta_I K_2^{III} + \Delta_{II} K_2^I) \pm (\Delta_{III} K_1^I - \Delta_I K_1^{III}) \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 2\varphi}}{K_1^I K_2^{III} + K_2^I K_1^{III}} \\ \operatorname{tg} 2\varphi &= \frac{\Delta_{II} (K_1^I K_2^{III} + K_2^I K_1^{III}) - K_1^{II} (\Delta_I K_2^{III} + \Delta_{III} K_2^I)}{K_2^{II} (\Delta_{III} K_1^I - \Delta_I K_1^{III})} \end{aligned} \right\}, \quad (9)$$

$$\text{где } K_1^i = -R^2 (1 + \mu) \left(\frac{1}{b^i + B_T} - \frac{1}{b^i} \right);$$

$$K_2^i = R^2 \left[4 \left(\frac{1}{b^i + B_T} - \frac{1}{b^i} \right) - R^2 (1 + \mu) \left(\frac{1}{(b^i + B_T)^3} - \frac{1}{(b^i)^3} \right) \right].$$

Вывод этих уравнений, исходя из уравнений Кирша, приведен в работе [17]. Однако он может быть выполнен более коротким путем с помощью уравнений (6). В формулы (9) не вошли тангенциальные смещения, так как их влияние на деформацию базиса тензометрических датчиков ограничивается тысячными долями процента от радиальных деформаций.

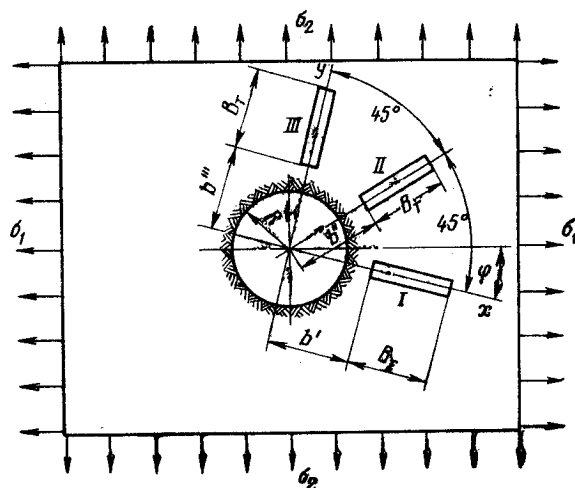


Рис. 3. Схема измерения напряжений горных пород методом частичной разгрузки с наклейкой трех тензодатчиков

Деформации тензометрических датчиков, соответствующие разности смещений концов их базы, измеряются станциями мостикового типа и определяются из формулы

$$\Delta = K_{\text{тар}} n, \quad (10)$$

где $K_{\text{тар}}$ — тарировочный коэффициент для применяемого типа тензодатчиков, см/деление прибора;

n — показание прибора, число делений.

В зависимости от схемы измерения величины деформаций определяются по одному, двум или трем направлениям и подстановка их в формулы (7), (8) или (9) дает искомые компоненты напряженного состояния.

Коэффициенты K_1^i и K_2^i зависят от диаметра разгрузочной скважины, расстояния от центра скважины до тензодатчика, его базы и коэффициентов Пуассона породы. Линейные величины измеряются непосредственно, а для определения упругих постоянных отбираются образцы в непосредственной близости от точки измерения или используется керн.

Для ускорения обработки экспериментальных данных можно построить номограммы, определяющие величину коэффициентов

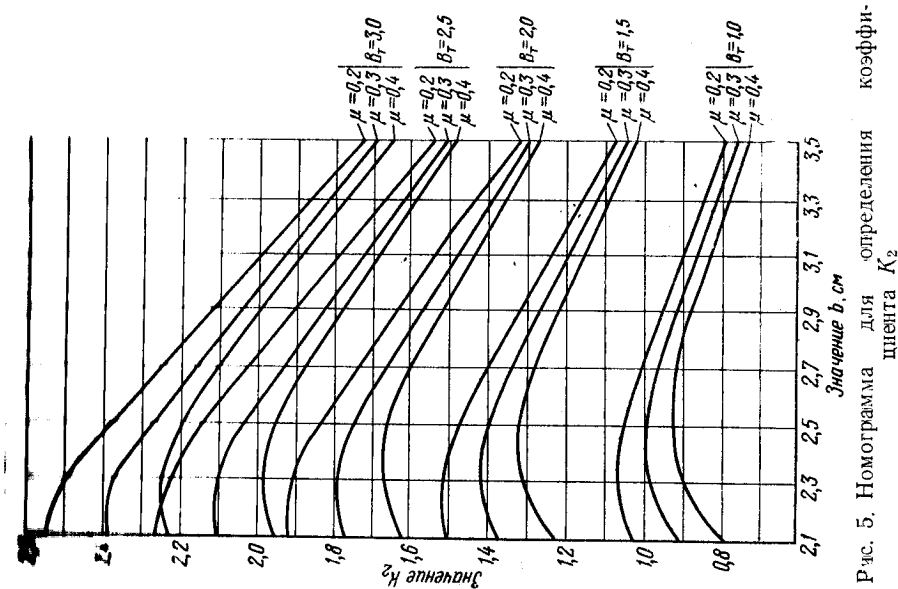


Рис. 5. Номограмма для определения коэффициента K_2

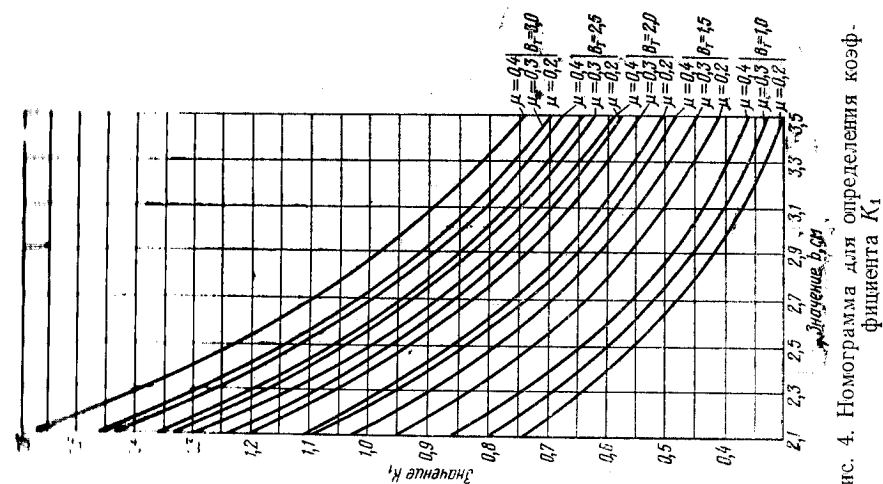


Рис. 4. Номограмма для определения коэффициента K_1

K_1^i и K_2^i при различных параметрах. Примеры таких номограмм для схемы измерения в общем случае двухосного поля напряжений, когда неизвестны направления главных нормальных напряжений, приведены на рис. 4 и 5. Эти номограммы определяют величины коэффициентов K_1^i и K_2^i при диаметре разгрузочной скважины 40 мм.

Точность метода частичной разгрузки определяется точностью получения исходных величин при проведении эксперимента путем непосредственных измерений (табл. 1).

Таблица 1

Функции и их аргументы		Схема измерения с одним тензодатчиком, формула (7)		Схема измерения с двумя тензодатчиками, формула (8)		Схема измерения с тремя тензодатчиками, формула (9)	
		величина	средняя квадратичная ошибка	величина	средняя квадратичная ошибка	величина	средняя квадратичная ошибка
Непосредственно измеренные аргументы	b^i	2,5	0,05	2,5	0,05	2,5	0,05
	$b^i + B_T$	4,5	0,05	4,5	0,05	4,5	0,05
	R_T	2,0	0,05	2,0	0,05	2,0	0,05
	ν	0,3	0,006	0,3	0,006	0,3	0,006
	$E \cdot 10^{-6}$	1,0	0,02	1,0	0,02	1,0	0,02
	$\Delta_I \cdot 10^6$	200	2,0	200	2,0	100	1,0
	$\Delta_{II} \cdot 10^6$	—	—	—	—	350	3,5
	$\Delta_{III} \cdot 10^6$	—	—	200	2,0	300	3,0
Промежуточные функции	K_1^i	0,668	0,0283	0,668	0,0283	0,924	0,0547
	K_2^i	—	—	0,203	0,015	-1,742	0,0360
Искомые функции	σ_1	150	10,3	215	16,3	315	16,5
	σ_2	—	—	215	16,3	113	8,5
	φ	—	—	—	—	28	2
	Предельная случайная относительная погрешность искомых функций, равная $X_{пр} = 2m, \%$	σ_1 σ_2 φ	13,8 — —	—	15,2 15,2 —	—	10,4 15,0 14,3

Из табл. 1 следует, что предельная ошибка, равная двум средним квадратичным ошибкам, составляет 15,2% и менее. Это зна-

чит, что из 100 измерений лишь 4,3 случая будут иметь ошибки, превышающие 15%. В остальных же случаях ошибки будут меньше [10]. Такая точность измерения является вполне удовлетворительной для исследования вопросов горного давления.

Метод частичной разгрузки в лабораторных условиях проверен путем проведения специальных экспериментов.

Стальные пластины размером $10 \times 5 \times 1$ см нагружали известной одноосной нагрузкой и производили в них измерения напряжений методом частичной разгрузки по схеме с наклейкой трех тензометрических датчиков. Для эксперимента использовались тензометрические датчики с базой тензомера 0,5 см при диаметре разгрузочного отверстия 0,4 см.

Нагружение пластины проводилось двумя способами: без прокладок, так что опорой испытываемой пластинки была сталь, и с тонкими прокладками из пластика, предназначенными для уменьшения трения по контакту и приближения напряженного состояния как можно ближе к одноосному.

Измеренная величина вертикальных нормальных напряжений в пластинке не отличалась от заданной более чем на 7,5%.

Результаты лабораторных испытаний метода частичной разгрузки приведены в табл. 2. Методика измерения напряжений на стенках горных выработок частичной разгрузкой заключается в следующем.

Таблица 2

Материал пластины или в стенки горной выработки №, кг / см ²	Датчик	Деформа- ция $\Delta_i \cdot 10^{-6}$, см	b^i , см	Компоненты напряженного состояния			Отличие от задан- ных на- пряжений, %
				σ_1 , кг/см ²	σ_2 , кг/см ²	φ , град	
Без прокладок							
I(III)	I	-8,65	0,53	925	255	91,3	7,5
	II	+11,54	0,60				
	III	+23,08	0,70				
С прокладками							
I(III)	I	-20,80	0,53	1000	10,5	90	0
	II	+9,25	0,60				
	III	+29,00	0,70				

В первую очередь производится выбор места измерения, которому придается большое значение. Как указывалось ранее, метод частичной разгрузки пригоден для измерения напряжений в породах, обладающих крупноблочной структурой. Местом измерения может служить достаточно ровная площадка с минимальными раз-

мерами 100×100 мм. При этом необходимо обратить особое внимание на то, чтобы точка измерения не оказалась в заколе или на выступающих частях, разгруженных от давления. Иногда для удаления заколов возникает необходимость производить оборт с помощью ручного перфоратора.

Площадка измерения готовится таким образом, чтобы плоскость ее была касательна к контуру выработки. Тогда будут измеряться тангенциальные нормальные напряжения в породах, слагающих горную выработку.

После предварительной разметки расположения тензодатчиков и разгрузочной скважины площадка тщательно выравнивается, шлифуется алмазной коронкой с помощью ручной электрической или пневматической дрели. Затем забурируется скважина на глубину не более 2—3 мм, чтобы впоследствии не повредить тензометрические датчики при начале разгрузки.

Отшлифованная поверхность промывается ацетоном, эфиром или спиртом. Одновременно с удалением грязи быстроспаряющиеся жидкости способствуют высыханию площадки.

На подготовленной площадке производится окончательная разметка мест под наклейку розетки тензометрических датчиков, чтобы они были точно ориентированы относительно вертикальной горизонтальной оси и были выдержаны углы между их направлением. Расстояние между датчиками и контуром скважины должно быть не менее 5 мм, чтобы не повредить их при бурении, но не более 10 мм для обеспечения достаточной величины смещения между концами базы тензодатчиков.

Приклеивание тензодатчиков на породу производится клеем холодного отверждения на основе эпоксидной смолы или циакрином. Клей из эпоксидной смолы без подогрева в шахтных условиях при температуре 6—8°С полимеризуется в течение 30—40 ч. При таком сроке полимеризации явления текучести при измерении не наблюдаются. Однако практически через 20—24 ч клей имеет прочность, достаточную для проведения измерений.

Наиболее работоспособной клеевой композицией для наклейки тензодатчиков оказался состав со следующими соотношениями: смола ЭД — 100, дибутилфталат — 10, полиэтиленполиамин — весовых частей.

Уменьшение количества пластификатора (дибутилфталата) приводит при низкой температуре, имеющей место в шахтных условиях, к снижению адгезии клеевого состава с породой. Увеличение же его количества может привести к возникновению текучести.

Составление клеевого состава производится в шахте за 15—20 мин до начала наклейки. Дозировку отдельных компонентов удобнее всего выдерживать с помощью медицинских шприцев. Смола ЭД-6 для этого должна подогреваться до 40—50°С.

Длительный срок полимеризации клея на основе эпоксидной смолы создает ряд неудобств при измерении напряжений: процесс измерения растягивается по сроку на два дня; тензодатчики при

полимеризации необходимо закреплять или же наклейку производить без проводов, а провода припаивать непосредственно перед измерениями.

Для сокращения сроков полимеризации клея и повышения прочности склеивания рекомендуется применять либо ускоритель, в качестве которого может быть использован диметиланилин, либо подогрев смеси до 50—60°С [42]. Однако при измерении напряжений в горных породах подогрев производить не следует, так как он может внести изменения в напряженное состояние, существующее в точке измерения, как за счет возможности возникновения температурных напряжений от местного нагрева, так и за счет изменения свойств самой породы. В настоящее время вопрос о влиянии подогрева на напряженное состояние пород и о возможных погрешностях измерений пока не исследован.

Значительно упрощает процесс наклейки, а следовательно, и измерения напряжений применение клея циакрина, разработанного в Институте элементоорганических соединений АН СССР под руководством доктора химических наук А. М. Поляковой. Для наклейки тензодатчиков при частичной разгрузке можно применить этот клей в жидком виде (мономер ЭО) или его загущенную модификацию с добавкой 10% наполнителя аэросила.

При наличии следов влаги на породе клей полностью затвердевает в течение 1—2 мин. Через 20—30 мин после наклейки он набирает прочность, достаточную для проведения измерений. При проведении экспериментов в лабораторных условиях, имеющих температуру, близкую к шахтной (5—6°С), и в шахтных условиях явление ползучести в наклеенных датчиках после указанного срока полимеризации отсутствовало. Этот клей является и хорошим диэлектриком.

Это обстоятельство позволяет производить наклейку тензометрических датчиков вместе с соединительными проводами при измерениях как на стенках выработок, так и в кровле.

Надежность работы тензометрических датчиков в шахтных условиях и точность измерения деформаций во многом зависят от качества их гидроизоляции. Критерием качества гидроизоляции до известной степени является величина изоляционного сопротивления пестель датчика относительно пород, к которым он приклеен. У правильно наклеенного и высушенного датчика изоляционное сопротивление доходит до 50—100 Мом.

Если сопротивление падает ниже 100 Мом, то результаты статических измерений, вероятно, будут неверными [32].

Одной из ошибок, связанных с падением сопротивления изоляции тензодатчика, является изменение кажущегося сопротивления датчика. Падение сопротивления изоляции тензодатчика в первом приближении можно представить как подключение к нему параллельного сопротивления, равного по величине его сопротивлению на изоляции. Тогда, если датчик первоначально имел сопротивление изоляции бесконечно большое и его сопротивление было

равно R_T , то при падении сопротивления изоляции до величины R_s его сопротивление R_T^1 станет равным

$$R_T^1 = \frac{R_T R_s}{R_T + R_s}, \quad (11)$$

а величина изменения сопротивления тензодатчика ΔR_{Tv} определится из выражения

$$\Delta R_{Tv} = R_T - R_T^1 = \frac{R_T^2}{R_T + R_s}. \quad (12)$$

Рабочее изменение сопротивления тензодатчика ΔR_T , вызванное напряжением, равным 1 кГ/см^2 , будет равно

$$\Delta R_T = \frac{K_T R_T}{E}, \quad (13)$$

где K_T — коэффициент тензочувствительности датчика.

Абсолютная ошибка, обусловленная изменением сопротивления тензодатчика за счет падения сопротивления его изоляции, получается путем деления выражения (12) на выражение (13)

$$\Delta \sigma = \frac{\Delta R_{Tv}}{\Delta R_T} = \frac{R_T E}{K_T (R_T + R_s)}. \quad (14)$$

При измерении напряжений тензодатчиком, имеющим сопротивление $R_T = 100 \text{ ом}$ и коэффициент тензочувствительности $K_T = 2,1$, в крепких породах с модулем упругости $E = 1,0 \cdot 10^6 \text{ кГ/см}^2$ падение сопротивления изоляции до 5 Мом вызывает абсолютную ошибку около 10 кГ/см^2 . Во многих случаях такой ошибкой уже пренебрегать нельзя. Если же сопротивление изоляции падает ниже, то ошибка резко начинает возрастать. При $R_s = 1 \text{ Мом}$ ошибка достигает уже 50 кГ/см^2 , при $R_s = 0,1 \text{ Мом}$ достигает 500 кГ/см^2 , т. е. производить измерения становится невозможно.

Однако влияние влаги не ограничивается изменением сопротивления тензодатчика, разобранным выше. Она вызывает ряд явлений в датчике, таких, как разбухание клея в результате увлажнения, уменьшение сцепления между клеем, подложкой и проволокой и ряд других. Погрешности, вызываемые влажностью, нельзя точно оценить по величине, и поэтому датчики необходимо предохранять от влаги. Гарантией правильности измерения является достаточная величина изолирующего сопротивления. Если его величина не падает ниже 50 Мом , то погрешностями, вызываемыми влажностью, можно пренебречь [32]. При падении сопротивления изоляции ниже 50 Мом оно становится нестабильным и погрешности практически оценить очень трудно.

Способы защиты от влаги, применяемые в лабораторных условиях и в условиях с относительно низкой влажностью, для шахтных условий являются непригодными, так как гидроизоляционные работы проводятся после наклейки тензодатчика на исследуемый

объект. Ввиду большой влажности в шахте тензодатчик должен быть полностью гидроизолирован в лабораторных условиях. Для этой цели наиболее подходящим оказался способ, аналогичный разработанному Национальным бюро стандартов (США) для закладки тензодатчиков в бетонные строения [17, 29, 32]. В нем для предохранения тензометрического датчика от влаги использовался конверт из станиоловой или латунной фольги, внутри которого приклеивался тензодатчик и сам конверт полностью заполнялся клеем.

Однако, несмотря на хорошую гидроизоляцию, достигающую до 500 Мом , применение латунной или станиоловой фольги не оправдалось.

Во-первых, датчики часто выходили из строя вследствие недостаточной механической прочности фольги и лишь в незначительной части допускали повторное применение. Во-вторых, относительно высокий модуль упругости фольги создает по плоскости склейки со смолой большие касательные напряжения, которые иногда при значительных нагрузках приводят к срыву тензодатчика.

Эти недостатки устраняются заменой фольги органическим стеклом. Конструкция конвертов показана на рис. 6. В полоске органического стекла толщиной $0,7—0,8 \text{ мм}$ выфрезерывают паз по размерам тензодатчика, так чтобы толщина дна составляла $0,1—0,2 \text{ мм}$. Проводники тензодатчика изолируют полиэтиленовой изоляцией и датчик приклеивают к дну паза. Затем паз заполняют клеем из эпоксидной смолы и закрывают сверху крышкой, входящей в паз. Излишки клея выдавливают крышкой и удаляют.

После полимеризации клея датчик зачищают, удаляют остатки клея и подвергают испытаниям. Для испытания датчик помещают в воду на 1—2 суток. Если сопротивление изоляции его падает ниже 100 Мом , датчик бракуется. Подготовленные таким образом датчики имеют сопротивление изоляции не ниже $100—150 \text{ Мом}$. Кроме того, тензометрический датчик, помещенный между пластинками из органического стекла, надежно защищен от механических повреждений и при осторожном обращении допускает многократное использование.

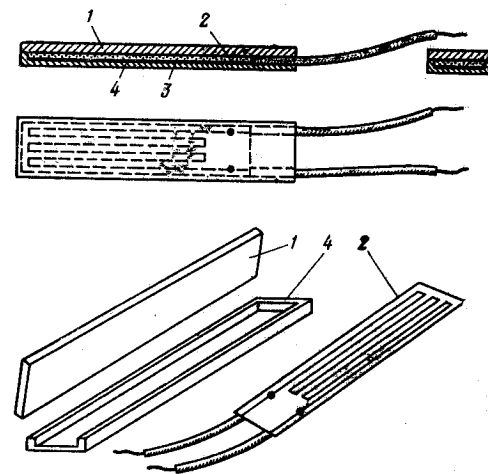


Рис. 6. Конверты для гидроизоляции тензодатчиков:

1 — крышка; 2 — датчик; 3 — клей; 4 — ванночка

Низкий модуль упругости органического стекла по сравнению с модулем упругости крепких горных пород способствует тому, что в органическом стекле при измерении возникают напряжения в 20—30 раз ниже, чем в породе. Следовательно, для растяжения датчика требуется небольшое усилие, что способствует снижению величины касательных напряжений по местам склейки.

Влияние органического стекла на передачу деформаций тензодатчику проверялось специальными экспериментами. На металлическую балку наклеивали рядом обычный тензодатчик и подготовленный описанным выше способом. При задании деформаций в балке оба датчика показывали одну и ту же величину как при нагрузке, так и при разгрузке.



Рис. 7. Способ частичной разгрузки ручной дрелью с алмазной коронкой

После наклейки тензометрических датчиков на породу производят первоначальный замер и бурят разгрузочную скважину ручной пневматической или электрической дрелью с алмазной коронкой диаметром 36 мм (рис. 7). Глубина бурения, необходимая для полного перераспределения напряжений на поверхности, определялась опытным путем и составляет 1,1—1,2

максимального расстояния от центра скважины до конца базы тензодатчика. При диаметре скважины 40 мм и базе датчика 20 мм глубина бурения составляет 55—60 мм. Основными достоинствами метода частичной разгрузки являются высокая надежность, достаточная точность, низкая трудоемкость, что позволяет производить большое число измерений. Два человека в течение двух смен могут произвести измерения в четырех точках при использовании клея из эпоксидной смолы. Применение циакрина повышает производительность до трех-четырех точек за смену. Легкость и простота применяемого оборудования делают практически возможным измерения напряжений в любых горных выработках. Определение напряжений в элементах крепи производится в действующей крепи без установки для этой цели специальной крепи.

Недостатком метода частичной разгрузки является трудность наклейки тензометрических датчиков в обводненных породах. В этом случае требуется специальная защита клея от воздействия воды на время его полимеризации в виде ограждений, препятствующих поступлению влаги на измерительную площадку. Такая защита удается далеко не всегда.

3. ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ МЕТОДОМ ЧАСТИЧНОЙ РАЗГРУЗКИ СО СЪЕМНЫМИ ТЕНЗОМЕТРАМИ

Для устранения недостатков варианта с наклейкой тензометрических датчиков в обводненных породах применяется вариант частичной разгрузки со съемными тензометрами. В нем вместо тензометрических датчиков для измерения деформаций разгрузки используются специальные тензометры, натягиваемые между реперами. Схема измерения, показанная на рис. 8, аналогична схеме, применяемой Ж. Талобром при механических и индукционных тензометрах [39]. Отличие состоит в конструкции тензометров и методе интерпретации экспериментальных данных.

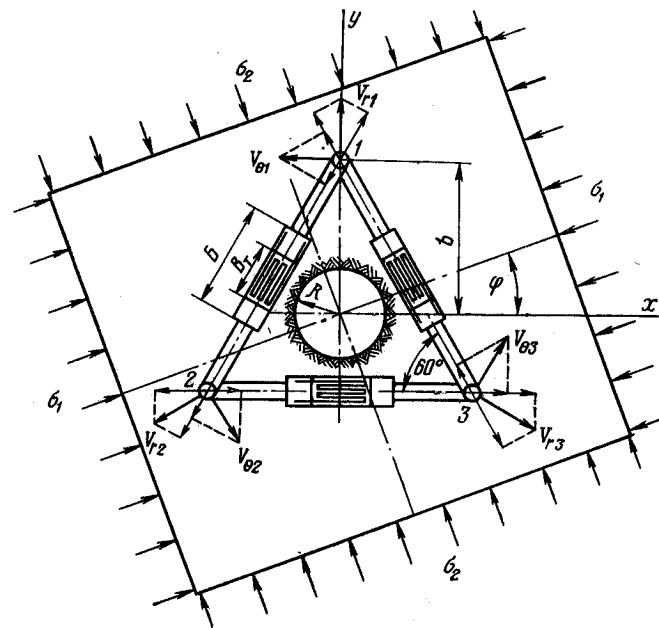


Рис. 8. Схемы измерения напряжений методом частичной разгрузки со съемными тензометрами

Сущность метода частичной разгрузки с применением съемных тензометров заключается в следующем. На площадке, предназначенной для измерений, по вершинам равностороннего треугольника сверлят три отверстия малого диаметра. В них крепко распираются анкерные реперы, между которыми натягивают тензометры. В центре треугольника бурят разгрузочную скважину. Реперы в результате деформации пород вокруг скважины перемещаются относительно центра скважины, а следовательно, и относительно друг друга на величину, зависящую от напряженного состояния породы. Взаимные перемещения реперов измеряют тензометрами.

Расчетные формулы для определения компонентов напряженного состояния в точке измерения выводят из уравнений (6).

Смещения реперов 1, 2 и 3 относительно центра скважины определяются следующими выражениями, получаемыми из уравнений (6) путем подстановки в них соответствующих значений $r=b$ и θ , равного $90^\circ - \varphi$; $210^\circ - \varphi$; $330^\circ - \varphi$:

$$\left. \begin{aligned} v_{r1} &= \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{4G} \left[\frac{R^4}{b^3} - \frac{R^2}{b} (\chi + 1) \right] \cos 2\varphi + \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{4G} \frac{R^2}{b} \\ v_{\theta 1} &= - \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{4G} \left[\frac{R^4}{b^3} - \frac{R^2}{b} (\chi - 1) \right] \sin 2\varphi \end{aligned} \right\}; \quad (15)$$

$$\left. \begin{aligned} v_{r2} &= - \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{4G} \left[\frac{R^4}{b^3} + \frac{R^2}{b} (\chi + 1) \right] \cos 2\varphi - \\ &- \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{4G} \left[\frac{R^4}{b^3} - \frac{R^2}{b} (\chi + 1) \right] \sin 2\varphi + \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{4G} \frac{R^2}{b} \\ v_{\theta 2} &= - \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{8G} \left[\frac{R^4}{b^3} + \frac{R^2}{b} (\chi - 1) \right] \cos 2\varphi + \\ &+ \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{8G} \left[\frac{R^4}{b^3} + \frac{R^2}{b} (\chi - 1) \right] \sin 2\varphi \end{aligned} \right\}; \quad (16)$$

$$\left. \begin{aligned} v_{r3} &= - \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{8G} \left[\frac{R^4}{b^3} - \frac{R^2}{b} (\chi + 1) \right] \cos 2\varphi + \\ &+ \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{8G} \left[\frac{R^4}{b^3} - \frac{R^2}{b} (\chi + 1) \right] \sin 2\varphi + \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{4G} \frac{R^2}{b} \\ v_{\theta 3} &= \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{8G} \left[\frac{R^4}{b^3} + \frac{R^2}{b} (\chi - 1) \right] \cos 2\varphi + \\ &+ \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{8G} \left[\frac{R^4}{b^3} + \frac{R^2}{b} (\chi - 1) \right] \sin 2\varphi \end{aligned} \right\}, \quad (17)$$

где b — расстояние от центра скважины до центра анкерного репера, см.

Смещения реперов относительно друг друга, т. е. деформации тензометров, как видно из рис. 8, определяются выражениями:

$$\left. \begin{aligned} \Delta_{12} &= (v_{r1} + v_{r2}) \cos 30^\circ + (v_{\theta 2} - v_{\theta 1}) \cos 60^\circ \\ \Delta_{23} &= (v_{r2} + v_{r3}) \cos 30^\circ + (v_{\theta 3} - v_{\theta 2}) \cos 60^\circ \\ \Delta_{31} &= (v_{r1} + v_{r3}) \cos 30^\circ + (v_{\theta 1} - v_{\theta 3}) \cos 60^\circ \end{aligned} \right\}, \quad (18)$$

где Δ_{12} , Δ_{23} , Δ_{31} — деформации соответствующих тензометров, см.

После подстановки выражений (15), (16) и (17) в формулы (18) получаем систему уравнений, решая которую относительно σ_1 , σ_2 и φ получаем выражения, определяющие их через величины деформаций тензометров:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1, \sigma_2 &= \frac{2\sqrt{3}}{9} G \left[\frac{\Delta_{12} + \Delta_{23} + \Delta_{31}}{M_2} \pm \frac{\Delta_{12} + \Delta_{31} - 2\Delta_{23}}{M_1} \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 2\varphi} \right] \\ \operatorname{tg} 2\varphi &= \frac{\sqrt{3} (\Delta_{31} - \Delta_{12})}{\Delta_{12} + \Delta_{31} - 2\Delta_{23}} \end{aligned} \right\}, \quad (19)$$

где $M_1 = \frac{R^2}{b} \chi$; $M_2 = \frac{R^2}{b}$.

Таким образом, измеряя деформации тензометров во время разгрузки, по формулам (19) можно определить величину и направление главных нормальных напряжений в точке измерения.

Расстояние между реперами определяют диаметром разгрузочной скважины. Реперы должны находиться в зоне влияния скважины и иметь величину смещений, достаточную для надежного и точного измерения. Максимальные смещения при разгрузке происходят на контуре скважины и по мере удаления от него затухают,

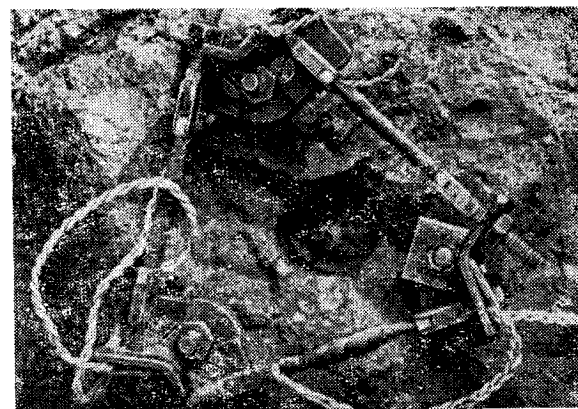


Рис. 9. Метод частичной разгрузки со съемными тензометрами

как видно из уравнений (6), примерно обратно пропорционально расстоянию до центра скважины. Поэтому для повышения точности измерений реперы следует располагать как можно ближе к скважине, но при этом между буровым инструментом и тензометрами должен оставаться зазор, исключающий касание при бурении.

При диаметре скважины 42—45 мм реперы располагаются от центра скважины на расстоянии около 6 см. Смещения, составляющие в этом случае около 30% от максимальных, обеспечивают достаточную точность измерений. Конструкция реперов позволяет иметь при этом зазор между тензометрами и буровой штангой около 25—30 мм (рис. 9).

Устройство реперов и способ их закрепления очень просты и позволяют легко и быстро устанавливать их в породе (рис. 10, а). При закручивании гайки анкерный болт за счет зажимного конуса и клина прочно распирается в породе. На зажимном конусе болта закреплено специальное коромысло 1 для установки тензометров.

Основой тензомера является деформируемый элемент из дюралюминия (рис. 10, б). На него с двух сторон наклеиваются тензодатчики, тщательно изолируемые от влияния влаги специальной мастикой и полихлорвиниловой лентой. Шарнирные тяги служат для закрепления деформируемого элемента между двумя реперами и исключают возможность изгиба при натяжении.

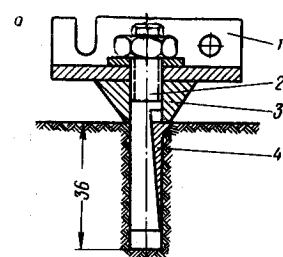
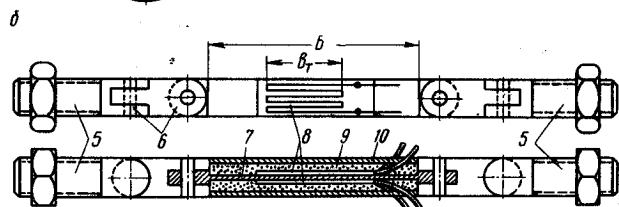
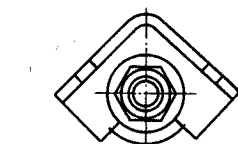


Рис. 10. Конструкция съемных тензомеров:
а — анкерные реперы: 1 — коромысло, 2 — анкерный болт, 3 — конус, 4 — клин; б — тензомер: 5 — тяги, 6 — шарнирные соединения, 7 — деформируемый элемент; 8 — датчик, 9 — мастика, 10 — полихлорвиниловая изоляция



В качестве изолирующей мастики хорошо зарекомендовал себя состав, предлагаемый в работе [44]. Для ее приготовления смесь, состоящая из 8% воска, 32% парафина, 15% технического вазелина, 35% канифоли и 10% машинного масла (по весу), прогревают в течение 20—30 мин, непрерывно перемешивая при температуре 150°С. Мастика такого состава обеспечивает гидроизоляцию тензодатчиков около 100 Мом и обладает хорошей пластичностью при сравнительно низких температурах.

Первоначальное натяжение тензомеру задается закручиванием гаек. Величина его должна превышать максимально возможные смещения реперов при разгрузке.

В зависимости от характера напряженного состояния породы реперы при разгрузке сближаются или удаляются относительно друг друга. В соответствии с этим натяжение тензомеров уменьшается или увеличивается.

Величина деформаций тензомеров определяется по обоим тензодатчикам, исключая тем самым возможные погрешности за счет

изгиба деформируемого элемента. Переход от показаний прибора к деформации в сантиметрах производится по формуле

$$\Delta = \Delta n K_{\text{тар}} B, \quad (20)$$

где Δn — величина деформации в делениях прибора;

B — длина рабочего участка деформируемого элемента, см.

Измерение напряжений методом частичной разгрузки проводят в следующем порядке. На стенке горной выработки в нужном месте выбирают относительно ровную площадку. Зачистка ее и выравнивание в отличие от предыдущего варианта могут производиться как ручной дрелью с алмазной коронкой, так и буровым молотком, так как в этом случае приемлема более грубая обработка поверхности. При сравнительно ровной площадке зачистку не производят. На подготовленной площадке забуривают и разгрузочную скважину на глубину 3—5 см.

Так как реперы находятся на значительном расстоянии от скважины, то забуренная скважина не оказывает на них влияния. Отверстия под реперы размечают с помощью шаблона и высверливают победитовыми сверлами диаметром 8 мм. В них вставляют и распирают анкеры. Между анкерами натягивают тензомеры. Величина первоначального натяжения не превышает 20—25 кг и определяется по прибору, подключенному к тензомеру при натяжении. После натяжения всех тензомеров берут первоначальный отсчет и производят разгрузку.

Скважину бурят либо дрелью с алмазной коронкой, либо буровым молотком. Диаметр скважины 40—45 мм. Скважину бурят до такой глубины, когда дальнейшее бурение не оказывает влияния на деформацию тензомеров. Максимальная глубина бурения зависит от диаметра скважины, глубины заложения реперов и расстояния от центра скважины до реперов и может быть определена из выражения, полученного экспериментальным путем:

$$h = b + h_1, \quad (21)$$

где b — расстояние от центра тяжести до реперов, мм;

h_1 — глубина заложения репера, см.

Для диаметра разгрузочной скважины 42—45 мм, глубины заложения реперов 35 мм и расстояния между реперами и центром скважины 60 мм максимальная глубина бурения равна 95—100 мм.

Графики деформации тензомера в зависимости от глубины бурения разгрузочной скважины показаны на рис. 11.

Метод частичной разгрузки со съемными тензомерами имеет весьма незначительную трудоемкость. Время, необходимое двум рабочим для измерения напряжений в одной точке, не превышает 1,5 ч. Таким образом, два человека за одну смену могут измерить напряжения в трех-четыре точки.

Точность метода частичной разгрузки с применением съемных тензомеров зависит от точности определения исходных величин. Величины погрешностей, возникающих при измерении исходных

величин и компонентов напряженного состояния, представлены в табл. 3.

Таблица 3

Функции и их аргументы		Абсолютная величина	Средняя квадратичная ошибка
Исходные величины	b	6,0	0,1
	R	2,0	0,05
	μ	0,3	0,006
	$E \cdot 10^{-6}$	1,0	0,02
	$\Delta_{12} \cdot 10^6$	100	1,0
	$\Delta_{23} \cdot 10^6$	350	3,5
	$\Delta_{31} \cdot 10^6$	300	3,0
Промежуточные функции	M_1	1,385	0,023
	M_2	0,667	0,035
Искомые функции	σ_1	214	9,1
	σ_2	117	8,9
	φ	25	0,5
	Предельная случайная относительная погрешность искомых функций, равная $X_{пр}=2 m, \%$	$\sigma_1=8,5$ $\sigma_2=15,2$ $\varphi=4$	— — —

Таким образом, предельная случайная относительная погрешность измерения напряжений методом частичной разгрузки со съемными тензодатчиками вполне удовлетворяет техническим условиям.

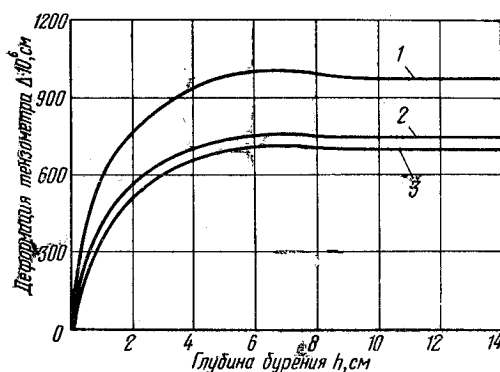


Рис. 11. График деформации тензора в зависимости от глубины бурения разгрузочной скважины:

1, 2, 3 — номера тензодатчиков

Для проверки в шахтных условиях производились измерения напряжений в одних и тех же точках обоими вариантами метода частичной разгрузки — со съемными тензодатчиками и с наклейкой тензодатчиков. Разгрузочная скважина использовалась одна и та же. Результаты измерений приведены в табл. 4.

Из этой таблицы следует, что оба варианта

Таблица 4

Результаты измерения напряжений						Ошибка по отношению к средней величине, %		
с наклейкой тензодатчиков			со съёмными тензодатчиками					
$\sigma_1, \text{кг/см}^2$	$\sigma_2, \text{кг/см}^2$	$\varphi, \text{град}$	$\sigma_1, \text{кг/см}^2$	$\sigma_2, \text{кг/см}^2$	$\varphi, \text{град}$	σ_1	σ_2	φ
283	221	38	231	186	50	11	9	6
224	90	77	192	71	71	8	12,5	3

дают близкие результаты измерений.

Вариант со съемными тензодатчиками в отличие от варианта с наклейкой тензодатчиков может применяться при измерениях напряжений в обводненных породах, где наклейка практически невозможна.

4. УСЛОВИЯ ПРИМЕНЕНИЯ И ЗАДАЧИ, РЕШАЕМЫЕ МЕТОДОМ ЧАСТИЧНОЙ РАЗГРУЗКИ

Метод частичной разгрузки является эффективным средством экспериментального изучения напряженного состояния на обнажениях крепких горных пород. Однако не все крепкие горные породы, обладающие упругими свойствами, пригодны для его использования. Наиболее благоприятными условиями применения метода частичной разгрузки являются крепкие монолитные или слаботрециноватые породы с крупноблочной структурой.

Минимальные размеры структурных блоков, в которых производят измерения, должны превышать в несколько раз размеры площадки измерения, т. е. должны быть не менее 0,3—0,5 м.

Необходимо отметить, что на большинстве месторождений Урала крепкие горные породы почти все удовлетворяют этим условиям, за исключением отдельных участков, где бывает затруднительно выбрать и подготовить площадку для измерений.

С помощью метода частичной разгрузки можно решать следующие основные вопросы горного давления:

исследование устойчивости капитальных, подготовительных и нарезных выработок;

изучение закономерностей горного давления при разработке месторождений полезных ископаемых.

При разработке месторождений с крепкими рудами и вмещающими породами большинство горных выработок проходят и эксплуатируют без крепи, особенно, если срок службы их небольшой. В этом случае устойчивость горных выработок зависит от величины и характера распределения напряжений на их контуре.

Закономерности распределения напряжений по контуру горных выработок находятся в непосредственной связи с напряженным

состоянием массива пород, в котором пройдена выработка. Если массиве пород преобладают вертикальные напряжения, то на стенках горизонтальной выработки круглого сечения будут сжимающие напряжения, а в кровле в зависимости от соотношения между горизонтальными и вертикальными напряжениями могут быть растягивающие или сжимающие напряжения. Если же горизонтальные и вертикальные напряжения в массиве пород одинаковые, то на всем контуре выработки напряжения будут сжимающими и одинаковыми. В том же случае, когда горизонтальные напряжения превосходят вертикальные, зона растяжения может переместиться на стенки горных выработок, а зона сжатия — в кровлю и почву.

При известных величинах и направлениях главных нормальных напряжений в массиве горных пород, по которому пройдена выработка, напряжения на ее контуре и характер их распределения могут быть с достаточной достоверностью определены с помощью аппарата механики сплошной среды. Однако знания о напряженном состоянии горного массива как в нетронутой зоне, так и вблизи очистных работ в настоящее время пока недостаточны.

До недавнего времени основной гипотезой, объясняющей напряженное состояние горного массива, была гипотеза А. Гейма [55]. Согласно этой гипотезе, напряженное состояние пород на глубине определяется весом вышележащих пород. В дальнейшем на основании этой гипотезы было получено, что в горном массиве максимальными нормальными напряжениями являются вертикальные, получаемые из формулы согласно работе [14]:

$$\sigma_y = \gamma H, \quad (22)$$

где γ — объемный вес налегающих пород, кг/см^3 ;
 H — высота налегающих пород, см .

Горизонтальные нормальные напряжения определяются боковым распором пород

$$\sigma_x, \sigma_z = \frac{\mu}{1 - \mu} \sigma_y,$$

где $\sigma_y, \sigma_x, \sigma_z$ — соответственно вертикальные и горизонтальные нормальные напряжения, кг/см^2 .

Вертикальные и горизонтальные нормальные напряжения в нетронутом горном массиве одновременно являются главными нормальными напряжениями.

Внедрение в практику исследования горного давления экспериментальных методов измерения напряжений показало, что эта гипотеза далеко не всегда соответствует действительности. Измерениями напряжений в горных породах на различных континентах и в различных условиях, проведенными многими исследователями, установлено, что главные нормальные напряжения лишь в отдельных частных случаях совпадают с вертикальными и горизонтальными нормальными напряжениями, что вертикальные напряжения часто оказываются не максимальными, а горизонтальные иногда в несколько раз превосходят их.

Поэтому в общем случае распределение напряжений по контуру выработки может быть весьма сложным. Чтобы оценить его с точки зрения устойчивости горной выработки, необходимо знать, где находятся максимумы напряжений — на контуре, т. е. в кровле, на стенках или где-то между ними, а также есть ли на контуре выработки зоны растяжения. Зная напряженное состояние на контуре выработки, путем решения обратной задачи можно определить напряженное состояние окружающего массива пород и направление главных нормальных напряжений в плоскости поперечного сечения выработки.

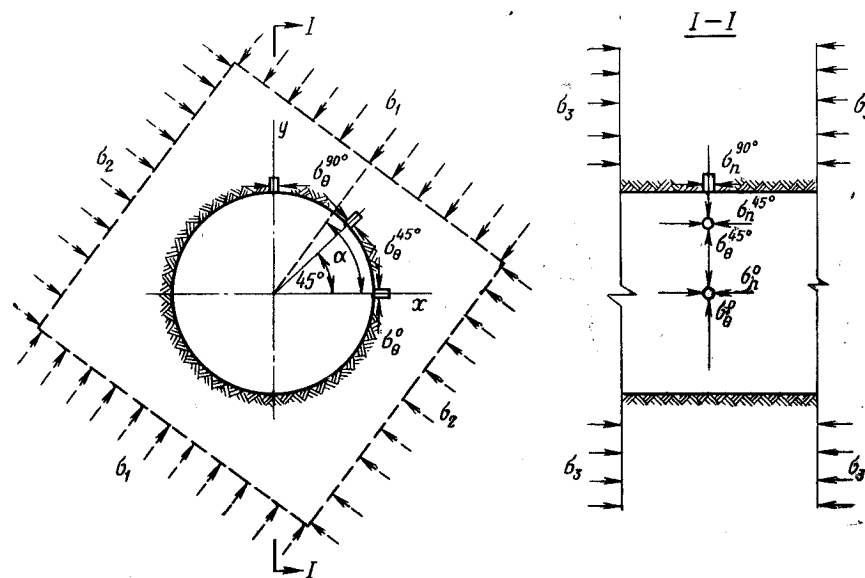


Рис. 12. Схема измерения напряжений в трех точках контура выработки

Решение этих вопросов помогает правильно расположить горную выработку и выбрать рациональную ее форму, в случае необходимости заранее подкрепить места, нуждающиеся в этом.

В выработках с круглой формой поперечного сечения или приближающейся к ней удовлетворительное решение этих вопросов дает измерение напряжений методом частичной разгрузки в трех точках контура выработки. Точки измерения располагаются в одном поперечном сечении на стенке, в кровле и под углом 45° к ним, как показано на рис. 12. Величина и направление главных нормальных напряжений в массиве горных пород определяются из формул:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1, \sigma_2 &= \frac{1}{4} [2\sigma_\theta^{0^\circ} + \sigma_\theta^{90^\circ} - \sigma_\theta^{45^\circ} \pm (\sigma_\theta^{90^\circ} - \sigma_\theta^{45^\circ}) \sqrt{1 + \tan^2 2\varphi}] \\ \tan 2\varphi &= \frac{\sigma_\theta^{0^\circ} + \sigma_\theta^{90^\circ} - 3\sigma_\theta^{45^\circ}}{\sigma_\theta^{90^\circ} - \sigma_\theta^{45^\circ}} \end{aligned} \right\}, \quad (23)$$

где σ_0^0 , σ_0^{45} , σ_0^{90} — тангенциальные нормальные напряжения измеренные в соответствующих точках на контуре выработки, кг/см^2 .

Третье нормальное напряжение, перпендикулярное плоскости поперечного сечения, в котором производится измерение, и направленное вдоль выработки, определяется как средняя величина по трем точкам. В каждой точке оно вычисляется по формуле

$$\sigma_3 = \sigma_n - \mu \sigma_e, \quad (24)$$

где σ_n — продольное напряжение в точке измерения, направленное вдоль выработки, кг/см^2 .
Формулы (23) и (24) получены из уравнений Кирша [57].

Поскольку на стенках горных выработок обычно имеет место двухосное напряженное состояние с неизвестным направлением главных нормальных напряжений, то для измерений необходимо использовать либо схему с наклейкой трех тензометрических датчиков, либо со съемными тензометрами.

При исследовании горного давления в выработках, имеющих крепь, метод частичной разгрузки может использоваться для измерения напряжений в монолитной бетонной и железобетонной крепи, а также для изучения напряженного состояния элементов сборной крепи из упругих материалов — железобетона и металла.

В монолитной бетонной и железобетонной крепи измерения напряжений не отличаются принципиально от измерений напряжений горных пород в незакрепленных выработках.

В элементах сборной крепи с небольшими поперечными размерами, где преимущественно имеет место одноосное напряженное состояние, для измерения деформаций разгрузки достаточно одного датчика. В этом случае применяется схема с одним тензодатчиком и напряжения определяются по формуле (7). В некоторых конструкциях, например плитах, где известно направление главных нормальных напряжений, можно производить измерения по схеме с наклейкой двух тензодатчиков с использованием для вычисления напряжений формул (8).

При исследовании напряженного состояния элементов сборной крепи необходимо соизмерять диаметр разгрузочной скважины с размерами поперечного сечения исследуемого элемента. Диаметр скважины должен быть в 5—6 раз меньше минимального поперечного размера в плоскости измерения, чтобы влияние скважины локализовалось не выходя на край элемента крепи и распределение напряжений вокруг скважины соответствовало уравнениям Кирша. По этой причине применение варианта со съемными тензометрами несколько ограничено, так как съемные тензометры имеют большие размеры по сравнению с тензодатчиками.

Измерения напряжений в конструкциях крепи дают непосредственно ответ на вопрос о прочности элементов и о их напряженном состоянии. Величину давления пород на крепь можно получить

либо расчетным путем, решая обратную задачу от известных напряжений в крепи, переходя к нагрузкам, создающим их.

Преимуществом применения метода частичной разгрузки для измерения напряжений в крепи является то, что измерения не изменяют свойства крепи, как при установке динамометров или при использовании специальных динамометрических секций крепи.

Исследование закономерностей горного давления при ведении очистных работ с помощью метода частичной разгрузки основывается на зависимости напряжений на контуре выработки от напряжений в горном массиве. Чем выше напряжения в массиве пород, тем больше напряжения на контуре выработки, пройденной в нем. На возможность такого рода исследований указывал в своей работе К. Терцаги [40]. Ранее эта идея успешно использовалась при исследовании устойчивости выработок и изучении закономерностей горного давления Ж. Талобром и Э. Тенселеном [39, 68].

Сущность исследования закономерностей горного давления с помощью метода частичной разгрузки заключается в следующем. В зоне ведения очистных работ выбираются горные выработки, которые проходят в местах, представляющих интерес с точки зрения распределения горного давления. Вдоль этих выработок производится измерение напряжений на их контуре. По характеру изменения напряжений на контуре выработки можно получить представление о распределении горного давления по массиву пород, в котором пройдена выработка, путем построения относительных эпюр распределения напряжений. Производя измерения напряжений на контуре выработки в трех точках и пользуясь формулой (23), можно получить величину и направление главных нормальных напряжений в массиве пород, действующих в плоскости поперечного сечения выработки, и построить эпюры распределения их вдоль выработки. Выбирая выработки с различным направлением, можно изучить закономерности распределения горного давления в различных плоскостях.

Такие исследования позволяют изучать распределение горного давления вокруг выработанных пространств, камер, выявлять зоны повышенных и пониженных давлений и другие вопросы. Естественно, что абсолютные величины напряжений в массиве горных пород этим способом будут найдены ориентировочно, так как выработки, в которых производятся измерения, могут в той или иной степени отличаться от идеальной круговой формы, принятой в расчете. Но качественная картина распределения напряжений в массиве будет соответствовать действительности. Применение метода частичной разгрузки для исследования закономерностей горного давления возможно в двух вариантах:

однократные измерения напряжений на контуре выработок, находящихся в зоне влияния очистных работ;

повторные измерения напряжений в близко расположенных точках через определенные промежутки времени, увязанные с продвижением и развитием очистных работ.

Повторные измерения применяют для изучения закономерности развития горного давления во времени при разработке месторождения. Однако применение такого способа исследования горного давления во времени может быть рекомендовано лишь в исключительных случаях. Во-первых, производство повторных измерений увеличивает трудоемкость работ. Во-вторых, при повторных измерениях точки замера не всегда возможно расположить на близком расстоянии. Отличия в напряженном состоянии точек и погрешности измерений могут исказить имеющиеся место закономерности изменения горного давления во времени. Ниже излагается более рациональный метод измерения напряжений во времени, основанный на использовании фотоупругих датчиков.

Достоинством метода частичной разгрузки при исследовании закономерностей распределения горного давления в зоне очистных работ являются его подвижность и небольшая трудоемкость. Эти особенности позволяют в короткий срок и без больших затрат исследовать обширные участки как по площади, так и по глубине, что гораздо труднее проделать применяя, например, способ полной разгрузки с бурением разгрузочной скважины буровым станком. Производительность метода частичной разгрузки примерно 3—4 раза выше, чем полной разгрузки.

ГЛАВА II

ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ ГОРНЫХ ПОРОД В ГЛУБИНЕ МАССИВА МЕТОДОМ ПОЛНОЙ РАЗГРУЗКИ С ФОТОУПРУГИМИ ТЕНЗОМЕТРАМИ

1. СУЩНОСТЬ И СУЩЕСТВУЮЩИЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В ГЛУБИНЕ ГОРНОГО МАССИВА

Большое значение для исследования горного давления имеют измерения напряжений в глубине горного массива. С их помощью можно изучить распределение напряжений по сечениям отдельных элементов системы разработки, что является необходимым для создания методов расчета прочных и устойчивых их параметров. Кроме того, измерения напряжений в глубине горного массива позволяют исследовать и контролировать напряженное состояние важных конструктивных элементов системы разработки, к которым нет непосредственного доступа, особенно потолочин камер и выработанных пространств.

В настоящее время методам измерения напряжений в глубине горного массива принадлежит основная роль в исследовании характера, величины и природы первоначального напряженного состояния горного массива, существующего до начала разработки месторождения. Возможность проникновения измерительными приборами в горный массив, не подверженный влиянию выработок, делает сведения о первоначальном напряженном состоянии массива наиболее достоверными.

Вопрос о первоначальном напряженном состоянии горного массива является одним из основных узловых вопросов горного давления. Проявление горного давления при ведении очистных работ и развитие его в процессе отработки месторождения являются следствием перераспределения напряжений в горном массиве, подверженном влиянию очистных работ. Напряженное состояние пород в зоне влияния очистных работ является результатом восстановления равновесия его, нарушенного образованием пустот и выемок в горном массиве. Поэтому расчетные схемы для определения параметров целиков различного назначения и других элементов системы разработки должны учитывать действительное напряженное состояние массива, направление главных нормальных напряжений и их величину.

Следовательно, с этой точки зрения значение измерений напряжений в глубине горного массива трудно переоценить.

Измерение напряжений в глубине горного массива производится методом полной разгрузки, имеющим две основные разновидности:

полная разгрузка с измерением деформаций упругого восстановления пород на забое скважины;

полная разгрузка с измерением деформаций упругого восстановления скважины малого диаметра, обуриваемой скважиной большого диаметра.

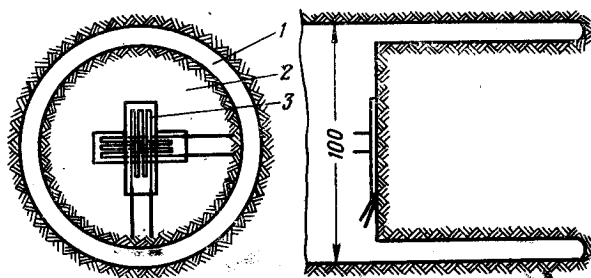


Рис. 13. Схема измерения напряжений методом полной разгрузки в глубине горного массива по ВНИМИ: 1 — разгрузочная кольцевая щель; 2 — керн; 3 — датчики сопротивления

Метод полной разгрузки с измерением деформаций на торце скважины по своей сущности является развитием метода полной разгрузки на стенках горных выработок. До последнего времени для измерения деформаций упругого восстановления пород забоя скважины использовались исключительно тензометрические датчики сопротивления. Методика измерений разработана институтом ВНИМИ и заключается в следующем [25, 26, 38].

На забой скважины, отшлифованный специальной коронкой с помощью досылочного устройства наклеивается тензометрическая головка с двумя или тремя датчиками (рис. 13). Для этой цели используется клей на основе эпоксидной смолы. После полимеризации клея производят выбуривание керна кольцевой алмазной коронкой. Глубина бурения, достаточная для полного снятия напряжений с торца керна, колеблется от 1,5 до 2 его диаметров. По главным относительным деформациям в плоскости измерения ϵ_1 и ϵ_2 главные нормальные напряжения определяются из формулы

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{E}{1-\mu^2} (\epsilon_1 + \mu \epsilon_2) \\ \sigma_2 &= \frac{E}{1-\mu^2} (\epsilon_2 + \mu \epsilon_1) \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

Первоначально этот метод использовался на угольных месторождениях, впоследствии он нашел себе широкое применение на месторождениях с крепкими породами как в отечественной практике, так и за рубежом [3, 7, 20, 21, 22, 27, 34, 58, 59, 62].

Метод полной разгрузки является одним из основных способов определения напряженности горных пород. Однако применение тензометрических датчиков сопротивления для измерения деформаций Керна при разгрузке создает некоторые затруднения в измерении напряжений.

Во-первых, при выбурировании керна с водой очень трудно поддерживать изоляцию тензодатчиков на должном уровне. Для надежной работы тензометрических датчиков, как указывалось ранее, сопротивление изоляции у них должно быть не ниже 50—100 Мом.

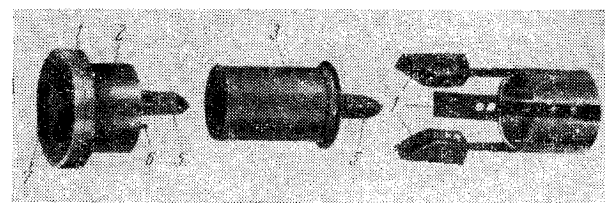


Рис. 14. Разъемная тензометрическая розетка для полной разгрузки конструкции ИГД МЧМ СССР:

1 — корпус розетки; 2 — направляющие крышки; 3 — крышка; 4 — захваты для съема крышки; 5 — направляющие штыри; 6 — контактная вилка; 7 — тензодатчики

Во-вторых, тензометрические датчики с измерительной аппаратурой связаны соединительными проводами, которые в процессе бурения находятся во вращающемся ставе штанг. Это обстоятельство также способствует снижению производительности и надежности эксперимента, так как при бурении необходимо провода пропускать через буровые штанги и оберегать их от нарушения изоляции.

Этот недостаток устранен путем изменения конструкции тензометрической головки, в которой предусмотрено штепсельное разъемное соединение, позволяющее удалять провода из скважины на время бурения [59, 60]. Однако в ней не предусмотрена гидроизоляция во время бурения той части разъемного соединения, которая остается на головке. Авторами в ИГД Минчермета СССР была сконструирована разъемная тензометрическая головка (рис. 14), которая отличалась тем, что у нее разъем на время бурения герметизировался крышкой и для совмещения штепсельной вилки с розеткой предусмотрен направляющий штырь треугольной формы с конусообразным концом, позволяющий выстроить рассогласование между разъемными частями до 30°.

Однако и в этом случае практически трудно добиться необходимой изоляции тензодатчиков, что снижает точность и надежность эксперимента.

Наличие указанных недостатков снижает эффективность описанного варианта метода полной разгрузки в глубине горного

массива. Важность вопросов, решаемых им, требует дальнейшего его совершенствования по пути повышения надежности и снижения трудоемкости измерений.

Некоторым видоизменением описанного выше метода полной разгрузки в глубине горного массива является метод так называемого лабораторного эталонирования [12, 13]. Сущность его состоит в следующем. На забой скважины, предварительно подготовленный, наклеивается специальный патрон с одним тензометрическим датчиком, направленным вертикально. После выбурива-

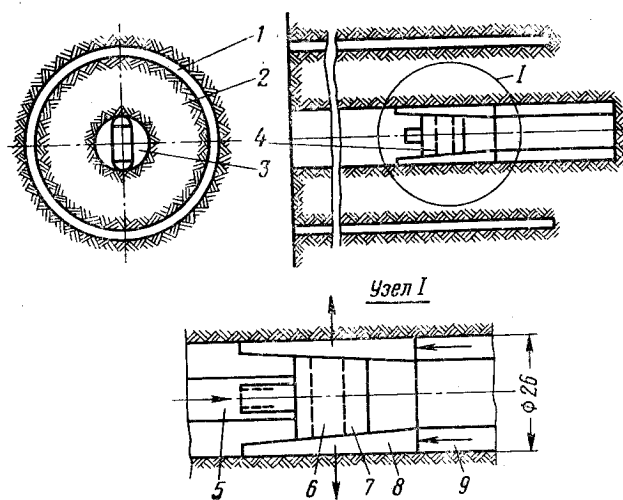


Рис. 15. Схема измерения напряжений горных пород методом полной разгрузки с выбуриванием кольцевого керна:

1 — разгрузочная кольцевая щель; 2 — керн; 3 — центральная скважина; 4 — магнитострикционный датчик; 5 — штанга; 6 — датчик; 7 — корпус датчика; 8 — клинья; 9 — упорная трубка

ния керна измеряется его деформация разгрузки. Из полученного керна изготавливается образец прямоугольной формы. Величина напряжения определяется по испытаниям образца с датчиком в лабораторных условиях на одноосное сжатие.

Метод лабораторного эталонирования не получил распространения из-за существенных погрешностей, связанных с тем, что эталонирование и измерения производятся при различных напряженных состояниях: эталонирование при одноосном, а разгрузка и измерение деформаций при двухосном.

Метод полной разгрузки с измерением деформаций упругого восстановления скважины малого диаметра, обустраиваемой скважиной большого диаметра, известен в литературе как метод Хаста. Впервые он был использован в Швеции в 1951 г.

Методика измерений заключается в следующем [52, 53]. Сначала бурят скважину диаметром 26 мм на глубину 0,5 м, в которую с помощью штанг досылается магнитострикционный датчик давления. Распор датчика в скважине осуществляется за счет трех клиньев, одним из которых служит корпус самого датчика (рис. 15). Распор создается таким, что напряжения в датчике заведомо выше ожидаемых напряжений в породе. Разгрузка производится обустраиванием скважины диаметром 26 мм скважиной диаметром 87 мм, в результате получается кольцевой керн. В процессе разгрузки керна уменьшается распор датчика. Разница между первоначальным распором и конечным дает величину напряжений в направлении оси датчика. Для получения величины и направления главных нормальных напряжений разгрузка производится трижды, последовательно разворачивая датчик на 45 или 60°. Для производства замера в одном направлении необходимо пробурить примерно 10 см, т. е. для полного замера в одной точке необходимо пройти около 30 см скважины с получением керна.

Главные нормальные напряжения определяются по данным трех измерений из формул, полученных на основании уравнений Кирша. В случае, когда три направления измерения составляют между собой угол 60°, формулы имеют вид

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1, \sigma_2 &= \frac{1}{2} \left\{ P' + P'' + P''' \pm \right. \\ &\pm \sqrt{\frac{1}{2} [(P' - P'')^2 + (P'' - P''')^2 + (P''' - P')^2]} \left. \right\} \\ \operatorname{tg} 2\varphi &= \sqrt{3} \frac{P'' - P'''}{2P' - (P'' + P''')} \\ \frac{\sin 2\varphi}{P'' - P'''} &> 0 \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

Если угол между направлениями измерения 45°, то формулы получаются следующими:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1, \sigma_2 &= \frac{3}{4} \left\{ P' + P'' \pm \sqrt{\frac{1}{2} [(P' - P'')^2 + (P'' - P''')^2]} \right\} \\ \operatorname{tg} 2\varphi &= \frac{2P'' - (P' + P''')}{P' - P'''} \\ \frac{\cos 2\varphi}{P' - P'''} &> 0 \end{aligned} \right\}, \quad (27)$$

где P', P'', P''' — значения напряжений, измеренных при различных направлениях датчика, $\kappa\Gamma/\text{см}^2$.

Основными достоинствами метода являются исключение влияния концентрации напряжений на забое скважины, процесса наклеивания тензодатчиков и надежность работы датчика. Исключение наклеивки значительно сокращает время на измерение.

Наряду с указанными достоинствами методу Хаста присущи и некоторые недостатки.

Во-первых, для получения полной информации о напряженном состоянии в точке измерения, т. е. определения величины и направления главных нормальных напряжений, необходимо проделать три разгрузки с установкой датчика в трех направлениях. Это увеличивает трудоемкость метода. В методе ВНИМИ тот же результат может быть получен за одну разгрузку при использовании розетки с тремя тензодатчиками.

Во-вторых, измерения в трех направлениях производятся в различных точках участка скважины длиной около 30 см. При высоком градиенте напряжений ошибка в определении величины и направления главных нормальных напряжений может быть значительной.

В-третьих, наличие центральной скважины в керне ослабляет его, способствуя разрушению при разгрузке. Кроме того, для успешного проведения эксперимента необходимо получить керн длиной около 10 см, что в трещиноватых породах из-за поломки керна резко снижает производительность измерений и надежность эксперимента.

В-четвертых, как и в методе ВНИМИ, соединительные провода во время бурения должны находиться во вращающемся ставе штанг.

В отечественной практике исследования горного давления схема Хаста используется институтом НИГРИ и Днепропетровским горным институтом. Методика, применяемая институтом НИГРИ, отличается от вышеописанной только конструкцией применяемых датчиков.

Методика измерения напряжений, применяемая Днепропетровским горным институтом, отличается от метода Хаста тем, что для измерения деформаций упругого восстановления скважины малого диаметра применяются индукционные датчики, измеряющие деформации скважины одновременно в трех направлениях. Это повышает производительность измерений примерно в три раза и уменьшает рассредоточенность измерений одной группы [16].

Однако измерительный датчик в данном случае имеет длину 8—9 см. Следовательно, необходимым условием благополучного исхода эксперимента является получение целого керна длиной не менее 10—15 см. В крепких трещиноватых породах такая задача очень трудновыполнима и вероятность удачного эксперимента будет небольшой.

В США Горнорудным управлением разработано четыре типа датчиков для измерения напряжений по методу Хаста. Все они основаны на измерении деформации скважины тензометрическими датчиками, наклеенными на изгибаемые или растягиваемые элементы, деформации которых взаимосвязаны с деформацией скважины [47, 51].

Приведенный краткий обзор существующих методов измерения напряжений в глубине горного массива показывает, что вопросу измерения напряжений в глубине горного массива уделяется большое внимание, о чем свидетельствует обилие измерительной аппаратуры, измерительных датчиков, разработанных различными исследователями.

Несмотря на то, что обе схемы измерения напряжений горных пород (схема Хаста и схема ВНИМИ) в настоящее время являются основными, они вместе с тем нуждаются в дальнейшем усовершенствовании в направлении повышения надежности эксперимента, снижения трудоемкости, повышения точности. Одним из совершенствований метода полной разгрузки по схеме ВНИМИ является применение фотоупругих тензометров вместо тензометрической головки с датчиками сопротивления.

2. СУЩНОСТЬ МЕТОДА ПОЛНОЙ РАЗГРУЗКИ В ГЛУБИНЕ ГОРНОГО МАССИВА С ПРИМЕНЕНИЕМ ФОТОУПРУГИХ ТЕНЗОМЕТРОВ

По своей сущности метод полной разгрузки в глубине горного массива с применением фотоупругих тензометров отличается от

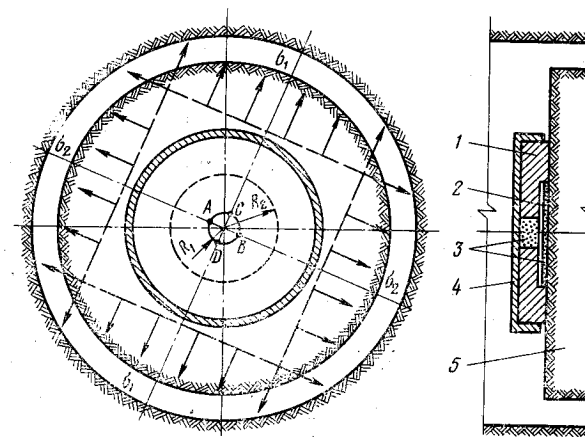


Рис. 16. Схема измерения напряжений методом полной разгрузки с применением фотоупругих тензометров:

1 — тензометр; 2 — зеркало; 3 — воск; 4 — крышка; 5 — керн
 R_1 и R_2 — соответственно радиусы внутренней и внешней рабочих частей тензометра

метода ВНИМИ только тем, что для измерения деформаций керна при разгрузке на торце скважины вместо датчиков сопротивления используются фотоупругие тензометры (рис. 13 и 16).

В фотоупругом тензомере, наклеенном на забой скважины, под действием деформаций разгрузки керна возникает поле напряжений, сложное по своей структуре. При просмотре его в поляри- скопе одностороннего действия можно наблюдать картину изоклин и изохром, соответствующую его напряженному состоянию.

Направление главных нормальных напряжений горного мас- сива в точке измерения определяется из анализа картины изо- хром и изоклин в тензомере. Величина их вычисляется по анали- тическим формулам через разность хода поляризованного света, измеренную в определенных точках тензомера.

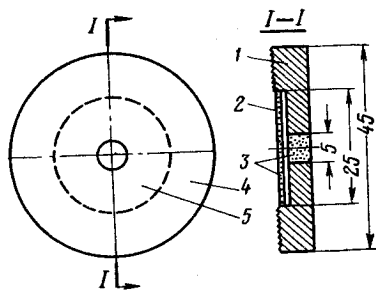


Рис. 17. Конструкция фотоупругого тензомера:

1 — диск из ЭД-6М; 2 — зеркало; 3 — воск; 4 — кольцо из ЭД-6М для наклейки тензомера к породе; 5 — рабочая часть тензомера

значено для наклейки тензомера на породу. Толщина рабочей части колеблется от 2 до 5 мм и зависит от требуемой чувстви- тельности тензомера. Внешнее кольцо на 1,5—2 мм толще рабо- чей части. Под рабочую часть тензомера кладется зеркало, обес- печивающее возможность работать с полярископом одностороннего действия. В качестве зеркала используется посеребренная, стек- лянная или отполированная никелированная металлическая пла- стинка, диаметр которой на 0,3—0,5 мм меньше диаметра рабочей части. Во избежание попадания клея между зеркалом и датчиком и чтобы зеркало не приклеивалось к породе, сзади него заливается слой воска или пластилина. Центральное отверстие также зали- вается пластилином или воском для защиты от попадания влаги и грязи между зеркалом и тензомером.

Изготовленный таким образом тензомер совершенно не бо- ится воды и приклеивается к породе только своим внешним кольцом. Величина напряжений и деформаций в рабочей части тензомера обуславливается смещениями граничных точек между рабочим кольцом и кольцом для наклейки. Величина и направле- ния их равны смещениям тех точек породы, к которым они при- клеены.

Исследования фотоупругого тензомера в поляризованном свете сводятся к определению направления главных нормальных

напряжений в керне и к измерению разности хода поляризован- ного света в четырех точках *A*, *B*, *C* и *D*, которые находятся на пересечении осей симметрии картины полос с окружностью цент- рального отверстия (рис. 18).

Картины полос и изоклин, а следовательно, и само поле на- пряжений в тензомере имеют замечательное свойство, заключаю- щееся в том, что они имеют две взаимно перпендикулярные оси симметрии, совпадающие с направлением главных нормальных

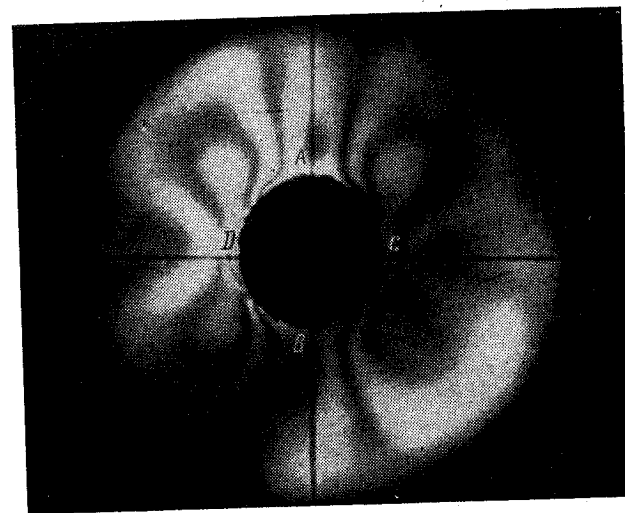


Рис. 18. Картина полос в фотоупругом тензомере: *A*, *B*, *C*, *D* — места измерений разности хода

напряжений в породе (см. рис. 18). Эти оси симметрии четко вид- ны при любом напряженном состоянии. В случае же равенства главных нормальных напряжений в породе картина полос пред- ставляет собой ряд концентрических колец и имеет бесчисленное множество осей симметрии.

Таким образом, направление главных нормальных напряже- ний в породе определяется сразу из рассмотрения картины полос. Разность хода поляризованного света измеряется с помощью по- воротного кальцитового компенсатора. Измерения разности хода поляризованного света производятся в следующем порядке. По- лярископ устанавливается так, что оси поляризаторов совпадают с осями симметрии картины полос или с нулевой изоклиной. Уста- новка производится по картине полос или изоклин с точностью до 2—3°. Отклонение направления осей поляризации от направ- ления осей симметрии на 2—3° вызывает уже заметную асиммет- рию в расположении изоклин. По лимбу, в котором поворачивается полярископ вокруг оптической оси зрительной трубы, берется

первоначальный отсчет угла, соответствующий нулевому положению полярископа. В этом положении оси поляризации в точках измерения, лежащих на пересечении осей симметрии с контуром центрального отверстия, направлены одна по касательной к контуру, а вторая перпендикулярно к нему. Поскольку главные нормальные напряжения на контуре касательны к нему, то в точках измерения будет происходить гашение света и они будут темными.

Для производства замера полярископ поворачивают вокруг оси зрительной трубы на 45° по часовой или против часовой стрелки. Оси поляризации в этом положении будут составлять угол 45° с касательной и нормалью в точках измерения. Ось поворота компенсатора будет в двух точках нормальна к контуру, а в двух касательна. Через точки измерения в таком положении будет проходить максимум света. При повороте пластинки компенсатора в точке измерения будет происходить уменьшение порядка цветов. При полном гашении света по лимбу компенсатора отсчитывается угол поворота кальцитовый пластинки, по которому из таблиц определяется разность хода поляризованного света в этой точке. Кальцитовый поворотный компенсатор КПК-1М позволяет измерять разность хода поляризованного света с точностью до 0,02 длины волны, что при использовании белого света соответствует примерно 11 Мкм. В том случае, если при повороте компенсатора в точке измерения происходит увеличение порядка цветов, полярископ необходимо развернуть вокруг оси зрительной трубы вправо или влево на 90° и производить компенсацию в новом положении.

Использование кальцитового компенсатора позволяет определять знак контурных напряжений, т. е. установить, какие напряжения в точке измерения — сжимающие или растягивающие. В том случае, когда компенсация производится при нормальной к контуру оси поворота кальцитовый пластинки, в точке измерения действуют растягивающие напряжения. Если же ось поворота кальцитовый пластинки при компенсации направлена по касательной к контуру, то в точке измерения действуют сжимающие напряжения.

Компенсация разности хода в точке измерения облегчается тем, что при повороте пластинки компенсатора в периферийной части зарождается темная полоса, соответствующая точкам, в которых произошла компенсация разности хода. При дальнейшем повороте пластинки эта полоса перемещается к центральному отверстию в виде темной тонкой полосы, повторяющей конфигурацию изохром. В связи с этим момент компенсации, соответствующий касанию темной полоской контура отверстия, может быть зафиксирован с большой точностью.

Так как измерение разности хода производится на контуре центрального отверстия в точках А, В, С и D (см. рис. 18), где действует лишь тангенциальное нормальное напряжение, то раз-

ность хода зависит лишь от его величины. Это обстоятельство дает возможность получить расчетные формулы для вычисления величин главных нормальных напряжений в породе через измеренную разность хода.

3. АНАЛИТИЧЕСКАЯ ЗАВИСИМОСТЬ МЕЖДУ РАЗНОСТЬЮ ХОДА ПОЛЯРИЗОВАННОГО СВЕТА В ТЕНЗОМЕТРЕ И ВЕЛИЧИНОЙ ГЛАВНЫХ НОРМАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОРОДЕ

Для получения расчетных формул, определяющих величину главных нормальных напряжений по разности хода поляризованного света в тензомере, необходимо получить зависимость между напряжениями в породе и тензомере.

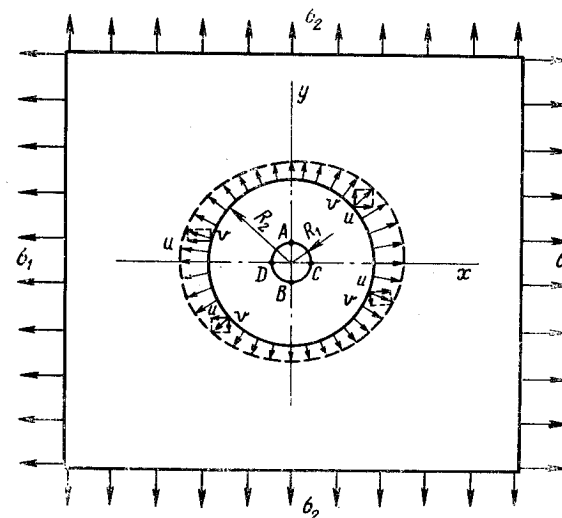


Рис. 19. Схема к выводу расчетных формул для определения напряжений с помощью фотоупругого тензометра

Экспериментально установлено, что в средней части забоя скважины имеет место однородное напряженное состояние [38, 50]. При разгрузке деформации упругого восстановления будут соответствовать однородному напряженному состоянию.

Фотоупругий тензомер, наклеенный на забой скважины, до разгрузки находится в ненапряженном состоянии. Нагружение его происходит за счет деформации при разгрузке породы. Влияние фотоупругого тензомера на деформацию керна весьма незначительно, так как модуль упругости материала тензомера в 10—20 раз меньше, чем у породы. Поэтому с полным основанием можно считать, что смещения приклеенных частей тензомера бу-

дуг равны смещениям соответствующих им точек породы разгруженного керна.

Таким образом, систему порода — тензометр схематически можно представить следующим образом. На породную пластинку наклеен фотоупругий диск с центральным отверстием так, что связь между ними осуществляется только по внешнему контуру диска (рис. 19). Диск имеет модуль упругости значительно ниже, чем пластинка, и не оказывает никакого влияния на ее деформацию. К пластинке прикладывается двухосная нагрузка интенсивностью σ_1 и σ_2 . Необходимо найти закономерность распределения напряжений, возникающих в диске.

Эта задача решается с помощью аппарата математической теории упругости методом академика Н. И. Мусхелишвили [24].

Координатные оси располагаются так, чтобы направление их совпадало с направлением главных нормальных напряжений, действующих в пластинке. Тогда смещения точек внешнего контура рабочего кольца тензометра, равные смещениям соответствующих им точек породы, определяются из формул

$$\left. \begin{aligned} u &= \varepsilon_1 x \\ v &= \varepsilon_2 y \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

где x, y — прямоугольные координаты;
 u, v — смещения, соответственно по осям x и y , см.

Координаты контурных точек x и y можно представить в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} x &= \frac{z + \bar{z}}{2} = \frac{re^{i\theta} + re^{-i\theta}}{2} \\ y &= \frac{z - \bar{z}}{2i} = \frac{re^{i\theta} - re^{-i\theta}}{2i} \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

Для точек внешнего контура рабочего кольца ($r=R_2$) координаты принимают вид

$$\left. \begin{aligned} x &= \frac{R_2 e^{i\theta} + R_2 e^{-i\theta}}{2} \\ y &= \frac{R_2 e^{i\theta} - R_2 e^{-i\theta}}{2i} \end{aligned} \right\} \quad (29')$$

где R_2 — внешний радиус рабочей части, тензометра, см.

Относительные деформации по осям x и y определяются из закона Гука и равны:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{1 + \gamma_{\text{п}}}{8G_{\text{п}}} \left(\sigma_1 - \frac{3 - \gamma_{\text{п}}}{1 + \gamma_{\text{п}}} \sigma_2 \right) \\ \varepsilon_2 &= \frac{1 + \gamma_{\text{п}}}{8G_{\text{п}}} \left(\sigma_2 - \frac{3 - \gamma_{\text{п}}}{1 + \gamma_{\text{п}}} \sigma_1 \right) \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

Здесь и в дальнейшем индекс «п» при обозначениях указывает, что данная величина относится к породе, индекс «д» — к датчику.

Подставляя выражения (29') и (30) в (28), получаем следующие уравнения для смещений точек внешнего контура:

$$\left. \begin{aligned} u &= \frac{1 + \gamma_{\text{п}}}{8G_{\text{п}}} \left(\sigma_1 - \frac{3 - \gamma_{\text{п}}}{1 + \gamma_{\text{п}}} \sigma_2 \right) \frac{R_2 e^{i\theta}}{2} + \frac{1 + \gamma_{\text{п}}}{8G_{\text{п}}} \times \\ &\quad \times \left(\sigma_1 - \frac{3 - \gamma_{\text{п}}}{1 + \gamma_{\text{п}}} \sigma_2 \right) \frac{R_2 e^{-i\theta}}{2} \\ v &= \frac{1 + \gamma_{\text{п}}}{8G_{\text{п}}} \left(\sigma_2 - \frac{3 - \gamma_{\text{п}}}{1 + \gamma_{\text{п}}} \sigma_1 \right) \frac{R_2 e^{i\theta}}{2i} - \frac{1 + \gamma_{\text{п}}}{8G_{\text{п}}} \times \\ &\quad \times \left(\sigma_2 - \frac{3 - \gamma_{\text{п}}}{1 + \gamma_{\text{п}}} \sigma_1 \right) \frac{R_2 e^{-i\theta}}{2i} \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

Таким образом, напряженное состояние фотоупругого тензометра задается смещениями, имеющими место на внешнем контуре. На контуре отверстия внешние усилия отсутствуют.

Граничные условия, определяющие напряженное состояние тензометра, записываются в следующем виде [24]:
для внешнего контура ($r=R_2$)

$$e^{-i\theta} [\chi_{\text{д}} \Phi(z) - z \overline{\Phi'(z)} - \overline{\Psi(z)}] = 2G_{\text{д}} (v_r + iv_{\theta}); \quad (32')$$

для внутреннего контура $r=R_1$

$$\Phi(z) + z \overline{\Phi'(z)} + \Psi(z) = 0, \quad (32)$$

где

$$\Phi(z) = \sum_{k=-\infty}^{k=\infty} a_k z^k;$$

$$\overline{\Phi'(z)} = \sum_{k=-\infty}^{k=\infty} k \bar{a}_k \bar{z}^{k-1};$$

$$\Psi(z) = \sum_{k=-\infty}^{k=\infty} a'_k k z^k;$$

$$\overline{\Psi(z)} = \sum_{k=-\infty}^{k=\infty} \bar{a}'_k \bar{z}^k;$$

$$v_r + iv_{\theta} = (u + iv) e^{-i\theta};$$

a_k, a'_k — комплексные постоянные, (коэффициенты рядов Фурье, подлежащие отысканию);
 R_1 — радиус отверстия тензометра, см.

Подставляя в выражения (32) и (32') значения $\varphi(z)$, $\psi(z)$, $v_r + iv_0$, получаем граничные условия в окончательном виде:

$$\begin{aligned} & \chi_d \sum_{k=-\infty}^{k=\infty} a_k R_2^k e^{(k-1)i\theta} - \sum_{k=-\infty}^{k=\infty} k \bar{a}_k R_2^k \times \\ & \times e^{-(k-1)i\theta} - \sum_{k=-\infty}^{k=\infty} \bar{a}'_k R_2^k e^{-(k+1)i\theta} = \\ & = \frac{(1 + \chi_n) G_d}{8G_n} \left[\sigma_1 - \frac{3 - \chi_n}{1 + \chi_n} \sigma_2 \right] R_2 (1 + e^{-2i\theta}) + \\ & + \frac{(1 + \chi_n) G_d}{8G_n} \left[\sigma_2 - \frac{3 - \chi_n}{1 + \chi_n} \sigma_1 \right] R_2 (1 - e^{-2i\theta}); \end{aligned} \quad (33)$$

$$\sum_{k=-\infty}^{k=\infty} a_k R_1^k e^{ki\theta} + \sum_{k=-\infty}^{k=\infty} k \bar{a}_k R_1^k e^{(2-k)i\theta} + \sum_{k=-\infty}^{k=\infty} \bar{a}'_k R_1^k e^{-ki\theta} = 0. \quad (33')$$

Раскладывая ряды Фурье в левых частях выражений (33) и (33') и сравнивая выражения при одинаковых степенях $e^{i\theta}$ в правой и левой частях, получим систему уравнений для отыскания коэффициентов рядов Фурье:

$$\left. \begin{aligned} & \chi_d a_1 R_2 - a_1 R_2 - a'_{-1} \frac{1}{R_2} = \frac{(1 + \chi_n) G_d}{8G_n} (\sigma_1 + \sigma_2) \times \\ & \times \left(1 - \frac{3 - \chi_n}{1 + \chi_n} \right) \\ & 2a_1 R_1 + a'_{-1} \frac{1}{R_1} = 0 \\ & \chi_d a_3 R_2^3 + \bar{a}_{-1} \frac{1}{R_2} - \bar{a}'_{-3} \frac{1}{R_2^3} = 0 \\ & \chi_d a_{-1} \frac{1}{R_2} - 3\bar{a}_3 R_2^3 - \bar{a}'_1 R_2 = \frac{(1 + \chi_n) G_d}{8G_n} \times \\ & \times (\sigma_1 - \sigma_2) \left(1 + \frac{3 - \chi_n}{1 + \chi_n} \right) \\ & a_3 R_1^3 - \bar{a}_{-1} \frac{1}{R_1} + \bar{a}'_{-3} \frac{1}{R_1^3} = 0 \\ & a_{-1} \frac{1}{R_1} + 3\bar{a}_3 R_1^3 + \bar{a}'_1 R_1 = 0 \end{aligned} \right\} \quad (34)$$

В результате решения этих уравнений имеем следующие выражения для коэффициентов:

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= \frac{R_2^2 G_d (\chi_n - 1)}{4G_n [R_2^2 (\chi_d - 1) + 2R_1^2]} (\sigma_1 + \sigma_2) \\ a'_{-1} &= - \frac{R_1^2 R_2^2 G_d (\chi_n - 1)}{2G_n [R_2^2 (\chi_d - 1) + 2R_1^2]} (\sigma_1 + \sigma_2) \\ a_3 &= \frac{1}{D} \frac{G_d}{2G_n} R_1^2 R_2^2 (R_2^2 - R_1^2) (\sigma_1 - \sigma_2) \\ a'_1 &= \frac{1}{D} \frac{G_d}{2G_n} R_2^2 [R_2^2 (\chi_d R_2^4 - 3R_1^4) + 4R_1^6] (\sigma_1 - \sigma_2) \\ a'_{-3} &= - \frac{1}{D} \frac{G_d}{2G_n} R_1^2 R_2^4 (\chi_d R_2^4 - R_1^4) (\sigma_1 - \sigma_2) \\ a_{-1} &= \frac{1}{D} \frac{G_d}{2G_n} R_1^2 R_2^2 [3R_1^4 (R_2^2 - R_1^2) + R_2^2 \times \\ & \times (\chi_d R_2^4 - 3R_1^4) + 4R_1^6] (\sigma_1 - \sigma_2) \end{aligned} \right\} \quad (35)$$

где

$$D = -(\chi_d R_1^2 + R_2^2) [R_2^2 (\chi_d R_2^4 - 3R_1^4) + 4R_1^6] - 3R_1^2 (\chi_d R_1^4 + R_2^4) (R_2^2 - R_1^2).$$

Функции $\varphi(z)$ и $\psi(z)$ принимают вид:

$$\left. \begin{aligned} \varphi(z) &= \sum_{k=-\infty}^{k=\infty} a_k z^k = a_{-1} \frac{1}{z} + a_1 z + a_3 z^3 \\ \psi(z) &= \sum_{k=-\infty}^{k=\infty} a'_k z^k = a'_{-3} \frac{1}{z^3} + a'_{-1} \frac{1}{z} + a'_1 z \end{aligned} \right\} \quad (36)$$

Напряжения в диске с помощью этих функций определяются из следующих формул:

$$\widehat{rr} + \widehat{\theta\theta} = 4\Gamma\varphi'(z) = 4a_1 - 4a_{-1} \frac{1}{r^2} \cos 2\theta + 12a_3 r^2 \cos 2\theta; \quad (37)$$

$$\begin{aligned} \widehat{\theta\theta} - \widehat{rr} + 2i\widehat{r\theta} &= 2e^{2i\theta} [z\varphi''(z) + \psi'(z)] = 4a_{-1} \frac{1}{r^2} e^{-2i\theta} + \\ &+ 12a_3 r^2 e^{2i\theta} - 6a'_{-3} \frac{1}{r^4} e^{-2i\theta} - 2a'_{-1} \frac{1}{r^2} + 2a'_1 e^{2i\theta}, \end{aligned} \quad (38)$$

где Γ — символ реальной части комплексного выражения. Отделяя в выражении (38) действительную часть от мнимой, получаем:

$$\begin{aligned} \widehat{\theta\theta} - \widehat{rr} &= 12a_3 r^2 \cos 2\theta - 2a'_{-1} \frac{1}{r^2} + \\ &+ 4a'_{-1} \frac{1}{r^2} \cos 2\theta - 6a'_{-3} \frac{1}{r^4} \cos 2\theta + 2a'_1 \cos 2\theta. \end{aligned} \quad (39)$$

Из выражений (37) и (39) имеем:

$$\widehat{\theta\theta} = 2a_1 - a'_{-1} \frac{1}{r^2} + \left(12a_3 r^2 - 3a'_{-3} \frac{1}{r^4} + a'_1 \right) \cos 2\theta. \quad (40)$$

Тангенциальные напряжения в точках измерения разности хода поляризованного света определяются из выражения (40) подстановкой соответствующих значений для точек A и B ($r=R_1$, $\cos 2\theta=1$); для точек C и D ($r=R_1$, $\cos 2\theta=-1$).

$$\widehat{\theta\theta}_{AB} = 2a_1 - a'_{-1} \frac{1}{R_1^2} + 12a_3 R_1^2 - 3a'_{-3} \frac{1}{R_1^4} + a'_1; \quad (40')$$

$$\widehat{\theta\theta}_{CD} = 2a_1 - a'_{-1} \frac{1}{R_1^2} - 12a_3 R_1^2 + 3a'_{-3} \frac{1}{R_1^4} - a'_1. \quad (40'')$$

Введем обозначения:

$$\begin{aligned} b_1 &= \frac{a_1}{\sigma_1 + \sigma_2}; & b_3 &= \frac{a_3 R_1^2}{\sigma_1 - \sigma_2}; \\ b_2 &= \frac{a'_{-1}}{(\sigma_1 + \sigma_2) R_1^2}; & b_4 &= \frac{a'_{-3}}{(\sigma_1 - \sigma_2) R_1^4}; \\ b_5 &= \frac{a'_1}{\sigma_1 - \sigma_2}. \end{aligned}$$

После подстановки их в выражения (40') и (40'') получаем следующие выражения для $\widehat{\theta\theta}_{AB}$ и $\widehat{\theta\theta}_{CD}$:

$$\begin{aligned} \widehat{\theta\theta}_{AB} &= (2b_1 - b_2)(\sigma_1 + \sigma_2) + (12b_3 - 3b_4 + b_5)(\sigma_1 - \sigma_2); \\ \widehat{\theta\theta}_{CD} &= (2b_1 - b_2)(\sigma_1 + \sigma_2) - (12b_3 - 3b_4 + b_5)(\sigma_1 - \sigma_2); \end{aligned} \quad (41)$$

Разность хода поляризованного света, проходящего через фотоупругий тензорметр в прямом и обратном направлениях, в точках A , B , C и D равна:

$$\left. \begin{aligned} \Gamma_{AB} &= 2tC\widehat{\theta\theta}_{AB} \\ \Gamma_{CD} &= 2tC\widehat{\theta\theta}_{CD} \end{aligned} \right\}, \quad (42)$$

где Γ_{AB} , Γ_{CD} — разность хода поляризованного света соответственно в точках A, B и C, D , $M\mu$;

t — толщина рабочей части тензорметра, cm ;

C — коэффициент оптической чувствительности, брьюстер.

Подставляя в эти уравнения выражения для $\widehat{\theta\theta}_{AB}$ и $\widehat{\theta\theta}_{CD}$ из выражения (41) и решая полученные уравнения относительно σ_1 и

σ_2 , получаем окончательные формулы для вычисления величины главных нормальных напряжений в породе:

$$\sigma_1, \sigma_2 = \frac{1}{8Ct} \left[\frac{\Gamma_{AB} + \Gamma_{CD}}{A} \pm \frac{\Gamma_{AB} - \Gamma_{CD}}{B} \right], \quad (43)$$

где $A = 2b_1 - b_2$;

$$B = 12b_3 - 3b_4 + b_5;$$

$$b_1 = \frac{G_d R_2^2 (\chi_n - 1)}{4G_n [R_2^2 (\chi_d - 1) + 2R_1^2]};$$

$$b_2 = - \frac{G_d R_2^2 (\chi_n - 1)}{2G_n [R_2^2 (\chi_d - 1) + 2R_1^2]};$$

$$b_3 = \frac{1}{2D} \frac{G_d}{G_n} R_1^4 R_2^2 (R_2^2 - R_1^2);$$

$$b_4 = - \frac{1}{2D} \frac{G_d}{G_n} R_2^4 (\chi_d R_2^4 - R_1^4);$$

$$b_5 = \frac{1}{2D} \frac{G_d}{G_n} R_2^2 [R_2^2 (\chi_d R_2^4 - 3R_1^4) + 4R_1^6];$$

$$D = -(\chi_d R_1^2 + R_2^2) [R_2^2 (\chi_d R_2^4 - 3R_1^4) + 4R_1^6] - 3R_1^2 (\chi_d R_1^4 + R_2^4) (R_2^2 - R_1^2).$$

Таким образом, формулы (43) позволяют по измеренной разности хода поляризованного света определить величину главных нормальных напряжений в породе, а рассмотрение картины полос непосредственно дает их направление.

4. СВОЙСТВА ФОТОУПРУГИХ ТЕНЗОМЕТРОВ

Материалом для изготовления фотоупругих тензорметров служит отвержденная эпоксидная смола ЭД-6 с добавкой 30% малеинового ангидрида, известная в литературе под маркой ЭД-6М. Пластифицирующие добавки не применяются, так как введение их снижает модуль упругости материала и его оптическую чувствительность по деформации G_e . Кроме того, эти добавки вызывают ряд недопустимых явлений, таких, как оптическая релаксация и ползучесть.

Режимы отверждения эпоксидной смолы и отжига изделий из нее для снятия остаточных напряжений после отверждения и изготовления подробно освещены в работах [9, 42, 43]. Для устранения краевого эффекта в состав смолы при полимеризации вводится 0,1—0,2 весовых частей диметиланилина. При выдержке оптически активного материала, приготовленного с добавкой чистого диметиланилина в чистом глицерине в течение 70—75 ч, краевой эффект, возникающий с течением времени, полностью устраняется [15].

1 Н. П. Влох, А. Д. Сашурин

Остаточные напряжения в фотоупругом тензомере после отжига могут достигать значительной величины. Практически полностью избавиться от них не представляется возможным. При рассмотрении тензомера в поляризованном свете интерференционная картина полос, соответствующая остаточным напряжениям, представляет собой ряд концентрических колец вокруг отверстия. По знаку остаточные напряжения на контуре преимущественно растягивающие.

Тензомеры, имеющие не более двух полос остаточных напряжений, при условии их равномерности по всему контуру вполне могут быть использованы для измерений. При нагружении таких тензомеров, в том случае, когда главные деформации не равны, концентрические окружности в зависимости от величины деформаций могут превратиться в овалы или в типичную картину полос, представленную на рис. 18.

Максимальные напряжения в фотоупругом тензомере возникают на контуре центрального отверстия. Расчет по формуле (41) показывает, что в том случае, когда измеряются одноосные напряжения в породах с модулем упругости $1 \cdot 10^6$ кг/см² тензомером с модулем упругости $3,25 \times 10^4$ кг/см², максимальные напряжения на контуре внутреннего отверстия определяются соотношением $\overline{\theta\theta}_{AB} = 0,074$. Таким образом, максимальные напряжения в тензомере составляют всего 7,4% от напряжений в породе.

Разность хода поляризованного света в тензомере зависит от величины напряжений, его толщины и оптической активности

$$\Gamma_{AB} = \overline{\theta\theta}_{AB} C 2t = 0,074 \sigma_1 C 2t. \quad (44)$$

Для ЭД-6М с коэффициентом оптической активности C , равным 62,1 на 1 кг/см² напряжений в породе приходится разность хода

$$\Gamma_{AB} = 9,2t. \quad (44')$$

При толщине тензомера 0,3—0,5 см разность хода, соответствующая напряжением в породе 1 кг/см² составит примерно 3—5 Ммк.

Используемый для измерений разности хода поляризованного света поворотный кальцитовый компенсатор позволяет производить измерения с точностью до 10—11 Ммк. Таким образом, тензомер имеет чувствительность 2—3 кг/см² при измерениях в крепких горных породах с модулем упругости около $1 \cdot 10^6$ кг/см². Такая чувствительность является вполне приемлемой для исследования горного давления.

Относительно низкие значения максимальных напряжений в тензомере избавляют его от явлений ползучести и оптической релаксации. По данным В. Ф. Трумбачева и Г. А. Каткова, при заданной относительной деформации в ЭД-6М, равной 1%, изме-

нение разности хода лучей составляет 2,5% от первоначально измеренной величины; при деформации 1,5% оно равно 3,5% [42]. Тензомер при напряжениях в породе 1000 кг/см² имеет максимальные относительные деформации 0,23%. Следовательно, пределы работы тензомеров позволяют при измерениях пренебрегать их оптической релаксацией.

Для проверки тензомеры наклеивались на металлические образцы, которые нагружались под прессом до 1000 кг/см². Повторные нагружения с выдержкой под нагрузкой в течение нескольких часов не вызывали в тензомерах оптической релаксации. После эксперимента в тензомерах остаточных напряжений не наблюдалось.

Фотоупругие тензомеры из ЭД-6М сохраняют свои упругие и оптические постоянные при незначительных колебаниях температуры в шахтных условиях и при любой влажности. Изменение свойств наступает лишь при более высоких температурах — порядка +80° С [42]. При выбуривании керн с промывкой такой высокой температуры не возникает.

5. ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ И ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Процесс разгрузки, досылка и наклейка тензомеров на забой скважины аналогичны известной методике ВНИМИ [26, 38].

Перед наклейкой тензомера на него с лицевой стороны надевают защитную крышку, обклеенную с внутренней стороны пористой резиной и предохраняющую полированную поверхность от воздействия шлама во время разгрузки. Стрелки, показывающие ориентировку тензомера, на крышке и на тензомере совмещаются друг с другом. Затем тензомер своей защитной крышкой устанавливают в головке самоориентирующегося досылочного устройства конструкции ВНИМИ и наносят клей по кольцу склейки. Досылочное устройство вместе с тензомером штангами подают до забоя скважины, предварительно отшлифованного и промытого ацетоном, и крепко прижимают к нему. Мягкая пористая резина, используемая в качестве прокладки в защитной крышке, позволяет выбирать перекосы до 1—2 мм и обеспечивает плотное прижатие тензомера по всему кольцу склейки.

Для наклеивания тензомера применяют клей циакрин. Время схватывания его во влажных условиях, как указывалось ранее, не превышает 1—2 мин. Поэтому через 5—10 мин досылочное устройство можно извлекать. После его удаления проверяют ориентировку тензомера по стрелке, нанесенной на его крышке (рис. 20).

Через 1—1,5 ч после наклейки тензомера выбуривается керн, который извлекается в выработку, где производится исследование тензомера с помощью ручного полярископа (рис. 21). При исследовании определяется направление главных нормальных напря-

жений и измеряется разность хода поляризованного света в точках *A, B, C* и *D* (см. рис. 18). Если в тензомере существуют остаточные напряжения, то величина разности хода, обусловленная раз-

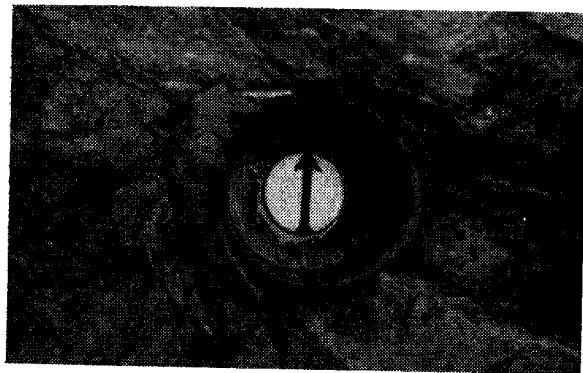


Рис. 20. Фотоупругий тензомер с крышкой, наклеенной на забой скважины (стрелка на крышке показывает ориентировку тензомера)

грузкой породы керна, определяется вычитанием из разности хода, полученной при разгрузке, разности хода, обусловленной остаточными напряжениями.

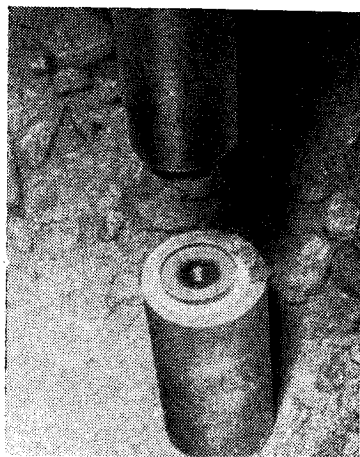


Рис. 21. Исследование фотоупругого тензомера после разгрузки в шахтных условиях

деление упругих постоянных породы необходимо производить для каждой точки измерения. При этом материалом для изготовления образцов служат керны, получаемые при разгрузке.

Упругие и оптические постоянные материала тензомера определяются различными способами на тарировочных образцах. Форма их и методика испытаний изложены в работах [8, 43, 46]. Правильность определения упругих и оптических постоянных материала тензомера также оказывает большое влияние на точность измерений. Поэтому тарировочные образцы изготавливаются из каждой пластинки или блока ЭД-6М, из которых готовятся тензометры, и подвергаются тем же процессам отжига, что и тензометры. Результаты испытания заносятся в паспорт, который необходимо иметь для каждого тензомера.

После определения упругих постоянных породы величина главных нормальных напряжений может быть легко получена из формул (43). Вычисления по ним могут быть значительно упрощены, если выражения для коэффициентов b_1, b_2, b_3, b_4, b_5 преобразовать следующим образом:

$$\begin{aligned} b_1 &= \frac{\chi_{\pi} - 1}{G_{\pi}} K_1; & b_3 &= \frac{1}{G_{\pi}} K_3; \\ b_2 &= \frac{\chi_{\pi} - 1}{G_{\pi}} K_2; & b_4 &= \frac{1}{G_{\pi}} K_4; \\ b_5 &= \frac{1}{G_{\pi}} K_5, \end{aligned} \quad (45)$$

где

$$\begin{aligned} K_1 &= \frac{G_d R_2^2}{4 [R_2^2 (\chi_d - 1) + 2R_1^2]}; \\ K_2 &= - \frac{G_d R_2^2}{2 [R_2^2 (\chi_d - 1) + 2R_1^2]}; \\ K_3 &= \frac{1}{2D} G_d R_1^4 R_2^2 (R_2^2 - R_1^2); \\ K_4 &= - \frac{1}{2D} G_d R_2^4 (\chi_d R_2^4 - R_1^4); \\ K_5 &= \frac{1}{2D} G_d R_2^2 [R_2^2 (\chi_d R_2^4 - 3R_1^4) + 4R_1^6]. \end{aligned}$$

Тогда коэффициенты K_1, K_2, K_3, K_4 и K_5 будут независимыми от свойств породы и окажутся постоянными для каждого тензомера. Они вычисляются и заносятся в его паспорт.

При наличии такого паспорта с вычисленными коэффициентами определение величины главных нормальных напряжений по формуле (43) занимает 10—15 мин.

Погрешность метода полной разгрузки с применением фотоупругих тензометров зависит от погрешностей при определении упругих постоянных пород, упругих и оптических постоянных тен-

Типовой паспорт на фотоупругий тензометр

Тензометр № _____

1. Материал тензометра _____
2. Свойства материала тензометра:
 - оптическая постоянная $C =$ _____
 - модуль упругости $E_d =$ _____
 - коэффициент Пуассона $\nu_d =$ _____
 - модуль сдвига $G_d =$ _____
 - коэффициент $\chi_d =$ _____
3. Размеры тензометра:
 - радиус отверстия $R_1 =$ _____
 - радиус рабочего кольца $R_2 =$ _____
 - внешний радиус $R_3 =$ _____
 - толщина рабочей части $t =$ _____
4. Коэффициенты:
 - $K_1 =$ _____
 - $K_2 =$ _____
 - $K_3 =$ _____
 - $K_4 =$ _____
 - $K_5 =$ _____

зометра, размеров тензометра и разности хода поляризованного света. Погрешности, возникающие при измерении исходных величин и при вычислении промежуточных и конечных функций, приведены в табл. 5.

Из этой таблицы следует, что при соответствующих ошибках измерения исходных величин, указанных в таблице, предельная относительная погрешность измерений составит для $\sigma_1 = 7\%$ и для $\sigma_2 = 8,8\%$.

При ведении измерений напряжений в глубине горного массива необходимо следить за тем, чтобы температура наклеивания и температура, при которой производится измерение после разгрузки, были одинаковыми. Для этого проводятся контрольные измерения температуры пород на различном удалении от выработки и в выработке. В том случае, если температура пород в выработке и в глубине горного массива различна, необходимо вводить поправку, учитывающую погрешность от разницы температуры пород, на которые производится наклейка, и температуры, при которой производится измерение разности хода. Погрешность обусловлена тем, что материал тензометра и породы имеют разные коэффициенты линейного расширения. Поэтому при нагревании или при охлаждении они деформируются на различную величину и в тензометре возникает дополнительное поле

Т а б л и ц а 5

Функции и их аргументы		Абсолютная величина	Средняя квадратичная ошибка
Исходные величины	R_1	0,25	0,01
	R_2	1,25	0,005
	t	0,5	0,005
	$E_{\text{п}}$	$100 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^4$
	$\nu_{\text{п}}$	0,3	0,006
	E_d	$3,5 \cdot 10^4$	$0,07 \cdot 10^4$
	ν_d	0,35	0,007
	C	60	0,7
	Γ_{AB}	1000	11,0
	Γ_{CD}	600	11,0
Промежуточные функции	$G_{\text{п}}$	$38,5 \cdot 10^4$	$0,79 \cdot 10^4$
	$\chi_{\text{п}}$	2,07	0,0141
	G_d	$1,295 \cdot 10^4$	$0,0268 \cdot 10^4$
	χ_d	1,965	0,0154
	b_1	0,0086	0,00031
	b_2	-0,0172	0,001
	b_3	-0,0000116	0,0000019
	b_4	0,0149	0,00061
	b_5	0,149	0,00025
	D	-13,14	0,400
Искомые функции	A	0,0344	0,0012
	B	-0,0597	0,0018
	σ_1	110,5	3,81
	σ_2	82,7	3,63
	Предельные относительные погрешности $X_{\text{пр}} = 2 \text{ м, \%}$	σ_1 σ_2	7 8,8

напряжений, вызывающее соответствующую ему разность хода. Породы имеют коэффициент линейного расширения меньше, чем ЭД-6М. Поэтому при повышении температуры в тензометре будет возникать дополнительная разность хода, соответствующая сжимающим напряжениям, при понижении температуры возникает разность хода, соответствующая растяжению.

Поправка на измерение температуры вводится в разность хода, измеренную в тензометре, и определяется по формуле

$$\Delta \Gamma = 64 K_1 C t \Delta T (\alpha_{\text{п}} - \alpha_{\text{д}}), \quad (45')$$

где $\Delta \Gamma$ — разность хода, обусловленная изменением температуры $M_{\text{мк}}$;

$\Delta T = T_{\text{нак}} - T_{\text{из}}$ — разность между температурой наклейки и температурой измерений, град;

K_1 — коэффициент из паспорта тензомера;
 $\alpha_{\text{л}}, \alpha_{\text{д}}$ — коэффициенты линейного расширения породы и тензомера.

Поправка вводится с одинаковым знаком в Γ_{AB} и Γ_{CD} . При увеличении температуры со знаком плюс, при снижении — с минусом.

Практически, чтобы не производить измерений коэффициента линейного расширения, поправку на температуру можно определять следующим образом. Произвести измерения разности хода поляризованного света в горной выработке при температуре T' , затем на поверхности произвести измерения при другой температуре T'' . Поправка определяется из следующего выражения:

$$\Delta\Gamma = \frac{(\Gamma'_{AB} - \Gamma''_{AB}) + (\Gamma'_{CD} - \Gamma''_{CD})}{2(T' - T'')} \Delta T. \quad (46)$$

Учитывая то обстоятельство, что породы имеют довольно близкие по значению коэффициенты линейного расширения, эксперименты с измерением разности хода можно производить не для каждой точки, а лишь для одного типа пород и в дальнейшем — выборочно для контроля.

Для проверки работоспособности тензометров проводились лабораторные эксперименты. На металлическую плитку с размерами $100 \times 60 \times 10$ мм наклеивался тензомер. Плитка нагружалась на сжатие с помощью пресса. Величину напряжений в ней измеряли фотоупругим тензомером. Результаты измерений приведены в табл. 6.

Таблица 6

Заданные напряжения, кг/см^2	Разность хода, Ммк		Измеренные напряжения, кг/см^2	Ошибка, %
	Γ_{AB}	Γ_{CD}		
—378	—486	+180	—373	1,3
—915	—1190	+375	—920	0,5

Таким образом, тензомеры обладают высокой точностью при измерении напряжений. В процессе эксперимента явлений оптической релаксации остаточной разности хода в тензомере не наблюдалось.

6. ВОПРОСЫ, РЕШАЕМЫЕ МЕТОДОМ ПОЛНОЙ РАЗГРУЗКИ В ГЛУБИНЕ ГОРНОГО МАССИВА И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕГО ДАЛЬНЕЙШЕГО ПРИМЕНЕНИЯ

Метод полной разгрузки в глубине горного массива является трудоемким и дорогостоящим методом измерения напряжений в горных породах. Однако перед другими методами он имеет огром-

ное преимущество — возможность проникновения на значительные расстояния от горных выработок и от различного рода обнажений. Практически эта глубина в настоящее время не превышает 15—20 м.

Сравнительно большие затраты на измерение напряжений методом полной разгрузки делают необходимым использовать его в тех случаях, когда требуется измерения производить в глубине горного массива, и поставленная задача не может быть разрешена каким-либо другим методом, менее трудоемким и менее дорогостоящим. Поэтому прежде чем использовать метод при решении тех или иных вопросов горного давления, необходимо рассмотреть его возможности, эффективность и целесообразность применения.

Так, например, изучение закономерностей горного давления в рудном и породном массивах, прилегающих к выработанному пространству, методом полной разгрузки является нецелесообразным. Для решения этого вопроса необходимо произвести измерения напряжений на большой площади и на различных глубинах. При этом закономерности распределения напряжений по горному массиву будут тем полнее исследованы, чем чаще точки измерения будут расположены на исследуемом участке. Применение метода полной разгрузки для этих целей потребует многочисленных перестановок станка, используемого для выбуривания керна, и тем самым потребует больших затрат труда. Более эффективна в этом случае будет комбинация метода частичной разгрузки на обнажениях с методом полной разгрузки в глубине горного массива.

Одним из основных вопросов, для исследования которого применяется метод полной разгрузки в глубине горного массива, является изучение распределения напряжений по поперечному сечению элементов системы разработки и вокруг выработок различного назначения. Такие исследования предпринимались для выяснения механизма работы под нагрузкой конструктивных элементов системы разработки, изучения и контроля их прочности и устойчивости, для создания научно обоснованных схем и методов расчета их на прочность и устойчивость.

Исследования в этом случае сводятся к отысканию эпюр распределения напряжений по длине скважины, пробуренной в определенном направлении по сечению исследуемого элемента. Измеряются величины и направления главных нормальных напряжений в плоскости забоя скважины. Естественно, что они не являются главными нормальными напряжениями массива в точке измерения, и поэтому далеко не всегда могут служить характеристикой напряженного состояния массива. Однако практических методов измерения главных нормальных напряжений в точках по длине скважины не существует. Лишь в некоторых случаях, при наличии осей симметрии в исследуемой конструкции и в приложенной к ней нагрузке, главные нормальные напряжения в массиве пород можно измерить, направляя скважину по оси симметрии. Тогда одно из главных нормальных напряжений будет направлено по оси сква-

жины, а два будут находиться в плоскости забоя скважины и их величина и направление измеряются при разгрузке.

Вторым важным вопросом, решение которого производится с помощью метода разгрузки в глубине горного массива, является изучение первоначального напряженного состояния горного массива. Ранее уже упоминалось, что в настоящее время о нем нет единого представления. Однако первоначальное напряженное состояние горных пород является одним из основных факторов, обуславливающих величину горного давления и характер его проявления. Поэтому исследование напряженного состояния нетронутого массива горных пород является принципиальным, узловым вопросом науки о горном давлении. Кроме того, напряженное состояние нетронутого массива верхней части земной коры представляет интерес для геологии и геофизики с точки зрения изучения образования отдельных структур горных пород в верхней части земной коры.

При исследовании первоначального напряженного состояния горного массива в задачу измерений входит определение величины и направления в пространстве главных нормальных напряжений в точке измерения, за которую принимается точка стояния бурового станка.

Для определения величины и направления главных нормальных напряжений в пространстве необходимо знать полный тензор напряжений (T_n) в точке измерения [5]:

$$T_n = \begin{vmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yz} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{vmatrix}.$$

Для нахождения величины всех его компонентов необходимо произвести измерения в трех скважинах, расположенных под углом 90° друг к другу, как показано на рис. 22. Эти измерения основываются на следующих принципах:

определение напряжений производится примерно на одинаковом удалении от выработки во всех скважинах, так что плоскости забоев находятся на гранях воображаемого куба;

воображаемый куб, на гранях которого производятся измерения, предполагается элементарным объемом, внутри которого напряжения распределяются равномерно;

центром элементарного объема является точка стояния бурового станка.

Скважины лучше всего располагать так, чтобы одна из них была вертикальной. Естественно, что это не является обязательным условием, однако такое расположение скважин упростит пространственную ориентировку главных нормальных напряжений. Если выбрать координатные оси таким образом, чтобы ось y совпадала с осью вертикальной скважины, а оси x и z — с осями горизонтальных скважин, то в скважинах будут измеряться следующие компоненты тензора напряжений:

в скважине, направленной по оси x , — σ_y , σ_z , τ_{yz} , τ_{zy} ; в скважине, направленной по оси y , — σ_x , σ_z , τ_{zx} , τ_{xz} ; в скважине, направленной по оси z , — σ_x , σ_y , τ_{xy} , τ_{yx} .

Таким образом, нормальные компоненты тензора напряжений измеряются дважды. Усреднение их величины при составлении тензора напряжений уменьшит возможные случайные ошибки, вызванные неравномерностью в распределении напряжений. Кроме того, все величины, измеряемые в одной скважине, усредняются по 4—6 точкам, расположенным за зоной влияния выработки.

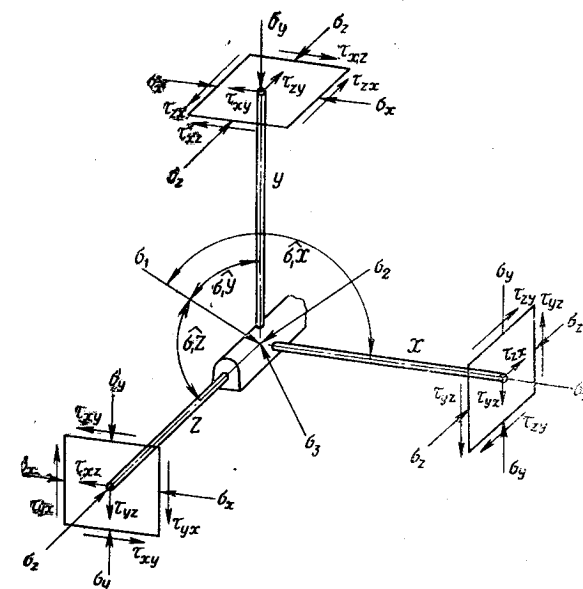


Рис. 22. Схема к определению главных нормальных напряжений в горном массиве

После получения тензора напряжений величины и направления главных нормальных напряжений в горном массиве определяются по обычным формулам теории упругости, выражающим зависимость между компонентами напряжений при различной ориентации системы координат [5, 23]. Величины главных нормальных напряжений находятся из решения кубического уравнения.

$$\sigma^3 - q_1\sigma^2 + q_2\sigma - q_3 = 0, \quad (47)$$

где q_1 , q_2 , q_3 — инварианты тензора напряжений.

При решении этого кубического уравнения получаются три значения σ , которым присваиваются индексы так, чтобы $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$. Инварианты тензора напряжений определяются следующими выражениями:

$$q_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z; \quad (48)$$

$$q_2 = \sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_z + \sigma_z \sigma_x - \tau_{xy}^2 - \tau_{yz}^2 - \tau_{zx}^2; \quad (49)$$

$$q_3 = \sigma_x \sigma_y \sigma_z + 2\tau_{xy} \tau_{yz} \tau_{zx} - \sigma_x \tau_{yz}^2 - \sigma_y \tau_{zx}^2 - \sigma_z \tau_{xy}^2. \quad (50)$$

Направление каждого нормального напряжения определяется в пространстве тремя углами, составляемыми направлением вектора напряжений с осями координат. Введем для косинусов этих углов следующие обозначения:

$$\cos(x, \hat{\sigma}_i) = l_i; \quad \cos(y, \hat{\sigma}_i) = m_i; \quad \cos(z, \hat{\sigma}_i) = n_i. \quad (51)$$

Величины косинусов направляющих углов l , m и n определяются из уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x l_i + \tau_{xy} m_i + \tau_{xz} n_i &= \sigma_i l_i \\ \tau_{yx} l_i + \sigma_y m_i + \tau_{yz} n_i &= \sigma_i m_i \\ \tau_{zx} l_i + \tau_{zy} m_i + \sigma_z n_i &= \sigma_i n_i \end{aligned} \right\}, \quad (52)$$

где $i = 1, 2, 3$ — индексы главных нормальных напряжений.

Таким образом, измерения напряжений в трех взаимно перпендикулярных скважинах дают полное представление о напряженном состоянии горного массива и позволяют построить пространственный эллипсоид напряжений.

Для того чтобы эти измерения соответствовали действительности, необходимо выполнять следующие условия:

глубина от дневной поверхности, где производится исследование, должна в 5—10 раз превосходить размер ребра воображаемого элементарного куба;

место измерения должно находиться за зоной влияния очистных работ при исследовании первоначального напряженного состояния или в зоне плавного изменения напряжений при изучении напряженного состояния горного массива, вызванного эксплуатационными выработками.

Располагая точки измерения в определенном порядке по всему шахтному полю, можно получить представление о величине напряжений и преобладающих направлениях их действия. Эти знания позволяют правильно запроектировать горные выработки, систему разработки и порядок отработки месторождения.

Свойства фотоупругого тензометра открывают перспективу использования метода полной разгрузки для измерения напряжений в глубоких скважинах, пробуренных с поверхности при разведке месторождений. Это даст возможность одновременно с разведкой месторождения произвести исследование его напряженности до начала отработки. Такая разведка является совершенно необходимой для того, чтобы при проектировании системы разработки месторождения более обоснованно выбирать метод управления горным давлением и места заложения основных горных выработок, а также составлять генеральный план разработки месторождения.

ГЛАВА III ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В МАССИВЕ ГОРНЫХ ПОРОД ВО ВРЕМЕНИ

Напряженное состояние массива горных пород, находящегося в зоне влияния очистных работ при разработке месторождения, испытывает постоянные изменения, связанные с изменением размеров и формы выработанного пространства, характером обрушения вмещающих пород. Иными словами величина горного давления не является какой-то постоянной для данной выработки или конструкции, а непрерывно изменяется во времени, возрастая или убывая в зависимости от воздействия горных работ.

Закономерности изменения напряженности горного массива во времени в связи с разработкой месторождения являются закономерностями развития горного давления. Таким образом, для того чтобы управлять горным давлением при разработке месторождения, необходимо знать динамику его развития. Практика горного дела чаще всего требует знания закономерностей горного давления в динамике их развития, в процессе разработки месторождения в целом или отдельного его участка. И лишь в некоторых случаях задача управления горным давлением может рассматриваться как статическая. Примером может служить разработка месторождений без обрушения вмещающих пород с поддержанием их целиками, оставленными навечно. В тех же случаях, когда вмещающие породы обрушаются участками больших или меньших размеров, применение статической задачи может привести к неправильным расчетам. Нагрузки на конструктивные элементы и их прочность в этом случае являются функциями времени, развития очистных работ и параметров системы разработки. Поэтому для расчета на прочность и устойчивость элементов системы и для обеспечения безопасной разработки месторождений необходимо знать закономерности развития горного давления во времени.

Исследование закономерностей развития горного давления для этих целей может производиться различными методами: аналитическими, моделированием или непосредственными измерениями напряжений в горном массиве. Наиболее достоверные данные о закономерностях развития горного давления при ведении очистных работ в настоящее время могут быть получены методами непосредственных измерений в натурных условиях.

Однако поле напряжений, имеющее место в массиве горных

пород в зоне влияния очистных работ, очень сложно и для получения представления о его строении и изменении во времени необходимо иметь достаточное количество точек измерения. Для этого требуется большой объем исследований, охватывающий все проявления горного давления на больших площадях и различных глубинах в течение длительных промежутков времени.

Проведение таких экспериментов возможно только с применением простых и нетрудоемких методов, позволяющих вести измерения с небольшими затратами в течение длительного времени.

Описанными выше методами измерения напряжений в горных породах можно исследовать закономерности горного давления во времени лишь путем повторных измерений в близко расположенных точках. Такие способы изучения очень трудоемкие и дорогостоящие и не могут быть рекомендованы для широкого использования. Кроме того, повторные измерения проводятся на некотором удалении от первоначальных, что может привести к искажению полученных закономерностей.

Поэтому для измерения напряжений в течение длительного времени применяются методы с установкой измерительных приборов в исследуемой точке на продолжительное время.

1. СУЩЕСТВУЮЩИЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ, ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ ВО ВРЕМЕНИ

Измерение напряжений в массиве горных пород во времени осуществляется главным образом на использовании буровых скважин. Все методы по характеру взаимодействия измерительных приборов с породами стенок скважины делятся на две группы: методы измерения деформаций скважины; методы упругих включений.

В первом случае приборы измеряют перемещения стенок скважины, не оказывая на них практически никакого воздействия. По величине деформации скважины судят о величине приращений напряжений в горных породах относительно момента установки измерительного прибора.

Во втором случае в скважину устанавливается тем или иным способом упругий элемент, называемый упругим включением, так что обеспечивается всесторонний контакт со стенками скважины. При изменении напряженного состояния пород деформации скважины воспринимаются упругим включением, в котором возникает поле напряжений. Упругое включение уже не пассивно следует за деформациями, как в первом случае, а активно воздействует на породы, создавая сопротивление деформациям и работая с породой как одно целое. Напряженное состояние упругого включения зависит от величины приращения напряжений в породе. Производя измерения напряжений в упругом включении, можно определить величину приращения напряжений в породе.

Методы, основанные на измерении деформации скважины. Для измерения деформаций скважины в отечественной практике приме-

няются датчики струнного типа. Известно две конструкции датчиков для этой цели — ВНИМИ и НИГРИ [6, 37].

В обоих датчиках в качестве измерительного элемента используется колеблющаяся струна, частота колебания которой зависит от натяжения. В датчике конструкции ВНИМИ струна меняет свое натяжение за счет упругой скобы при деформации скважины, в датчике конструкции НИГРИ — за счет изгиба балочки.

Оба датчика могут устанавливаться в скважинах на глубине до 20 м. Каждый датчик измеряет деформацию скважины только в одном направлении.

Достоинствами этих датчиков являются:

устойчивость работы колеблющейся струны во времени;

возможность установки их на больших глубинах;

возможность передачи сигналов на большие расстояния, в связи с тем, что частота сигналов не зависит от их затухания.

Недостатком такого типа датчиков является то, что струна должна быть хорошо герметизирована, чтобы при длительной эксплуатации исключить возможность коррозии. Кроме того, для получения величины и направления главных приращений напряжений необходимо деформации скважины измерять в трех направлениях, поэтому датчики в скважине устанавливаются группами по три штуки, направленными под различными углами друг к другу. При высоком градиенте напряжений измерения по трем датчикам, установленным на участке скважины длиной до 1 м, могут дать большие погрешности в определении величины и направления главных приращений напряжений.

Для устранения этих недостатков разработан новый тип струнных датчиков, позволяющий производить измерения деформаций скважины в двух взаимно перпендикулярных направлениях [1]. Этот датчик представляет собой цилиндр, разрезанный с одной стороны по образующей на четыре части так, что с другой стороны его остается кольцо. На консольных балочках, образованных в результате разрезов, натягиваются струны. Укрепление датчика осуществляется с помощью клинового распора каждой пары балочек.

В зарубежной практике исследования горного давления для измерения приращений во времени, широкое применение получили струнные датчики фирмы «Майгак» [49].

В датчиках этого типа колеблющаяся струна помещена в специальную капсулу, которая при установке датчика в скважине выдвигается из корпуса с помощью червячной передачи. Необходимая первоначальная частота колебания струны задается распором капсулы о стенки скважины. Деформация скважины измеряется только в одном направлении — в направлении капсулы.

Недостатком всех датчиков струнного типа является их значительная стоимость и трудоемкость. При исследовании закономерностей горного давления датчики устанавливаются в большом количестве, что может вызвать большие материальные затраты.

Методы измерения напряжений во времени с использованием упругих включений. Попытка применения упругих включений для измерения приращений напряжений в нашей стране была сделана институтом НИГРИ. Им был разработан прибор, названный динамометром, для измерения опорного давления [6].

По своей конструкции динамометр представляет собой металлический патрон, внутри которого находится диск, являющийся рабочим органом. На диск наклеивается розетка тензодатчиков. Динамометр с помощью бетона замуровывается в скважине. При изменении напряжений в окружающих породах скважина деформируется и передает нагрузку на динамометр, вызывая напряжение в рабочем диске. Деформации, возникающие в нем, измеряются тензометрическими датчиками. Путем тарировки определяется зависимость деформации диска от напряжений в породе.

Применение этих динамометров в шахтных условиях показало, что тензометрические датчики непригодны для длительной эксплуатации в подземных условиях. В течение 1—2 месяцев гидроизоляция тензодатчиков нарушается и динамометр выходит из строя. Кроме того, известно, что во времени тензодатчики изменяют свои свойства, внося погрешности в измерения. Таким образом, динамометры этого типа оказались непригодными для длительных измерений.

В последнее время для длительных измерений приращений напряжений все большее применение находят упругие включения из оптически активных материалов [42, 45, 48, 54, 56, 64, 65, 66], которые устанавливаются в скважине с помощью цементирующего состава. Напряженное состояние включения исследуется в поляризованном свете. Поле напряжений датчика, наблюдаемое в виде картины полос и изоклин, позволяет судить о величине приращений напряжений в породе.

Фотоупругие включения применяются в виде кубиков и призм, сплошных дисков и дисков с центральным отверстием. Исследование поля напряжений в них производится либо в отраженном свете, либо в проходящем в зависимости от типа применяемых полярископов и датчиков.

Фотоупругие датчики, работающие в отраженном свете, конструктивно очень просты (рис. 23, б). На заднюю сторону датчика, изготовленного из оптически активного материала, наносится отражающий слой, который тщательно изолируется от воздействия влаги.

Датчики, работающие в проходящем свете, несколько сложнее (рис. 23, а). Они состоят из источника света, рефлектора, поляризатора, четвертьволновой пластинки и самого датчика.

Форма датчиков принимается в зависимости от решаемых вопросов и характера напряженного состояния. Кубические и призматические датчики используются только в случае одноосного напряженного состояния с известным направлением напряжений. Сплошной диск позволяет определить направление и величину

главного приращения напряжения в случае одноосного напряженного состояния. При двухосном напряженном состоянии по нему можно определить направление главных приращений напряжений и разность между ними.

Разность главных приращений напряжений в породе с разностью главных приращений в датчике связана соотношением [45]

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{E_d (5 + \mu_p) - E_p (1 + \mu_d)}{E_d (5 + \mu_p) + E_p (1 + \mu_d)} (\sigma_1^p - \sigma_2^p), \quad (53)$$

где σ_1 , σ_2 , σ_1^p , σ_2^p — главные нормальные напряжения соответственно в датчике и породе, кг/см^2 .

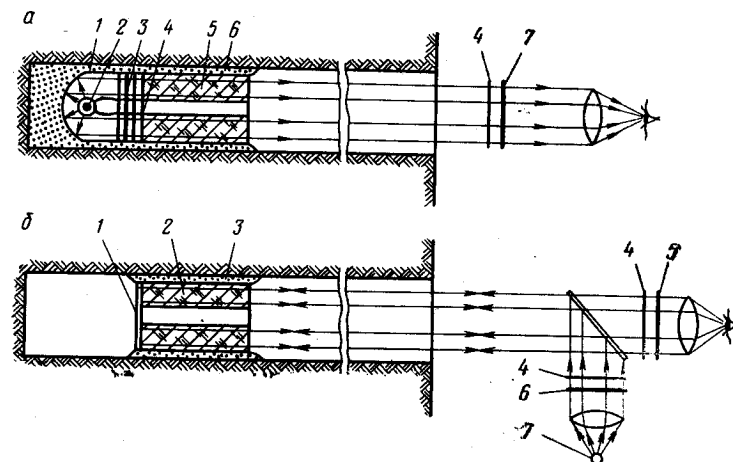


Рис. 23. Схема работы фотоупругих датчиков:

а — в проходящем свете: 1 — рефлектор, 2 — источник света, 3 — поляризатор, 4 — пластинка четвертьволновая, 5 — стеклянный диск с отверстием, 6 — цемент (клей), 7 — анализатор; б — в отраженном свете: 1 — отражающий слой (зеркало), 2 — стеклянный диск с отверстием, 3 — цемент (клей), 4 — пластинка четвертьволновая, 5 — анализатор, 6 — поляризатор, 7 — источник света

Датчики в виде диска с центральным отверстием применяются при двухосном напряженном состоянии и дают возможность определить направление главных приращений напряжений, их величину и соотношение. В датчиках такого типа при прохождении поляризованного света возникает не однородная окраска, как это имело место в датчиках без отверстия, а сложная картина полос, зависящая от величины главных приращений и соотношения между ними. Направление главных приращений напряжений в породе совпадает с осями симметрии картины полос в датчике.

Величина главных приращений напряжений определяется сравнением картины полос в датчике с эталонной картиной полос, получаемой при тарировке датчика.

Основным достоинством фотоупругих датчиков является устойчивость их работы во времени. Они не боятся влаги, малочувствительны к изменениям температуры, происходящим в шахтных условиях. Датчики, изготовленные из стекла, не изменяют своих основных свойств во времени.

Фотоупругие датчики просты в конструктивном отношении и дешевле в изготовлении. Это дает возможность применять их в большом количестве при выявлении законов развития горного давления. Применяя необходимый тип датчиков для различных условий измерений, можно получить полную информацию об изменении напряженного состояния в точке измерения, т. е. величину и направление главных приращений напряжений. Наглядность картины полос позволяет определить направление главных приращений непосредственно при наблюдении.

Недостатком фотоупругих включений является трудоемкость тарировки, применяемой при определении величины главных приращений напряжений. Для тарировки из породы изготавливается образец, в котором сверлится отверстие и бетонируется датчик [67]. Затем образец подвергается испытаниям с различными нагрузками и различными соотношениями между вертикальными и горизонтальными напряжениями при двухосном нагружении образца. По результатам испытаний составляются графики зависимости числа полос в датчике от напряжений при различных соотношениях главных нормальных напряжений.

При измерении сначала определяется соотношение между главными приращениями напряжений путем сравнения картины полос в рабочем датчике с эталонными для различных соотношений между главными нормальными напряжениями. Затем по числу полос в датчике из графика для соответствующего соотношения определяется величина максимального приращения напряжений и по отношению между максимальным и минимальным приращением находится минимальное главное приращение напряжений.

Трудоемкость такого способа определения главных приращений напряжений обуславливается следующими факторами:

горные породы, даже крепкие, имеют широкий диапазон изменения модуля упругости. Поэтому тарировку необходимо проводить для каждой точки измерения, т. е. для каждого датчика, устанавливаемого в массиве;

для тарировки датчиков диаметром 35 мм необходимо изготовить из породы либо пластинку с минимальными размерами около 170×170 мм, либо кубический образец с теми же размерами. Изготовление таких образцов очень затруднительно и требует большого количества материала, который не всегда может быть получен, особенно при установке датчиков в глубине массива;

испытание образцов больших размеров при двухосном напряженном состоянии требует специального оборудования, которым располагают далеко не все исследовательские лаборатории. Кроме того, такие испытания являются сложными и трудоемкими.

Эти трудности являются основной причиной, препятствующей

широкому внедрению фотоупругих датчиков для исследования горного давления, несмотря на ряд преимуществ, которыми они обладают. Ниже излагается метод измерения приращений напряжений и абсолютных значений компонентов напряженного состояния горного массива с применением фотоупругих датчиков, в котором вышеуказанные недостатки до некоторой степени устранены.

2. СУЩНОСТЬ КОМПЛЕКСНОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ

Комплексный метод измерения напряжений предназначен для определения абсолютной величины и направления главных нормальных напряжений в точке измерения в течение длительного времени и включает в себя два самостоятельных метода: полную или частичную разгрузку и фотоупругие включения [35, 36].

Разгрузка в комплексном методе служит средством для измерения компонентов исходного напряженного состояния породы σ_1' , σ_2' , φ'' в точке измерения, имеющих место на момент установки фотоупругих датчиков. Фотоупругие датчики измеряют приращения напряжений σ_1'' , σ_2'' и φ'' во времени. Таким образом, измерения напряжений производятся в два этапа. Первоначально находятся абсолютные значения напряжений в породе методом разгрузки, соответствующие времени установки фотоупругого датчика, а дальнейшие изменения их определяются фотоупругими датчиками. Абсолютные значения компонентов напряженного состояния определяются путем наложения приращений на исходное напряженное состояние.

Измерение напряжений производится в следующем порядке. В выбранной точке определяются величины и направления главных нормальных напряжений. Для этой цели используются, как отмечалось выше, методы полной или частичной разгрузки в зависимости от того, где находится точка — в глубине или на обнажении горного массива. В скважине, образованной при разгрузке, бетонируется фотоупругий датчик. Изменения в напряженном состоянии породы повлекут за собой деформации скважины, которые вызовут в фотоупругом датчике сложное поле напряжений, зависящее от величины и направления главных приращений в напряженном состоянии породы. Величины напряжений в фотоупругом датчике с величинами приращений напряжений в породе связаны строго определенной зависимостью.

Это обстоятельство позволяет определять величины приращений напряжений в породе путем измерений напряжений в датчике, которые производятся с помощью полярископа одностороннего действия. Разность хода поляризованного света измеряется методом компенсации.

Методы разгрузки описаны в двух предыдущих главах. Здесь же более подробно рассматривается метод измерения приращений напряжений во времени.

3. ФОТОУПРУГИЕ ДАТЧИКИ

Фотоупругие датчики по своей конструкции аналогичны известным ранее и представляют собой по форме диск с центральным отверстием. Общий вид скважины с фотоупругим датчиком и защитной пробкой приведен на рис. 24 [35, 36]. Материалом для их изготовления служат стекло, органическое стекло, отвержденные эпоксидные смолы и прочие оптически активные материалы. Для

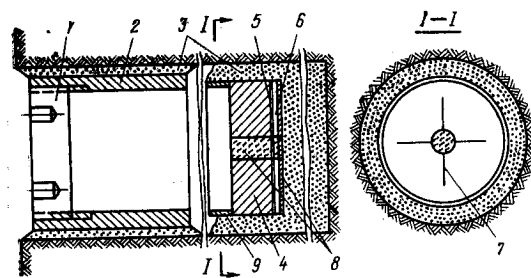


Рис. 24. Общий вид скважины с фотоупругим датчиком и защитной пробкой:

1 — металлическая пробка; 2 — металлическая трубка с резьбой; 3 — песчано-цементный раствор (бетон); 4 — фотоупругий датчик с отверстием; 5 — отражающий слой; 6 — клей из ЭД-6М; 7 — крест; 8 — воск; 9 — защитное кольцо

свою полную величину и исчезает целиком по удалении напряжений [18].

Датчик имеет следующие размеры: внешний диаметр — 35 мм, диаметр внутреннего отверстия — 5 мм, толщина — 8—10 мм. Толщину датчика следует согласовывать с необходимой чувствительностью, но чрезмерно завышать ее не следует, так как это может отразиться на четкости картины полос. Стекланный датчик толщиной 10 мм при измерениях в крепких горных породах имеет чувствительность около 1 кг/см^2 и обеспечивает достаточно четкую интерференционную картину полос.

Для использования полярископа одностороннего действия задняя сторона датчика покрывается отражающим слоем путем ее серебрения. Отражающий слой от коррозии защищается слоем краски и слоем клея на основе эпоксидной смолы.

На переднюю плоскость датчика наклеивается металлическое кольцо, внешний диаметр которого равен диаметру датчика, толщина стенки его 1—1,5 мм и высота 15 мм. Оно служит для установки датчика на досылочной трубке и препятствует попаданию цементного раствора на переднюю сторону датчика (рис. 25).

В скважине фотоупругий датчик устанавливается с помощью цементирующего материала, состав которого выбирается в зависимости от материала датчика. Основными критериями при выборе цементирующего состава являются его упругие свойства и способность к сцеплению между породой и датчиком. Для датчиков из

стекла наиболее подходящим цементирующим составом является цементно-песчаная смесь (бетон) из цемента марки «400» и песка с размером зерен не более 1 мм при их соотношении 1:1. Раствор хорошо сцепляется как с породой, так и со стеклом.

Установку датчиков из органических материалов можно производить как на цементно-песчаный раствор, так и на клей холодного отверждения на основе эпоксидной смолы.

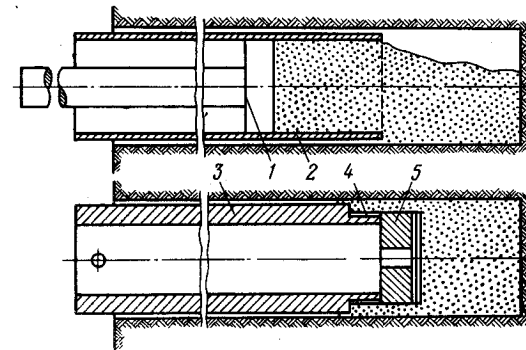


Рис. 25. Бетонирование фотоупругого датчика в скважине:

1 — шток с поршнем; 2 — трубка для доставки бетона в скважину; 3 — трубка для досылки и установки датчика; 4 — защитное кольцо; 5 — фотоупругий датчик

Схема бетонирования датчика в скважине показана на рис. 25. Цементный раствор в скважину досылается в трубке и выдавливается с помощью поршня. Установка датчика производится специальной трубкой, внешний диаметр которой на 2—2,5 мм меньше диаметра шпура. На конец трубки, который строго перпендикулярен ее оси, защитным кольцом надевается фотоупругий датчик так, что он своей передней стенкой плотно прилегает к торцу трубки, досылается в скважину и утапливается в цементном растворе. Через два дня трубка извлекается и устье скважины оборудуется защитной пробкой (см. рис. 24).

Такая методика установки датчиков обеспечивает достаточную перпендикулярность плоскости датчика к оси скважины, что особенно важно при установке датчика в глубине горного массива.

Фотоупругий датчик должен работать в условиях плоского напряженного состояния, поэтому для исключения сцепления бетона с датчиком по задней стороне последняя покрывается слоем воска или пластилина. Нагрузка на датчик передается лишь по внешнему контуру. Контур центрального отверстия, задняя и передняя стенки свободны от внешней нагрузки.

Интерференционная картина полос при исследовании фотоупругого датчика в поляризованном свете аналогична по форме картине полос в фотоупругом тензомере и зависит от соотношения между главными приращениями напряжений (см. рис. 18). Основ-

ной ее особенностью является, как и для картины полос в фотоупругом тензомере, наличие двух взаимно перпендикулярных осей симметрии, кроме случая, когда главные приращения напряжений в породе равны. В этом случае, так же как и в фотоупругом тензомере, картина полос представляет собой ряд концентрических колец.

Оси симметрии картины полос совпадают с направлением главных приращений напряжений в породе. Это обстоятельство позволяет определить направление главных приращений непосредственно при рассмотрении картины полос.

Точки пересечения осей симметрии с окружностью центрального отверстия являются экстремальными в отношении разности хода на контуре отверстия. Ось симметрии, проходящая через точки контура отверстия с максимальной разностью хода, совпадает по направлению с минимальными главными приращениями. Вторая ось симметрии, проходящая через точки с минимальной разностью хода, совпадает с направлением максимальных приращений напряжений.

Таким образом, из рассмотрения картины полос можно определить не только направление главных приращений напряжений, но и определить, которое из них больше. При достаточном опыте исследователя можно определить примерно соотношение между главными приращениями.

Экстремальные точки на контуре центрального отверстия являются точками измерения разности хода, необходимой для определения численной величины главных приращений. Разность хода поляризованного света в фотоупругом датчике измеряется теми же способами, что и в фотоупругом тензомере, описанными в предыдущей главе.

Для вычисления величины главных приращений напряжений необходимо иметь аналитические зависимости между разностью хода в экстремальных точках датчика и величиной главных приращений напряжений в породе.

4. ВЫВОД ФОРМУЛ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИРАЩЕНИЙ НАПРЯЖЕНИЙ

Схематически работу фотоупругого датчика можно представить следующим образом. В породной плоскости, находящейся в плоском напряженном состоянии или в плоской деформации, замурован с помощью цементного раствора фотоупругий датчик. Цементный раствор и фотоупругий датчик представляют собой составное кольцо из стекла и бетона. Связь по контурам осуществляется за счет контакта и сил сцепления бетона.

Первоначально датчик и бетонное кольцо не напряжены, порода имеет исходное напряженное состояние. Изменения исходного напряженного состояния в породе приведут к возникновению напряжений в бетонном кольце и в датчике. Напряженное состояние датчика зависит от величины и направления приращений напря-

жений. Поэтому при выводе формул в качестве нагрузки на породную пластинку следует принимать главные приращения напряжений.

В практике применения фотоупругих включений встречаются две схемы измерения [36]. Первая схема является частным случаем и применяется при одинаковых упругих свойствах бетона и породы или если они отличаются не более чем на 10—15%. Диаметр скважины в этом случае принимается равным диаметру датчика, т. е. $R_2 = R_3$. Вторая схема представляет собой общий случай, когда упругие свойства бетона и породы различны. Здесь бетонное кольцо и датчик рассматриваются как составное кольцо и при выводе формул учитывается влияние бетонного кольца.

Разберем первый случай, используя для решения метод Н. И. Мусхелишвили [24].

Граничные условия по внешнему контуру датчика заключаются в том, что напряжения в граничных точках породы и датчика равны и смещения граничных точек за счет сцепления одинаковы.

Эти условия запишутся в следующем виде:

$$\widehat{rr}_n - i\widehat{r\theta}_n = \widehat{rr}_d - i\widehat{r\theta}_d \quad (\text{при } r = R_2) \quad (54)$$

$$v_{rn} - iv_{\theta n} = v_{rd} + iv_{\theta d} \quad (\text{при } r = R_2). \quad (55)$$

По контуру центрального отверстия датчика внешние напряжения отсутствуют. Это дает третье граничное условие

$$\widehat{rr}_d - i\widehat{r\theta}_d = 0, \quad (\text{при } r = R_1). \quad (56)$$

После подстановки в формулы (54), (55) и (56) вместо $\widehat{rr}_n - i\widehat{r\theta}_n$, $v_r + iv_\theta$ их выражения через функции комплексной переменной $\varphi(z)$, $\psi(z)$ граничные условия примут вид [24]:

$$\varphi_n(z) + z\overline{\varphi'_n(z)} + \overline{\psi_n(z)} = \varphi_d(z) + z\overline{\varphi'_d(z)} + \psi_d(z); \quad (57)$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{G_n} [\chi_n \varphi_n(z) - z\overline{\varphi'_n(z)} - \overline{\psi_n(z)}] = \\ & = \frac{1}{G_d} [\chi_d \varphi_d(z) - z\overline{\varphi'_d(z)} - \overline{\psi_d(z)}]; \end{aligned} \quad (58)$$

$$\varphi_d(z) + z\overline{\varphi'_d(z)} + \overline{\psi_d(z)} = 0, \quad (59)$$

где

$$\varphi_n(z) = \frac{1}{4} (\sigma_1'' + \sigma_2'') z + \sum_{k=0}^{k=\infty} a_k^n z^{-k};$$

$$\psi_n(z) = -\frac{1}{2} (\sigma_1'' - \sigma_2'') z + \sum_{k=0}^{k=\infty} a_k^{1n} z^{-k};$$

$$\varphi_d(z) = \sum_{k=-\infty}^{k=\infty} a_k^d z^k; \quad \psi_d(z) = \sum_{k=-\infty}^{k=\infty} a_k^{1d} z^k,$$

(a_k , a_k^d — неизвестные коэффициенты рядов Фурье).

Подставляя в формулы (57), (58) и (59) выражения $\varphi(z)$ и $\psi(z)$ в развернутом виде и приравнявая в каждом уравнении граничных условий коэффициенты при одинаковых степенях $e^{i\theta}$ в правой и левой частях, получаем систему уравнений для отыскания неизвестных коэффициентов рядов Фурье, которая в окончательном виде запишется следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} a_1^n R_2 + \bar{a}_{-1}^n \frac{1}{R_2} + \bar{a}_1^n R_2 &= \frac{1}{2} (\sigma_1'' + \sigma_2'') R_2 + \bar{a}_{-1}^n \frac{1}{R_2} \\ &\quad - \frac{G_n}{G_d} \left(\chi_d a_1^n R_2 - \bar{a}_{-1}^n R_2 - \bar{a}_{-1}^n \frac{1}{R_2} \right) = \\ &= \frac{1}{4} (\sigma_1'' + \sigma_2'') (\chi_n - 1) R_2 - \bar{a}_{-1}^n \frac{1}{R_2} \\ a_1^n R_1 + \bar{a}_{-1}^n R_1 + \bar{a}_{-1}^n \frac{1}{R_1} &= 0 \\ a_3^n R_2^6 - \bar{a}_{-1}^n R_2^2 + \bar{a}_{-3}^n &= -\bar{a}_{-1}^n R_2^2 + \bar{a}_{-3}^n \\ 3a_3^n R_2^2 + a_{-1}^n + \bar{a}_{-1}^n R_2^2 &= a_{-1}^n - \frac{1}{2} (\sigma_1'' - \sigma_2'') R_2^2 \\ \frac{G_n}{G_d} \chi_d a_3^n R_2^6 + \frac{G_n}{G_d} \bar{a}_{-1}^n R_2^2 - \bar{a}_{-3}^n \frac{G_n}{G_d} &= \bar{a}_{-1}^n R_2^2 - \bar{a}_{-3}^n \\ \frac{G_n}{G_d} \chi_d a_{-1}^n - 3 \frac{G_n}{G_d} \bar{a}_{-3}^n R_2^4 - \frac{G_n}{G_d} \bar{a}_{-1}^n R_2^2 &= \\ &= \frac{1}{2} (\sigma_1'' - \sigma_2'') R_2^2 + \chi_n a_{-1}^n \\ a_3^n R_1^6 - \bar{a}_{-1}^n R_1^2 + \bar{a}_{-3}^n &= 0 \\ a_{-1}^n + 3\bar{a}_{-3}^n R_1^4 + \bar{a}_{-1}^n R_1^2 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (60)$$

Напряженное состояние породной пластинки в зоне влияния отверстия для нас не представляет интереса, поэтому коэффициенты рядов Фурье для породы (с индексом «п») нет надобности отыскивать. Для датчика не равными нулю и ненужными в дальнейшем оказываются пять коэффициентов. Решение системы уравнений (60) дает их величины:

$$\begin{aligned} a_1^n &= \frac{1}{4} \frac{(\sigma_1'' + \sigma_2'') (\chi_n + 1) R_2^2}{\frac{G_n}{G_d} (\chi_d - 1) R_2^2 + 2 \frac{G_n}{G_d} R_1^2 + 2 (R_2^2 - R_1^2)}; \\ a_{-1}^n &= \frac{1}{2} \frac{(\sigma_1'' + \sigma_2'') (\chi_n + 1) R_2^2 R_1^2}{\frac{G_n}{G_d} (\chi_d - 1) R_2^2 + 2 \frac{G_n}{G_d} R_1^2 + 2 (R_2^2 - R_1^2)}; \end{aligned} \quad (61)$$

$$\begin{aligned} a_1^d &= -\frac{1}{2D} (\sigma_1'' - \sigma_2'') R_2^2 (\chi_n + 1) \left\{ R_2^2 \left[\left(\frac{G_n}{G_d} \chi_d + 1 \right) - \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - 3R_1^4 \left(\frac{G_n}{G_d} - 1 \right) \right] + 4R_1^6 \left(\frac{G_n}{G_d} - 1 \right) \right\}; \\ a_3^d &= -\frac{1}{2D} (\sigma_1'' - \sigma_2'') R_2^2 (\chi_n + 1) \left[R_1^2 R_2^2 \times \right. \\ &\quad \left. \times \left(\frac{G_n}{G_d} - 1 \right) - R_1^4 \left(\frac{G_n}{G_d} - 1 \right) \right]; \\ a_{-3}^d &= \frac{1}{2D} R_2^2 (\chi_n + 1) \left\{ 4R_1^8 R_2^2 \left(\frac{G_n}{G_d} - 1 \right) + \right. \\ &\quad \left. + R_1^4 R_2^2 \left[\left(\frac{G_n}{G_d} \chi_d + 1 \right) - 3R_1^4 \left(\frac{G_n}{G_d} - 1 \right) \right] \right\}, \end{aligned} \quad (62)$$

где

$$\begin{aligned} D &= \left[R_2^2 \left(\frac{G_n}{G_d} + \chi_n \right) + R_1^2 \left(\frac{G_n}{G_d} \chi_d - \chi_n \right) \right] \times \\ &\times \left\{ R_2^2 \left[\left(\frac{G_n}{G_d} \chi_d + 1 \right) - 3R_1^4 \left(\frac{G_n}{G_d} - 1 \right) \right] + \left(\frac{G_n}{G_d} - 1 \right) 4R_1^6 \right\} + \\ &+ 3 \left[R_2^4 \left(\frac{G_n}{G_d} + \chi_n \right) + R_1^4 \left(\frac{G_n}{G_d} \chi_d + \chi_n \right) \right] \times \\ &\times \left[R_1^2 R_2^2 \left(\frac{G_n}{G_d} - 1 \right) - R_1^4 \left(\frac{G_n}{G_d} - 1 \right) \right]. \end{aligned}$$

Функции $\varphi_d(z)$ и $\psi_d(z)$ принимают вид:

$$\varphi_d(z) = \sum_{k=-\infty}^{k=\infty} a_k^d z^k = a_{-1}^d \frac{1}{z} + a_1^d z + a_3^d z^3; \quad (63)$$

$$\psi_d(z) = \sum_{k=-\infty}^{k=\infty} a_k^d z^k = a_{-3}^d \frac{1}{z^3} + a_{-1}^d \frac{1}{z} + a_1^d z. \quad (64)$$

Напряжения в фотоупругом датчике через функции $\varphi_d(z)$ и $\psi_d(z)$ определяются следующими выражениями [24]:

$$\begin{aligned} \widehat{rr} + \widehat{\theta\theta} &= 4\gamma \varphi_d'(z) = 4a_1^d - 4a_{-1}^d \times \\ &\times \frac{1}{r^2} \cos 2\theta + 12a_3^d r^2 \cos 2\theta; \end{aligned} \quad (65)$$

$$\begin{aligned} \widehat{\theta\theta} - \widehat{rr} + 2i\widehat{r\theta} &= 2e^{2i\theta} [\bar{z} \varphi_d'(z) + \psi_d'(z)] = 4a_{-1}^d \frac{1}{r^2} e^{-2i\theta} + \\ &+ 12a_3^d r^2 e^{2i\theta} - 6a_{-3}^d \frac{1}{r^4} e^{-2i\theta} - 2a_{-1}^d \frac{1}{r^2} + 2a_1^d e^{2i\theta}. \end{aligned} \quad (66)$$

Из этих выражений легко получается формула для тангенциальных напряжений ($\widehat{\theta\theta}$). Из выражения (66) выделяется действи-

тельная часть и складывается с выражением (65), в результате получается

$$\widehat{\theta\theta} = 2a_1^A - a_{-1}^A \frac{1}{r^2} + \left(12a_3^A r^2 - 3a_{-3}^A \frac{1}{r^4} + a_1^A \right) \cos 2\theta. \quad (67)$$

На контуре центрального отверстия датчика действуют только тангенциальные напряжения, касательные к контуру. Радиальные напряжения, нормальные к контуру, равны нулю. Поэтому разность хода поляризованного света, измеряемая в точках A, B, C и D , зависит только от величины тангенциальных напряжений в этих точках и получается из уравнений (42).

Величина тангенциальных напряжений в точках A, B, C и D определяется из выражения (67) подстановкой в него следующих значений: для $\widehat{\theta\theta}_{AB}$ $r=R_1$, $\theta=90^\circ$; для $\widehat{\theta\theta}_{CD}$ $r=R_1$, $\theta=0^\circ$,

$$\widehat{\theta\theta}_{AB} = \left(2a_1^A - a_{-1}^A \frac{1}{R_1^2} \right) - \left(12a_3^A R_1^2 - 3a_{-3}^A \frac{1}{R_1^4} + a_1^A \right); \quad (68)$$

$$\widehat{\theta\theta}_{CD} = \left(2a_1^A - a_{-1}^A \frac{1}{R_1^2} \right) + \left(12a_3^A R_1^2 - 3a_{-3}^A \frac{1}{R_1^4} + a_1^A \right). \quad (69)$$

Чтобы выделить в этих выражениях σ_1'' и σ_2'' , произведем следующую замену:

$$\left. \begin{aligned} a_1^A &= b_1 (\sigma_1'' + \sigma_2'') \\ a_{-1}^A &= b_2 (\sigma_1'' + \sigma_2'') \\ a_3^A &= b_3 (\sigma_1'' + \sigma_2'') \\ a_{-3}^A &= b_4 (\sigma_1'' - \sigma_2'') \\ a_1^A &= b_5 (\sigma_1'' - \sigma_2'') \end{aligned} \right\}. \quad (70)$$

В результате подстановки этих выражений в формулы (68) и (69) тангенциальные напряжения $\widehat{\theta\theta}_{AB}$ и $\widehat{\theta\theta}_{CD}$ будут определяться следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} \widehat{\theta\theta}_{AB} &= \left(2b_1 - b_2 \frac{1}{R_1^2} \right) (\sigma_1'' + \sigma_2'') - \\ &- \left(12b_3 R_1^2 - 3b_4 \frac{1}{R_1^4} + b_5 \right) (\sigma_1'' - \sigma_2''); \end{aligned} \quad (71)$$

$$\begin{aligned} \widehat{\theta\theta}_{CD} &= \left(2b_1 - b_2 \frac{1}{R_1^2} \right) (\sigma_1'' + \sigma_2'') + \\ &+ \left(12b_3 R_1^2 - 3b_4 \frac{1}{R_1^4} + b_5 \right) (\sigma_1'' - \sigma_2''). \end{aligned} \quad (72)$$

Подставляя в формулы (42) выражения для $\widehat{\theta\theta}_{AB}$ и $\widehat{\theta\theta}_{CD}$ из формул (71) и (72), получим два уравнения, решение которых относительно σ_1'' и σ_2'' дает формулы, позволяющие определить их величину через разность хода, измеренную в точках A, B, C и D :

$$\sigma_1'', \sigma_2'' = \frac{1}{8Ct} \left[\frac{\Gamma_{AB} + \Gamma_{CD}}{A'} \pm \frac{\Gamma_{AB} - \Gamma_{CD}}{B'} \right], \quad (73)$$

$$\text{где } A' = 2b_1 - b_2 \frac{1}{R_1^2};$$

$$B' = 12b_3 R_1^2 - 3b_4 \frac{1}{R_1^4} + b_5;$$

$$b_1 = \frac{(\chi_n + 1) R_2^2}{4 \left[\frac{G_n}{G_d} (\chi_d - 1) R_2^2 + 2 \frac{G_n}{G_d} R_1^2 + 2 (R_2^2 - R_1^2) \right]};$$

$$b_2 = \frac{(\chi_n + 1) R_1^2 R_2^2}{2 \left[\frac{G_n}{G_d} (\chi_d - 1) R_2^2 + 2 \frac{G_n}{G_d} R_1^2 + 2 (R_2^2 - R_1^2) \right]};$$

$$b_3 = -\frac{1}{2D} R_1^2 R_2^2 (\chi_n + 1) \left(\frac{G_n}{G_d} - 1 \right) (R_2^2 - R_1^2);$$

$$b_4 = \frac{1}{2D} R_1^4 R_2^4 (\chi_n + 1) \left[R_1^4 \left(\frac{G_n}{G_d} - 1 \right) + \left(\frac{G_n}{G_d} \chi_d + 1 \right) \right];$$

$$b_5 = -\frac{1}{2D} R_2^2 (\chi_n + 1) \left[R_2^2 \left(\frac{G_n}{G_d} \chi_d + 1 \right) + \right. \\ \left. + R_1^4 \left(\frac{G_n}{G_d} - 1 \right) (3R_2^2 - 4R_1^2) \right].$$

Таким образом, если упругие свойства породы и бетона близки по своей величине, то приращения напряжений в породе определяются по формулам (73).

В том случае, когда упругие свойства бетона и породы различны, формулы (73) непригодны, так как бетонное кольцо оказывает существенное влияние на напряженное состояние датчика. Для этого случая необходимо вывести свои формулы, связывающие приращения напряжений в породе с разностью хода в оптическом датчике. Схема к выводу расчетных формул для фотоупругого датчика представлена на рис. 26.

Граничные условия формулируются следующим образом. По границе между бетонным кольцом и породой смещения и напряжения в бетоне и породе одинаковы. Это дает два условия:

$$\widehat{rr}_6 - i\widehat{r\theta}_6 = \widehat{rr}_n - i\widehat{r\theta}_n \quad (\text{при } r = R_3); \quad (74)$$

$$v_{r6} + iv_{\theta 6} = v_{rn} + iv_{\theta n} \quad (\text{при } r = R_3). \quad (75)$$

Два совершенно аналогичных условий имеют место по границе между датчиком и бетонным кольцом:

$$\widehat{rr}_d - i r \widehat{\theta}_d = \widehat{rr}_6 - i r \widehat{\theta}_6 \quad (\text{при } r = R_2). \quad (76)$$

$$v_{r,d} + i v_{\theta,d} = v_{r,6} + i v_{\theta,6} \quad (\text{при } r = R_2). \quad (77)$$

По контуру центрального отверстия датчика внешние напряжения отсутствуют, что выражается следующим условием:

$$\widehat{rr}_d - i r \widehat{\theta}_d = 0 \quad (\text{при } r = R_1). \quad (78)$$

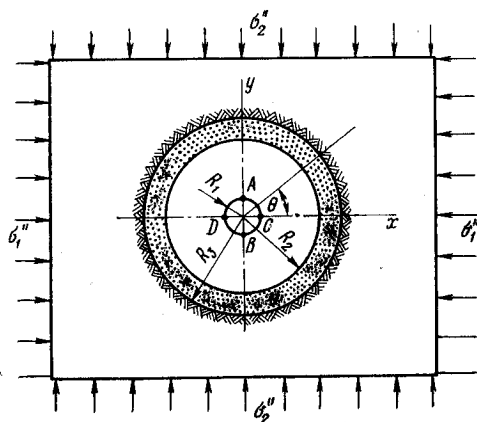


Рис. 26. Схема к выводу расчетных формул для фотоупругого датчика

После подстановки в формулы (74) и (78) их значений, выраженных через $\varphi(z)$ и $\psi(z)$, граничные условия примут вид [24]:

$$\varphi_6(z) + z \overline{\varphi'_6(z)} + \overline{\psi_6(z)} = \varphi_n(z) + z \overline{\varphi'_n(z)} + \overline{\psi_n(z)}. \quad (79)$$

$$\frac{1}{G_6} [\chi_6 \varphi_6(z) - z \overline{\varphi'_6(z)} - \overline{\psi_6(z)}] = \frac{1}{G_n} [\chi_n \varphi_n(z) - z \overline{\varphi'_n(z)} - \overline{\psi_n(z)}]; \quad (80)$$

$$\varphi_d(z) + z \overline{\varphi'_d(z)} + \overline{\psi_d(z)} = \varphi_6(z) + z \overline{\varphi'_6(z)} + \overline{\psi_6(z)}; \quad (81)$$

$$\frac{1}{G_d} [\chi_d \varphi_d(z) - z \overline{\varphi'_d(z)} - \overline{\psi_d(z)}] = \frac{1}{G_6} [\chi_6 \varphi_6(z) - z \overline{\varphi'_6(z)} - \overline{\psi_6(z)}]; \quad (82)$$

$$\varphi_d(z) + z \overline{\varphi'_d(z)} + \overline{\psi_d(z)} = 0, \quad (83)$$

где

$$\varphi_n(z) = \frac{1}{4} (\sigma_1'' + \sigma_2'') z + \sum_{k=0}^{k=\infty} a_k^n z^{-k};$$

$$\psi_n(z) = -\frac{1}{2} (\sigma_1'' - \sigma_2'') z + \sum_{k=0}^{k=\infty} a_k'^n z^{-k};$$

$$\varphi_6(z) = \sum_{k=-\infty}^{k=\infty} a_k^6 z^k;$$

$$\psi_6(z) = \sum_{k=-\infty}^{k=\infty} a_k'^6 z^k;$$

$$\varphi_d(z) = \sum_{k=-\infty}^{k=\infty} a_k^d z^k;$$

$$\psi_d(z) = \sum_{k=-\infty}^{k=\infty} a_k'^d z^k.$$

Подставив значения функций $\varphi(z)$ и $\psi(z)$ в развернутом виде в граничные условия (74) — (83), получим пять уравнений. Сравнивая в каждом из них коэффициенты при одинаковых степенях e^6 в правой и левой частях каждого уравнения, получаем следующую систему уравнений, позволяющую определить значения коэффициентов рядов Фурье:

$$\left. \begin{aligned} 2a_1^6 R_3^2 + a_{-1}^6 - a_1'^n &= \frac{1}{2} (\sigma_1'' + \sigma_2'') R_3^2 \\ \frac{\chi_6}{G_6} a_1^6 R_3^2 - \frac{1}{G_6} a_1^6 R_3^2 - \frac{1}{G_6} a_{-1}^6 + \\ + \frac{1}{G_n} a_1'^n &= \frac{1}{2G_n} (\sigma_1'' + \sigma_2'') (\chi_n - 1) R_3^2 \\ 2a_1^d R_2^2 + a_{-1}^d - 2a_1^6 R_2^2 - a_1'^6 &= 0 \\ \frac{\chi_d}{G_d} a_1^d R_2^2 - \frac{1}{G_d} a_1^d R_2^2 - \frac{1}{G_d} a_{-1}^d - \\ - \frac{\chi_6}{G_6} a_1^6 R_2^2 - \frac{1}{G_6} a_1^6 R_2^2 - \frac{1}{G_6} a_{-1}^6 &= 0 \\ a_1^d R_1^2 + a_1^d R_1^2 + a_{-1}^d &= 0 \\ a_3^6 R_3^6 - a_{-1}^6 R_3^2 + a_{-3}^6 + a_1^d R_3^2 - a_3'^n &= 0 \\ \chi_6 \frac{G_n}{G_6} a_3^6 R_3^6 + \frac{G_n}{G_6} a_{-1}^6 R_3^2 - \\ - \frac{G_n}{G_6} a_{-3}^6 - a_1^d R_3^2 + a_3'^n &= 0 \\ a_3^d R_2^6 - a_{-1}^d R_2^2 + a_{-3}^d - a_3^6 R_2^6 + \\ + a_{-1}^6 R_2^2 - a_{-3}^6 &= 0 \\ \chi_d a_3^d R_2^6 + a_{-1}^d R_2^2 - a_{-3}^d - \chi_6 \frac{G_d}{G_6} \times \\ \times a_3^6 R_2^6 - \frac{G_d}{G_6} a_{-1}^6 R_2^2 + \frac{G_d}{G_6} a_{-3}^6 &= 0 \\ a_3^d R_1^6 - a_{-1}^d R_1^2 + a_{-3}^d &= 0 \\ a_{-1}^6 + 3a_3^6 R_3^4 + a_1^6 R_3^2 - a_1'^n &= \end{aligned} \right\} \quad (84)$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{1}{2} (\sigma_1'' - \sigma_2'') R_3^2 \\
&\chi_6 \frac{G_n}{G_6} a_{-1}^6 - \frac{G_n}{G_6} a_1'^6 R_3^2 - \frac{G_n}{G_6} 3a_3^6 R_3^4 - \\
&\quad - \chi_n a_1^n = \frac{1}{2} (\sigma_1'' - \sigma_2'') R_3^2 \\
&a_{-1}^n + 3a_3^n R_2^4 + a_1'^n R_2^2 - a_{-1}^6 - \\
&\quad - 3a_3^6 R_2^4 - a_1'^6 R_2^2 = 0 \\
&\chi_n a_{-1}^n - 3a_3^n R_2^4 - a_1'^n R_2^2 - \chi_6 \frac{G_n}{G_6} + \\
&\quad + \frac{G_n}{G_6} 3a_3^6 R_2^4 + \frac{G_n}{G_6} a_1'^6 R_2^2 = 0 \\
&a_{-1}^n + 3a_3^n R_1^4 + a_1'^n R_2^2 = 0
\end{aligned}$$

Поскольку для нас представляет интерес лишь напряженное состояние датчика, то из системы (84) находим только коэффициенты с индексом «д», т. е. относящихся к датчику. Они определяются следующими выражениями:

$$\begin{aligned}
a_1^n &= \frac{1}{4D} (\sigma_1'' + \sigma_2'') R_2^2 R_3^2 (\chi_n + 1) \frac{G_n}{G_6} (\chi_6 + 1) \\
a_{-1}^n &= -\frac{1}{2D} (\sigma_1'' + \sigma_2'') R_1^2 R_2^2 R_3^2 (\chi_n + 1) \frac{G_n}{G_6} (\chi_6 + 1) \\
a_3^n &= \frac{1}{2D_1} (\sigma_1'' - \sigma_2'') R_3^2 R_2^6 \frac{G_n}{G_6} (\chi_n + 1) (\chi_6 + 1) (K_2 - R_1^4 K_3) \\
a_1'^n &= \frac{1}{2D_1} (\sigma_1'' - \sigma_2'') R_3^2 R_2^6 \frac{G_n}{G_6} (\chi_n + 1) (\chi_6 + 1) (4R_1^6 K_3 - K_1) \\
a_{-1}'^n &= \frac{1}{2D_1} (\sigma_1'' - \sigma_2'') R_3^2 R_2^6 \times \\
&\quad \times \frac{G_n}{G_6} (\chi_n + 1) (\chi_6 + 1) (R_1^4 K_1 - 4R_1^6 K_2) \\
a_{-1}^n &= \frac{1}{2D_1} (\sigma_1'' - \sigma_2'') \left(R_1^2 R_2^2 R_3^2 \times \right. \\
&\quad \times \frac{G_n}{G_6} (\chi_n + 1) (\chi_6 + 1) (R_1^2 K_2 - 3R_1^6 K_3 - K_1)
\end{aligned} \quad (85)$$

где

$$\begin{aligned}
D &= R_3^2 \left[\frac{G_n}{G_6} (\chi_6 - 1) + 2 \right] \left[2 \frac{G_n}{G_6} (R_2^2 - R_1^2) + R_2^2 (\chi_n - 1) + 2R_1^2 \right] - \\
&\quad - 2R_2^2 \left(\frac{G_n}{G_6} - 1 \right) \left[\frac{G_n}{G_6} (\chi_6 - 1) (R_2^2 - R_1^2) - R_2^2 (\chi_n - 1) + 2R_1^2 \right];
\end{aligned}$$

$$D_1 = K_1 (R_1^4 K_6 - K_5) + K_2 (K_4 - 4R_1^6 K_6) + K_3 (4R_1^6 K_5 - R_1^4 K_4).$$

$$\begin{aligned}
K_1 &= R_2^6 \left(\frac{G_n}{G_6} - 1 \right) \left[3R_2^2 \left(\frac{G_n}{G_6} - 1 \right) (R_2^2 R_3^2 - R_2^4 - R_1^4) - \right. \\
&\quad - R_2^2 \left(\chi_6 \frac{G_n}{G_6} - \chi_n \right) (R_2^4 - 3R_1^4) - 3R_1^4 R_3^2 \left(\frac{G_n}{G_6} + \chi_n \right) + \\
&\quad + R_2^2 R_3^6 \left(\chi_6 \frac{G_n}{G_6} + 1 \right) \left[R_2^4 \left(\chi_n + \frac{G_n}{G_6} \right) - 3R_1^4 \left(\frac{G_n}{G_6} - 1 \right) \right] \Big]; \\
K_2 &= -R_1^2 R_2^6 \left(\frac{G_n}{G_6} - 1 \right) \left[R_3^2 \left(\frac{G_n}{G_6} + \chi_n \right) + R_2^2 \left(\chi_6 \frac{G_n}{G_6} - \chi_n \right) \right] + \\
&\quad + R_2^2 \left(\frac{G_n}{G_6} - 1 \right) \left[R_1^2 R_3^6 \left(\chi_6 \frac{G_n}{G_6} + 1 \right) + R_2^6 \times \right. \\
&\quad \times \left. \left(\frac{G_n}{G_6} - 1 \right) (R_1^2 - R_2^2 + R_3^2) \right]; \\
K_3 &= \left(\frac{G_n}{G_6} - 1 \right) \left[R_3^6 \left(\chi_6 \frac{G_n}{G_6} + 1 \right) + R_2^6 \left(\frac{G_n}{G_6} - 1 \right) \right] - \\
&\quad - R_2^6 \left(\frac{G_n}{G_6} - 1 \right) (\chi_6 + 1) \frac{G_n}{G_6}; \\
K_4 &= 3R_2^2 R_3^2 \left(\frac{G_n}{G_6} + \chi_n \right) \left[R_1^4 R_2^2 \left(\chi_6 \frac{G_n}{G_6} - \chi_n \right) - 3R_1^4 \left(\frac{G_n}{G_6} - 1 \right) \times \right. \\
&\quad \times (R_3^2 - R_2^2) - R_2^6 \left(\chi_6 \frac{G_n}{G_6} + 1 \right) - R_2^4 \left(\chi_n + \frac{G_n}{G_6} \right) \times \\
&\quad \times (R_3^2 - R_2^2) \Big] - 3R_2^4 \left(\chi_6 \frac{G_n}{G_6} - \chi_n \right) \left[R_1^4 \left(\frac{G_n}{G_6} + \chi_n \right) - \right. \\
&\quad \left. - R_2^4 \left(\frac{G_n}{G_6} + 1 \right) \right]; \\
K_5 &= -R_2^6 \left(\chi_6 \frac{G_n}{G_6} - \chi_n \right) \left[R_1^2 \left(\frac{G_n}{G_6} + \chi_n \right) - \right. \\
&\quad - R_2^2 \left(\frac{G_n}{G_6} - 1 \right) + R_2^4 R_3^2 \left(\frac{G_n}{G_6} + \chi_n \right) \times \\
&\quad \times \left[R_1^2 \left(\chi_6 \frac{G_n}{G_6} - \chi_n \right) - R_2^2 \left(\chi_6 \frac{G_n}{G_6} + 1 \right) \right] - \\
&\quad - 3R_1^2 R_3^2 \left(\frac{G_n}{G_6} + \chi_n \right) \left(\frac{G_n}{G_6} - 1 \right) (R_3^2 - R_2^2); \\
K_6 &= -3R_3^2 \left(\frac{G_n}{G_6} - 1 \right) \left(\frac{G_n}{G_6} + \chi_n \right) (R_3^2 - R_2^2).
\end{aligned}$$

Функции комплексной переменной, характеризующие напряженное состояние датчика, имеют следующий вид:

$$\varphi_d(z) = \sum_{k=-\infty}^{k=\infty} a_k^n z^k = a_{-1}^n \frac{1}{z} + a_1^n z + a_3^n z^3, \quad (86)$$

$$\psi_d(z) = \sum_{k=-\infty}^{k=\infty} a_k'^n z^k = a_{-3}'^n \frac{1}{z^3} + a_{-1}'^n \frac{1}{z} + a_1'^n z. \quad (87)$$

Из сравнения выражений (63) и (64) с выражениями (86) и (87) следует, что функции, определяющие напряженное состояние датчика, в первом и во втором случаях по форме совершенно одинаковы. Отличие заключается лишь в величинах коэффициентов при комплексной переменной. Это говорит о том, что наличие бетонного кольца не изменяет характера распределения напряжений в датчике, а лишь изменяет их величины.

Дальнейший ход решения совершенно аналогичен первому случаю, поэтому нет необходимости в его повторении. Окончательная формула для искомых главных приращений напряжений аналогична формуле (73):

$$\sigma_1, \sigma_2 = \frac{1}{8Cl} \left[\frac{\Gamma_{AB} + \Gamma_{CD}}{A_d} \pm \frac{\Gamma_{AB} - \Gamma_{CD}}{B_d} \right], \quad (88)$$

где $A_d = 2b_1 - b_2 \frac{1}{R_1^2}$;

$$B_d = 12b_3 R_1^2 - 3b_4 \frac{1}{R_1^4} + b_5;$$

$$b_1 = \frac{1}{4D} R_2^2 R_3^2 (\chi_n + 1) (\chi_6 + 1) \frac{G_d}{G_6};$$

$$b_2 = -\frac{1}{2D} R_1^2 R_2^2 R_3^2 (\chi_n + 1) (\chi_6 + 1) \frac{G_d}{G_6};$$

$$b_3 = \frac{1}{2D_1} R_2^2 R_3^2 (\chi_n + 1) (\chi_6 + 1) \frac{G_d}{G_6} (K_2 - R_1^4 K_3);$$

$$b_4 = \frac{1}{2D_1} R_2^2 R_3^2 (\chi_n + 1) (\chi_6 + 1) (R_1^4 K_1 - 4R_1^6 K_2) \frac{G_d}{G_6};$$

$$b_5 = \frac{1}{2D_1} R_2^2 R_3^2 (\chi_n + 1) (\chi_6 + 1) (4R_1^6 K_3 - K_1) \frac{G_d}{G_6}.$$

Выражения для D , D_1 , K_1 — K_6 даны в пояснениях к формуле (85).

Формула (88) позволяет определить величину приращений напряжений в породе по величине разности хода поляризованного света, измеренной в четырех точках фотоупругого датчика. Следует заметить, что для одних и тех же пород и датчиков в зависимости от марки бетона и толщины бетонного кольца получается различное напряженное состояние датчика. Оно зависит от отношения величин модуля упругости и коэффициента Пуассона породы, бетона и датчика. Так, при модуле упругости для стекла (датчика) $0,91 \cdot 10^6$ для породы $1,3 \cdot 10^6$ и для бетона $0,2 \cdot 10^6$ кг/см² и коэффициенте Пуассона соответственно 0,18; 0,26 и 0,30 тангенциальные напряжения в точках A , B , C и D при одноосном напряженном состоянии P в породе выражаются величинами, приведенными в табл. 7.

Таблица 7

Точки	Напряженное состояние в кольце		
	без бетона	бетонное толщиной 0,1 см	бетонное толщиной 0,5 см
$\widehat{\sigma\sigma}_{AB}$	4,622P	2,712P	2,520P
$\widehat{\sigma\sigma}_{CD}$	-3,006P	-1,132P	-1,048P

Таким образом, наличие бетонного кольца (даже очень тонкого) снижает напряжения в датчике примерно в 1,5 раза; с увеличением его толщины снижение напряжений в датчике происходит незначительно. Если $E_d < E_6 < E_n$, то наличие бетонного кольца будет увеличивать напряжения в датчике. В формуле (88) учтено влияние бетонного кольца на величину напряжений, а следовательно, и на разность хода поляризованного света в датчике. Поэтому бетонное кольцо может иметь любую толщину и любое соотношение упругих постоянных пород, датчика и бетона.

Порода, окружающая датчик, может работать в условиях плоской деформации или плоского напряженного состояния. Поэтому в формуле (88) для породы коэффициент χ_n берется в соответствии с напряженным состоянием. Так, если датчик установлен недалеко от обнажения, где порода находится в условии плоского напряженного состояния, то $\chi_n = \frac{3 - \nu_n}{1 + \nu_n}$; если же датчик установлен на расстоянии более пяти—шести диаметров скважины, где порода работает в условии плоской деформации, то $\chi_n = 3 - 4 \nu_n$.

5. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ ВО ВРЕМЕНИ И ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

При измерении напряжений во времени на момент установки фотоупругих датчиков могут встретиться два случая: в первом — исследуемый объект находится в ненапряженном состоянии и во втором — в объекте уже существует исходное поле напряжений.

Первый случай может встретиться при исследовании работы монолитной и сборной крепи, когда датчик замуровывается в элементы крепи до их установки или непосредственно при возведении крепи. В этом случае приращения напряжений, измеряемые непосредственно фотоупругим датчиком, являются главными нормальными напряжениями, действующими в исследуемой конструкции.

Второй случай имеет место при исследовании напряженного состояния элементов системы разработки или горного массива в зоне влияния очистных работ, а также при измерении напряжений в действующей крепи. Здесь абсолютные значения главных нормальных напряжений являются результирующими от сложения исход-

ного поля напряжений, имевшего место до измерений, и приращений, замеренных фотоупругим датчиком. Конечной целью измерений является получение абсолютного значения величины и направления главных нормальных напряжений породы или крепи в точке установки фотоупругого датчика. Они определяются после каждого снятия показаний в фотоупругом датчике.

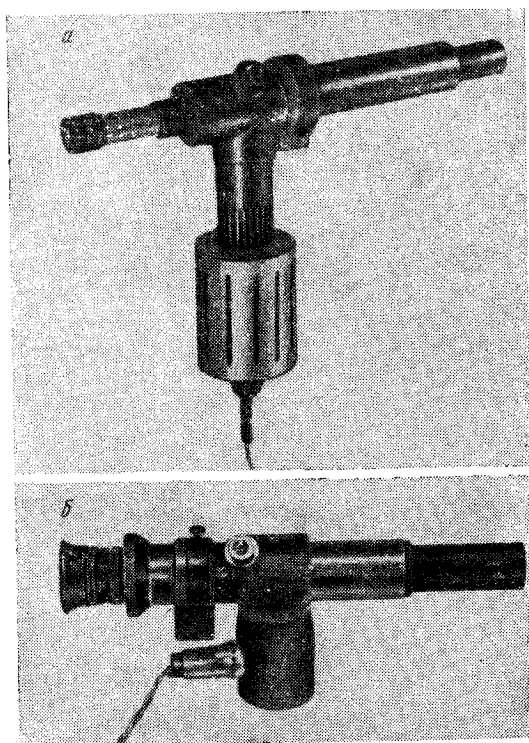


Рис. 27. Общий вид полярископов:
а — для исследования датчиков, установленных на расстоянии от 0 до 5 м; б — для исследования датчиков, установленных на расстоянии от 0 до 0,5 м

Получение исходных напряжений, как отмечалось ранее, производится методами полной или частичной разгрузки в зависимости от места установки датчика, в глубине массива или на обнажении. Методика производства работ ими описана в предыдущих главах.

Фотоупругий датчик устанавливается в скважину, образованную при разгрузке. Глубина установки определяется решаемыми вопросами и зависит от возможностей полярископа. Полярископ, изготовленный в Институте горного дела г. Свердловска, позволяет производить измерения в фотоупругих датчиках, установленных

на глубине до 3—5 м. Конструкция его очень проста и аналогична известному ранее полярископу одностороннего действия с плоской поляризацией [41]. Общий вид полярископа одностороннего действия представлен на рис. 27, а. При измерении он может закрепляться на распорной стойке. Измерительным элементом в нем является поворотный кальцитовый компенсатор КПК-1М. В качестве источника света используются электрические лампочки, работающие от сети с напряжением от 36 до 220 в.

Второй полярископ изготовлен в портативном исполнении (см. рис. 27, б). Он позволяет производить измерения в фотоупругом датчике, заглубленном до 0,5 м. Питание полярископа осуществляется от шахтных аккумуляторов.

В фотоупругом датчике определяется направление главных



Рис. 28. Измерение напряжений в фотоупругих датчиках в шахтных условиях

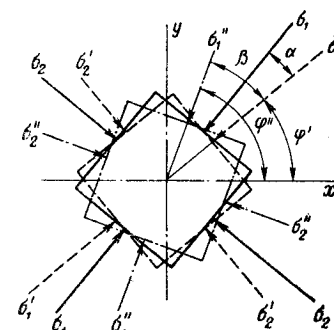


Рис. 29. Схема к определению абсолютных значений напряжений по исходному напряженному состоянию и приращению напряжений

приращений и разность хода поляризованного света Γ_{AB} и Γ_{CD} с помощью шахтного полярископа (рис. 28). Измерение этих величин занимает не более 10—15 мин. Величина главных приращений напряжений определяется по формуле (88). Однако, прежде чем воспользоваться этой формулой, необходимо предварительно получить ряд величин, характеризующих упругие и оптические свойства датчика, бетона и породы.

Для породы и бетона необходимо определить их модули упругости и коэффициенты Пуассона. Материалом для определения упругих свойств горной породы служат образцы, отбираемые в точке измерения, или керны, получаемые при разгрузке. Бетонные образцы заливаются в формы во время установки датчиков и оставляются для твердения в шахте. Испытание образцов породы и бетона производится по известным методикам [2, 19, 33].

Для материала датчиков кроме модуля упругости и коэффициента Пуассона необходимо знать коэффициент оптической чувствительности. Все эти величины определяются путем испытания образцов призматической и дисковой формы по методикам, описанным в работах [8, 42, 46].

После получения упругих постоянных вычисляются коэффициенты, входящие в формулу (88), и величина главных приращений напряжений в породе.

Величина и направление абсолютных значений главных нормальных напряжений σ_1 , σ_2 и φ определяются путем наложения.

Схема к определению абсолютных значений напряжений по исходному напряженному состоянию и приращению напряжения приведены на рис. 29. Вычисления производятся по формулам:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1, \sigma_2 &= \frac{\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma''_1 + \sigma''_2}{2} \pm \\ &\pm \sqrt{\left(\frac{\sigma'_1 - \sigma'_2}{2} + \frac{\sigma''_1 - \sigma''_2}{2} \cos 2\beta\right)^2 + \left(\frac{\sigma''_1 - \sigma''_2}{2} \sin 2\beta\right)^2}, \\ \operatorname{tg} 2\alpha &= \frac{\sigma''_1 - \sigma''_2}{(\sigma'_1 - \sigma'_2) + (\sigma''_1 - \sigma''_2) \cos 2\beta} \end{aligned} \right\} \quad (89)$$

где α — направление абсолютных главных нормальных напряжений, отсчитываемое от σ'_1 до σ_1 ;

$$\beta = \varphi'' - \varphi' - \text{угол между } \sigma'_1 \text{ и } \sigma_1.$$

На каждый фотоупругий датчик, устанавливаемый в массиве горных пород, заводится типовой паспорт. Назначение его — максимально упростить и унифицировать обработку результатов измерения. В него заносятся сведения о времени и месте установки датчика, свойствах породы, бетона и датчика, компонентах исходного напряженного состояния. Кроме того, по этим данным вычисляются коэффициенты A_d и B_d , входящие в формулу (88).

В дальнейшем после каждого измерения в фотоупругом датчике вычисляются приращения напряжений. Вычисления их при наличии коэффициентов A_d и B_d занимает несколько минут. Разность хода, измеренная в датчике, величины приращений напряжений и эскиз с их направлением заносятся в паспорт.

Затем по формулам (89) вычисляются абсолютные значения и направление главных нормальных напряжений и выполняется эскиз напряженного состояния. Ведение обработки экспериментальных данных в такой форме дает наглядное представление о характере изменения напряженного состояния в точке измерения как по величине напряжений, так и по их направлению.

Погрешность комплексного метода измерения напряжений складывается из погрешностей метода разгрузки и метода измерения напряжений фотоупругими датчиками.

Погрешности методов частичной и полной разгрузок даны в

Типовой паспорт на фотоупругий датчик

Датчик № _____

1. Место установки _____
2. Дата установки _____
3. Дата измерения исходных напряжений _____

4. Эскиз

установки
в сечении
выработки

5. Размеры:

1) радиус отверстия
 $R_1 =$

2) радіус датчика
 $R_2 =$

3) радиус скважины $R_0 =$

4) толщина датчика
 $t =$

- ## 6. Материалы:

1) датчик $E_d =$ $\mu_d =$ $G_d =$ $\chi_d =$ $C =$

2) бетон	$E_6 =$	$\mu_6 =$	$G_6 =$	$\chi_6 =$
3) порода	$E_{\Pi} =$	$\mu_{\Pi} =$	$G_{\Pi} =$	$\chi_{\Pi} =$

Коэффициенты: $K_1 =$ $K_2 =$ $K_3 =$ $K_4 =$ $K_5 =$ $K_6 =$

$$\begin{array}{ccccccccc} K_3 = & & K_4 = & & K_5 = & & K_6 = & & \\ D = & & D_1 = & & & & & & \\ b_1 = & & b_2 = & & b_3 = & & b_4 = & & b_5 = \\ & A_n = & & & B_n = & & & & \end{array}$$

- ## 8. Результаты измерений

№ измерений	Дата измерений	Разность хода, Ммк	Приращения напряжений		Абсолютные напряжения		Эскиз
			кг/см ²	град	кг/см ²	град	

предыдущих главах (см. табл. 1, 3, 5). Погрешности при определении приращений напряжений приведены в табл. 8.

Таким образом, средняя квадратичная погрешность в определении приращения направлений σ_1 и σ_2 соответственно составляет 5,25 и 5,7%, предельная относительная погрешность — 10,5 и 11,4%. Такая погрешность вполне удовлетворяет задачам, решаемым с помощью этого метода.

Чувствительность фотоупругого датчика из стекла К-8 ($E_d = 0,9 \cdot 10^{10}$ кг/см²; $\mu_d = 0,19$; $C = 3$) толщиной 1 см, установленного в крепких горных породах, менее 1 кг/см². В случае необходи-

Таблица 8

Функции и их аргументы	Абсолютная величина	Средняя квадратичная погрешность	Функции и их аргументы	Абсолютная величина	Средняя квадратичная погрешность
$E_{\text{п}}$	$0,8 \cdot 10^6$	$0,016 \cdot 10^6$	K_2	1645	111
$\mu_{\text{п}}$	0,3	0,006	K_3	2165	143
$G_{\text{п}}$	$0,307 \cdot 10^6$	$0,0063 \cdot 10^6$	K_4	-91,370	3,080
$\chi_{\text{п}}$	2,08	0,0164	K_5	-6207	298
$E_{\text{б}}$	$0,2 \cdot 10^6$	$0,004 \cdot 10^6$	K_6	-435	29,3
$\mu_{\text{б}}$	0,3	0,006	D	700	37,3
$G_{\text{б}}$	$0,077 \cdot 10^6$	$0,0016 \cdot 10^6$	D_1	$847,26 \cdot 10^6$	$72,5 \cdot 10^6$
$\chi_{\text{б}}$	2,08	0,0164	b_1	0,226	0,014
$E_{\text{д}}$	$0,9 \cdot 10^6$	$0,018 \cdot 10^6$	b_2	-0,452	0,028
$\mu_{\text{д}}$	0,19	0,0038	b_3	0,000356	0,0000487
$G_{\text{д}}$	$0,378 \cdot 10^6$	$0,0076 \cdot 10^6$	b_4	0,560	0,06
$\chi_{\text{д}}$	2,36	0,011	b_5	-0,560	0,0601
R_1	0,25	0,01	$A_{\text{д}}$	0,904	0,0396
R_2	1,75	0,005	$B_{\text{д}}$	-2,236	0,19
R_3	2,1	0,01	Γ_{AB}	500	11
t	1,0	0,005	Γ_{CD}	300	11
C	3	0,06	σ_1''	40,5	2,13
K_1	160,880	8,560	σ_2''	33,3	1,9

Предельная относительная погрешность
 $X_{\text{пр}} = 2m, \%$

$$\sigma_1'' = 10,5$$

$$\sigma_2'' = 11,4$$

мости чувствительность датчика можно повысить за счет увеличения толщины датчика.

Работа фотоупругих датчиков из стекла проверялась в лабораторных условиях. Датчик устанавливается в отверстие металлической пластины с размерами $17 \times 17 \times 1$ см. Диаметр отверстия 45 мм, датчика 35 мм. В качестве цементирующего состава применялась смесь эпоксидной смолы с фарфором, имеющая модуль упругости после холодного отверждения $0,059 \cdot 10^6$ кг/см². Пластина нагружалась под прессом. Величина напряжений, измеренная фотоупругим датчиком, и отличие ее в процентах от заданной величины приведены в табл. 9.

Таблица 9

Заданные напряжения, кг/см ²	Разность хода, Ммк		Измеренные напряжения, кг/см ²	Отличие измеренных от заданных напряжений, %
	Γ_{AB}	Γ_{CD}		
150	702	-271	160	6,6
300	1392	-542	318	6

6. ВОПРОСЫ, РЕШАЕМЫЕ КОМПЛЕКСНЫМ МЕТОДОМ ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ

Комплексный метод измерения напряжений может быть использован при исследовании напряженного состояния в процессе работы любых конструкций и объектов из упругих материалов. При исследовании горного давления этим методом можно решать следующие основные вопросы:

исследование закономерностей горного давления при разработке месторождения;

исследование напряженного состояния монолитной и сборной крепи из упругих материалов и взаимодействие ее с горными породами;

контроль за прочностью и устойчивостью отдельных элементов системы разработки и крепи в горных выработках.

При изучении закономерностей развития горного давления в процессе разработки месторождения точки измерения расставляются в горном массиве, который будет находиться в зоне влияния горных работ исследуемого участка в определенном порядке. При этом расположение точек измерения должно быть таким, чтобы их сеть выходила за зону влияния. В этом случае можно выявить закономерности затухания влияния очистных работ и определить зоны опорных давлений. Сеть измерительных точек должна быть распределена не только по площади, но и по глубине, т. е. датчики необходимо устанавливать на различных горизонтах.

Точки измерения располагаются как на стенках горных выработок, так и на некотором удалении от них в глубине горного массива. В соответствии с этим для измерения исходного напряженного состояния применяется полная или частичная разгрузка. Установку датчиков желательно производить до начала разработки участка, но в случае необходимости они могут устанавливаться и в процессе разработки.

При проведении исследований необходимо помнить, что поле напряжений, в горном массиве, находящемся в зоне влияния очистных работ, имеет чрезвычайно сложное строение с довольно высоким градиентом напряжений. Поэтому, чтобы получить представление о распределении напряжений в горном массиве и о закономерностях их изменений, сеть измерительных точек должна быть по возможности частой. Это особенно важно для зон, прилегающих к выработанному пространству и для элементов системы разработки, где градиенты напряжений могут быть особенно высокими.

Снятие показаний с фотоупругих датчиков должно строго увязываться с развитием горных работ, с увеличением размеров выработанного пространства.

Для исследования напряженного состояния монолитной и сборной крепи из упругих материалов фотоупругие датчики могут устанавливаться как в действующей крепи, так и в возводимой.

При установке датчиков в действующую крепь необходимо измерять исходные напряжения методом частичной разгрузки. В том случае, когда датчики устанавливаются во вновь возводимую крепь, необходимость в измерении исходных напряжений отпадает.

Контроль за прочностью и устойчивостью отдельных элементов системы разработки и крепью в горных выработках осуществляется путем установки в них в наиболее опасных участках фотоупругих датчиков. Такой контроль необходимо производить при камерных системах разработки в кровле, в междуканальных целиках и днищах. Используя фотоупругие датчики, можно контролировать напряженное состояние поддерживающих целиков, когда разработка месторождения производится без обрушения с сохранением поверхности и т. д.

Основными достоинствами комплексного метода измерения напряжений во времени с использованием фотоупругих датчиков являются большая точность измерений, устойчивость работы фотоупругих датчиков во времени и небольшая трудоемкость измерений по сравнению с другими методами.

Фотоупругие датчики, изготовленные из стекла, отличаются хорошей устойчивостью работы во времени и могут использоваться в течение нескольких лет. В процессе эксплуатации свойства их совершенно не изменяются. Изготовление фотоупругих датчиков обходится примерно в 10 раз дешевле, чем датчиков струнного типа, используемых для аналогичных целей.

Небольшая трудоемкость метода позволяет производить исследования закономерностей горного давления на больших площадях, охватывая разрабатываемый участок как по площади, так и по глубине. Увеличение числа измерительных точек позволяет использовать этот метод уже как самостоятельный при изучении закономерностей развития горного давления, так как при сравнительно небольших затратах возможно получить большой объем информации об изменении напряженного состояния горного массива при ведении очистных работ.

Недостатком метода является ограниченная глубина установки датчиков в скважинах. Максимальная глубина в настоящее время определяется разрешающей способностью применяемых полярископов. Изготовленный в настоящее время полярископ одностороннего действия имеет разрешающую способность до 5 м. Разрабатывается конструкция полярископа, которая должна позволить увеличение этой глубины до 15 м и более. Однако максимальная глубина будет ограничена пределами прямой видимости в скважине за счет ее искривления.

ГЛАВА IV

ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ НА ЖЕЛЕЗНЫХ РУДНИКАХ УРАЛА

1. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ПРОЯВЛЕНИЯ ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ НА ГОРОБЛАГОДАТСКОМ РУДНИКЕ

Гороблагodatское месторождение находится в комплексе метаморфизованных слоистых вулканогенно-осадочных образований, имеющих выдержанное простираие с восточным падением под углом 42—45°.

Вмещающие породы представлены порфиритами, гранато-эпидотовыми скарнами и сиенитами. Висячий бок менее устойчив, чем лежащий. Устойчивость пород снижается в местах разломов, сбросов и развитой трещиноватости. Рудные тела представлены пластообразными залежами, сложенными в основном скарновыми и частично оспенными рудами, вкрапленными и сплошными магнетитами. Эти залежи залегают согласно с плоскостью висячего блока и делятся на нижнюю и верхнюю пачки. Общая мощность верхней пачки 90—120 м, нижней — 85—150 м. Расстояние между пачками от 10 до 80 м. Длина залежей составляет 200—300 м на верхних горизонтах и увеличивается до 550 м на нижних.

Месторождение подземным способом начали отрабатывать с поверхности, имеющей отметку около 280 м. В настоящее время дорабатывается этаж на горизонте 60 м, т. е. на глубине 220 м от поверхности. Верхние этажи разрабатывались в основном камерными системами с различными вариантами отбойки руды. С переходом очистных работ на горизонт 60 м стали применять принудительное этажное обрушение с отбойкой руды на вертикальные и реже горизонтальные компенсационные камеры, а также систему с одностадийной выемкой и секционной отбойкой руды в зажатой среде.

Проявления горного давления имели место на протяжении всего времени разработки месторождения. Причем интенсивность его с увеличением глубины постоянно возрастала, формы проявления при различных системах разработки были различными. При камерных системах преимущественно обрушались потолочины, висячий бок и реже междуканальные целики. На верхних горизонтах площади обнажения 1500—2200 м² самообрушались через 1,5—2 года после обнажения, на нижних горизонтах обрушение про-

исходило при площадях обнажения 1200—600 м² через 3—6 месяцев после их образования.

При разработке нижних горизонтов системой этажного принудительного обрушения разрушению подвергались подсеченные рудные массивы и междублоковые целики. При одностадийной системе разработки с секционной отбойкой руды в зажатой среде в очередной отбиваемой секции образовывались трещины, распространяющиеся в глубину рудного массива на 15—20 м. Раскрытие трещин достигало 10—15 см и приводило к смещению отбуренных вееров скважин, создавая опасные условия труда горнорабочих. В лежащей пачке (на глубине 220 м в блоке 33) по одной из таких трещин произошло смещение всей секции вниз на 1,5 м, причем трещина имела раскрытие в верхней части до 1 м.

Особенности проявления горного давления на Гороблагодатском руднике в натурных условиях изучали путем измерения напряжений в горных породах методами частичной разгрузки с наклейкой тензометрических датчиков и со съёмными тензометрами, полной разгрузки и комплексным методом с применением фотоупругих датчиков.

Измерения напряжений в горных породах на шахте «Южная» Гороблагодатского рудоуправления начали производиться с 1962 г. при отработке этажа 120—170 м. Местом измерений являлись преимущественно буровые выработки, пройденные в междуканальных и междублоковых целиках.

В блоке 5 напряжения измерялись на стенке горной выработки, пройденной в междуканальном целике. Ширина междуканального целика была равной 16 м, камеры имели ширину 20—22 м. Результаты измерений приведены в табл. 10. Здесь использовалась схема частичной разгрузки с наклейкой двух тензометрических датчиков, направленных по вертикальной и горизонтальной осям.

Таблица 10

Место измерения	Глубина от поверхности, м	Дата измерения	Величина напряжений, кг/см ²		Угол между осью x и σ_1 , град
			σ_1	σ_2	
МКЦ, блок 5	115	IX—1961	200	126	90
То же	115	IX—1961	150	141	90
Сопряжение трех целиков, блок 12	153	V—1962	130	91	35
То же	153	V—1962	440	215	30

В блоке 12 (этаж горизонта 120—170 м) точки измерения находились в буровых выработках, пройденных в сопряжении трех междуканальных целиков (рис. 30). Камеры имели ширину около 25 м, целики 22—37 м. В этом блоке использовалась частичная

разгрузка с наклейкой трех тензометрических датчиков. Максимальное главное нормальное напряжение в плоскости, расположенной вкост простирания, действует примерно по нормали к висячему боку (см. рис. 30, точка № 4). В плоскости, расположенной по простиранию, максимальное главное нормальное напряжение из-за влияния очистных камер направлено под углом 35°.

Таким образом, измерения напряжений в блоках 5 и 12 показали, что при применении двух тензодатчиков нельзя определить фактическое направление главных нормальных напряжений в плоскости измерения, что легко производится при использовании трех тензодатчиков.

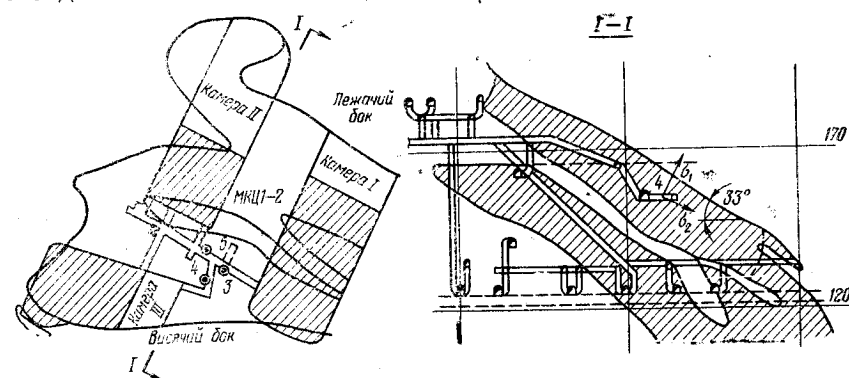


Рис. 30. Измерения напряжений в блоке 12 (гор. 120—170 м):
3, 4, 5 — расположение точек замеров

При отработке нижележащего горизонта (60—120 м) измерения напряжений производились регулярно с целью изучения закономерностей развития горного давления в процессе отработки этажа. Расположение точек измерения на буровом горизонте этого этажа показано на рис. 31. Измерения производились в блоках 19, 20, 21, 22 и 23, где применялись этажное обрушение с отбойкой руды на вертикальные компенсационные камеры (блоки 19, 20 и 21) и одностадийная система с отбойкой руды в зажатой среде (блоки 22 и 23).

Разработка горизонта была начата с блока № 19. Блок включал в себя две компенсационные вертикальные камеры, расположенные по простиранию и разделенные междуканальным целиком шириной 20 м. Точки измерения находились в буровом штреке, пройденном посередине целика на сопряжении его с потолочной. Измерения проводились методом полной разгрузки с применением разъемной тензометрической головки и методом частичной разгрузки с наклейкой трех тензометрических датчиков. Результаты измерений в этом блоке представлены в табл. 11.

Из табл. 11 видно, что максимальные нормальные напряжения во всех точках имели направление от 25 до 55° к горизонтальной

Таблица 11

Вид измерения (разгрузки)	Дата измерения	Величина напряжений, кг/см^2		Угол между осью x и σ_1 , град
		σ_1	σ_2	
Частичная	IX—1962	276	143	45
То же	X—1962	266	239	55
»	X—1962	408	352	45
Полная	X—1962	327	196	25
То же	X—1962	239	226	45

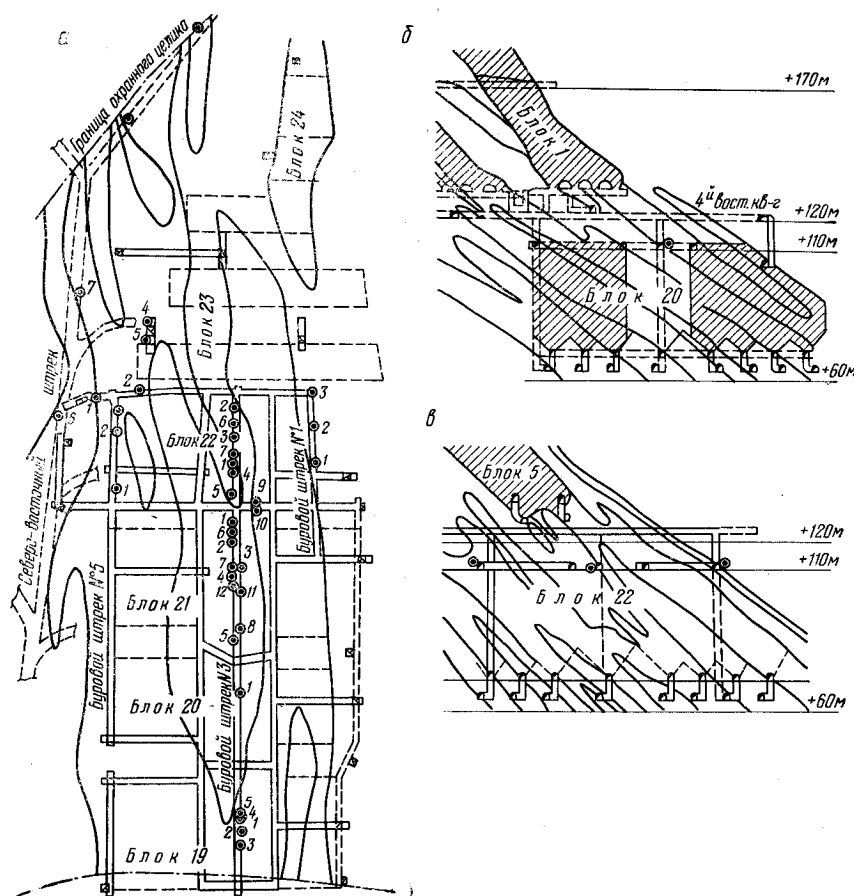


Рис. 31. Расположение точек измерений в блоке № 19, 20, 21, 22, 23 и 24 (этаж 60—120 м);
1, 2, 3 и т. д. — точки замеров

оси. Такое направление было близким к нормали плоскости тектонического нарушения, являющегося естественной границей блока 19 и отрабатываемой залежи. По-видимому, на величину и направление главных нормальных напряжений в этих точках оказывала влияние тектоника этого участка.

Сравнительно небольшие величины напряжений в блоке 19 объясняются отсутствием больших очистных выработок на этаже горизонта 60—120 м, который этим блоком только начинал отрабатываться.

Блок 20 отрабатывался аналогично блоку 19. Измерения в нем производились после отработки компенсационных камер. Максимальное нормальное напряжение здесь изменило свое направление и составило с горизонтальной осью угол 15° . При этом величина его возросла до 503 кг/см^2 .

Выемка очередного блока 21 началась после погашения блока 20 и производилась той же самой системой (см. рис. 31). Выработанное пространство в этот момент имело размеры по простиранию около 80 м. Первая серия изменений в блоке была проведена в декабре 1963 г. до образования компенсационных камер, т. е. сразу же после массового взрыва блока 20 (табл. 12).

Таблица 12

№ точки	Дата измерений	Величина напряжений, кг/см^2		Угол между осью x и σ_1 , град
		σ_1	σ_2	
1	XII—1963	558	66	70
2	XII—1963	457	217	90
3	XII—1963	150	75	80
4	XII—1963	199	120	90
5	XII—1963	805	346	90
6	III—1964	447	492	20
7	III—1964	402	335	50
8	III—1964	1500	740	70
9	III—1964	930	850	30
10	III—1964	342	173	10
11	III—1964	212	202	45
12	III—1964	335	242	50

Вторая серия измерений в блоке № 21 была произведена в марте 1964 г. после образования компенсационных камер (см. табл. 12).

В точках 1, 2, 3 и 4 блока 21 были установлены фотоупругие датчики для измерения напряжений во времени. Результаты измерения в этих точках приведены в табл. 13.

Данные табл. 13 показывают изменение во времени напряжений, вызванное ведением очистных работ. При этом применение оптических датчиков позволило получить это изменение в одной и той же точке.

Таблица 13

№ точки	Дата установки датчика	Исходные напряжения, кг/см^2		Угол между осью x и σ_1 , град	Дата измерения приращений напряжений	Величина приращений напряжений, кг/см^2		Угол между осью x и σ_1 , град	Абсолютные напряжения, кг/см^2		Угол между осью x и σ_1 , град
		σ_1'	σ_2'			σ_1''	σ_2''		σ_1	σ_2	
1	XII—1963	558	66	70	III—1964	13,5	11,4	0	569	79,5	70
2	XII—1963	558	66	70	VI—1964	83,5	36,4	140	637	105	75
3	XII—1963	457	217	90	III—1964	84,3	31,5	95	541	249	95
4	XII—1963	150	75,2	100	III—1964	95,0	66,0	105	245	141	110
	XII—1963	199	120	90	III—1964	86,0	39,0	50	272	172	65

Эпюра распределения напряжений вдоль междукammerного целика, расположенного по простиранию рудного тела, представлена на рис. 32.

Из сравнения результатов измерений первой и второй серии видно, что после образования компенсационных камер напряже-

ния в тех же точках возросли. При этом тенденция к увеличению напряжений в сторону выработанного пространства стала проявляться более заметно. Об этом свидетельствовало и состояние рудного массива целика, находящегося на границе между блоком № 21 и выработанным пространством, который к этому моменту начал деформироваться и был взорван в нарушенном виде.

Применение вышеописанных методов измере-

ния напряжений позволило выявить причину появления опорного давления при отработке блока № 21. Так, образование зоны опорного давления в граничной части указанного блока обусловлено отставанием обрушения пород висячего бока от подвигания очистных работ. Зависшие породы создают концентрированную нагрузку на граничный массив. Обрушение висячего бока происходит по достижении предельного пролета. Для данного участка величина этого пролета колеблется в пределах от 80 до 130 м.

Блок 22 в отличие от предыдущих обрабатывался одностадийной системой разработки с отбойкой руды секциями по 15 м в

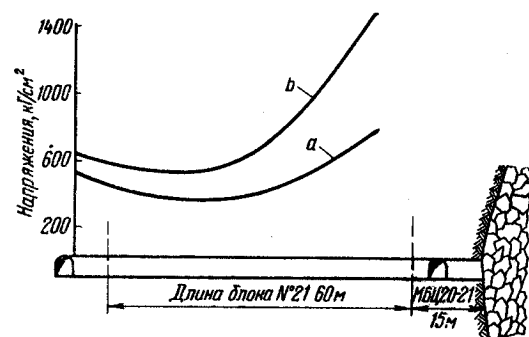


Рис. 32. Распределение напряжений в блоке 21 по простиранию месторождения:
а, б — соответственно до и после образования компенсационных камер

Таблица 14

Дата измерений	Величина напряжения, кг/см^2		Угол между осью x и σ_1 , град
	σ_1	σ_2	
УП—1964	121	110	65
XII—1964	183	118	115
XII—1964	221	107	110
XII—1964	233	212	120
XII—1964	312	237	120
II—1965	250	195	80

зажатой среде. Измерение напряжений в нем на протяжении всего периода отработки производилось в трех буровых штреках: в штреке № 1, расположенном под висячим боком, в штреке № 3 — в середине мощности рудного тела и в штреке № 5 — у лежащего бока.

Величины напряжений, измеренные на стенках бурового штрека № 3 на глубине 180 м приведены в табл. 14.

Эпюра распределения напряжений вдоль штрека № 3, построенная по результатам измерений, показывает, что здесь также существует в граничной части рудного массива зона опорного давления (рис. 33). К сожалению, максимальную величину напряжений в приконтактной части рудного массива с выработанным пространством установить не представилось возможным, так как выработки на 10—15 м обычно заполняются рудой, забрасываемой во время взрывания предыдущей секции.

В точке № 1 бурового штрека № 3 еще до отработки блока 20 был установлен фотоупругий датчик для измерения напряжений во времени. Исходное напряженное состояние в момент установки фотоупругого датчика характеризовалось следующими величинами компонентов: $\sigma_1' = 121 \text{ кг/см}^2$, $\sigma_2' = 110 \text{ кг/см}^2$, $\varphi' = 65^\circ$. После погашения блока 21 фотоупругим датчиком были измерены следующие значения главных приращений напряжений и их направление: $\sigma_1'' = 285 \text{ кг/см}^2$, $\sigma_2'' = 95 \text{ кг/см}^2$ и $\varphi'' = 135^\circ$. Абсолютные значения главных нормальных напряжений в точке измерения после погашения блока 21 стали равными $\sigma_1 = 391 \text{ кг/см}^2$, $\sigma_2 = 215 \text{ кг/см}^2$, $\varphi = 130^\circ$.

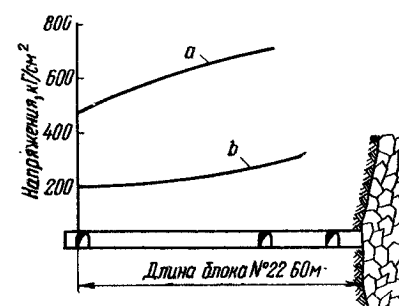


Рис. 33. Распределение напряжений в блоке 22 по простиранию месторождения:
а — со стороны висячего бока; б — в середине мощности рудного тела.

Таким образом, погашение блока 21 существенным образом оказало влияние на напряженное состояние блока 22. В середине его длины (по простиранию) главные нормальные напряжения на стенке выработки возросли на 260 и 115 кг/см^2 и направление их изменилось на 65° . Максимальное нормальное напряжение до погашения блока № 21 было направлено в сторону рудного массива, а после погашения стало направленным в сторону выработанного пространства.

В буровых штреках № 1 и 5 измерения напряжений на протя-

Таблица 15

№ точки	Дата измерения	Величина напряжений, кг/см^2		Угол между осью x и σ_1 , <i>град</i>	Место измерения на контуре выработки
		σ_1	σ_2		
Буровой штрек № 1					
1	XII—1964	375	340	80	Стенка
		530	509	25	Кровля
	II—1965	560	85	30	Стенка
		955	835	95	Кровля
	IV—1965	730	700	35	Стенка
		470	273	0	Кровля
2	XII—1964	825	770	175	Стенка
	II—1965	572	356	30	Кровля
		987	935	50	Стенка
	IV—1965	810	435	45	»
		139	38	90	Кровля
	3	IV—1965	480	434	157
Буровой штрек № 5					
1	XII—1964	380	303	10	Стенка
		236	176	50	Кровля
	II—1965	203	46	145	»
		169	108	105	Сопряжение стенки с кровлей
	II—1965	138	124	0	Стенка
	IV—1965	520	24	45	»
	IV—1965	504	262	20	Кровля
	2	XII—1964	353	139	30
XII—1964		198	65	150	Стенка
II—1965		94	34	125	»
IV—1965		695	366	10	»

жении всего времени производились в одних и тех же местах, названных измерительными станциями в близко расположенных точках (см. рис. 31). Напряжения измерялись на стенке горной выработки и в кровле. Результаты измерений приведены в табл. 15.

Полученные данные о напряженном состоянии обрабатываемого массива показывают, что по площади блока наблюдается значительная неравномерность в распределении напряжений.

По буровому штреку № 1 сразу после погашения блока № 21 напряжения в точке № 2 были выше, чем в точке № 1, расположенной ближе к отработанному пространству. Однако после отбойки первой секции в этой панели напряжения в точке № 1 возросли и закономерность распределения напряжений вдоль блока № 22 под висячим боком приняла вид, представленный на рис. 33, а.

В точке № 3 (см. рис. 31), находящейся на границе с блоком 23, напряжения были значительно ниже, чем в точках № 1 и 2.

В буровом штреке № 5,

расположенном у лежащего бока, было проведено три серии измерений: первая — после погашения блока № 21 и две последующие через каждые два месяца (см. табл. 15). Замеры показали, что на протяжении этого промежутка времени напряжения не оставались постоянными. Интенсивный прирост их произошел после отбойки первой секции в панели у висячего бока. Прирост напряжений в граничной части рудного массива с выработанным пространством происходил более интенсивно, чем в противоположной части блока, и после отбойки секции напряжения здесь стали в 1,3 раза выше, чем со стороны рудного массива последующего блока 23.

Проведенные измерения по трем буровым штрекам свидетельствуют о наличии повышенного давления на рудный массив обрабатываемого блока, граничащий с выработанным пространством. Этот факт подтверждается визуальными наблюдениями за состоянием обрабатываемого массива и горных выработок [10]. После отбойки первой секции под висячим боком в массиве блока образовался ряд трещин, начинающихся на границе с обрушением и распространяющихся в глубину блока на 15—20 м. Величина раскрытия трещин колебалась от нескольких миллиметров до 10—15 см. В дальнейшем отработка всего блока сопровождалась образованием более или менее крупных трещин. Наличие их затрудняло отработку блока, приводило к смещению обуренных массивов руды, создавало опасные условия труда.

По мощности рудного тела также наблюдалась неравномер-

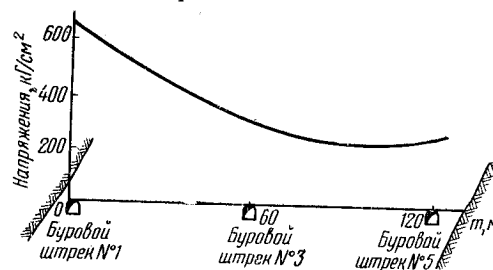


Рис. 34. Распределение напряжений в блоке 22 вкост простирания месторождения

ность в распределении напряжений. На рис. 34 представлено изменение величины напряжений по мощности рудного тела. Зависимость эта построена по средним величинам напряжений, измеренных в буровых штрехах № 1, 3 и 5. Из рис. 34 видно, что величина напряжений у висячего бока вдвое выше, чем у лежащего. Это обусловлено, по-видимому, концентрацией напряжений от пород висячего бока, обрушение которых отстает от очистных работ как по простиранию, так и по падению.

Последние измерения напряжений в блоке 22 производились в марте 1966 г., когда в блоке оставались неотработанными две секции у лежащего бока. Напряжения измерялись в точке № 2 бурового штреха № 5 и в орте, проходящем по границе с блоком 23 (см. рис. 31). Величины напряжений приведены в табл. 16.

Таблица 16

№ точки	Величина напряжений, кг/см^2		Угол между осью x и σ_1 , град	Место измерения, проведенного в марте 1966 г.
	σ_1	σ_2		
1	283	221	40	Орт блока 22
2	371	149	20	То же
3	534	225	0	Точка 2, буровой штрех № 5
4	377	171	130	Блок 23
5	298	157	85	Блок 24
6	266	110	45	Восточный штрех
7	373	193	20	То же
8	224	90	75	»
9	134	75	85	»

Из сравнения результатов измерения в точке № 2 бурового штреха № 5 с результатами, полученными ранее (см. табл. 14), следует, что величины напряжений остались примерно одного порядка (520 и 534 кг/см^2).

По-видимому, прирост напряжений, обусловленный приближением очистных работ, компенсировался отрезкой массива руды от висячего бока за счет опережения отработки панели у висячего бока по сравнению с отработкой у лежащего.

Измерения, произведенные по северо-восточному штреху (см. рис. 31), показали, что по мере удаления точек измерения от выработанного пространства, образованного после отработки блоков 19, 20, 21 и 22 в сторону подкарьерного целика, наблюдается заметное уменьшение величины напряжений. В оставшейся части блока № 22 они составляли 534 кг/см^2 , а в подкарьерном целике — 134 кг/см^2 (см. табл. 16, точка № 9).

Таким образом, применение изложенных выше методов измерения напряжений горных пород позволили на Гороблагодатском руднике выявить закономерность проявления горного давления

как по простиранию, так и вкрест простирания разрабатываемого месторождения, а также определить величину опорного давления в зависимости от пролета выработанного пространства и времени.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ РУДНОГО МАССИВА ПРИ РАЗРАБОТКЕ ВЫСОКОГОРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

На Высокогорском месторождении напряженное состояние рудного массива исследовалось при разработке геологического блока № 15, из которого производилась основная добыча рудника. Этот блок сложен малосернистыми магнетитовыми рудами с включением безрудных скарнов. Вмещающие породы представлены сенинтами, роговиками и туфами. Рудное тело прослеживается от поверхности, имеющей отметку +250—270 м до горизонта —170 м. Длина рудного тела по падению 450 м и по простиранию 315 м. Мощность его достигает 200 м, угол падения находится в пределах 65—70°. В настоящее время блок отрабатывается на горизонте —50 м, т. е. на глубине 300 м.

Сплошность месторождения нарушена многочисленными крупными сбросами и взбросами, которые ослабляют устойчивость рудного массива. Кроме того, рудное тело имеет большое количество более мелких нарушений, с различными простиранием и падением.

Руды и вмещающие породы имеют крепость по М. М. Протодьяконову от 7 до 12, модуль упругости от $0,48 \cdot 10^6$ до $1,22 \times 10^6 \text{ кг/см}^2$.

Разработка геологического блока № 15 на верхних горизонтах производилась этажным принудительным обрушением на вертикальные компенсационные камеры с высотой этажа 60 м. С переходом на нижние горизонты и увеличением высоты этажа до 80 м вместо принудительного блокового обрушения стали применять секционную отбойку руды на вертикальные компенсационные щели, объем которых не превышает 10% от объема взрываемой секции.

Исследование закономерностей распределения горного давления по рудному массиву производилось во второй выемочной панели горизонта —50 м путем измерения напряжений в горных породах в различных точках панели комплексным методом с использованием фотоупругих датчиков по вышеописанному методикам. Точки измерения были установлены в рудном массиве выемочной панели и в массиве днища ее. Некоторые результаты измерения приращений напряжений фотоупругими датчиками приведены в табл. 17, а комплексным методом, с определением абсолютных значений главных нормальных напряжений — в табл. 18.

Напряжения в рудном массиве панели измерялись на горизонте +24 м, находящемся в верхней части этажа (рис. 35 точки № 28, 29, 30, 31, 37 и 38), и на горизонте —8 м, в средней его части (рис. 36, точки 16, 17, 18, 19, 20 и 21). Все точки измерения

Таблица 17

№№ точек	Дата установки датчиков	Дата измерений	Глубина от поверхности, м	Приращение напряжений		
				σ_1'' , кг/см ²	σ_2'' , кг/см ²	φ'' , град
16	28. II—1967	24. IV—1967	270	9	1	55
		2. VI—1967		16	6	130
		5. X—1967		27	3	135
		12. XII—1967		35	0,5	130
19	28. II—1967	2. VI—1967	270	0	0	—
		5. X—1967		20	—3	90
		12. XII—1967		42	—10	30
20	28. II—1967	25. IV—1967	270	0	0	—
		2. VI—1967		0	0	—
		5. X—1967		13	—4	65
		12. XII—1967		25	—5	35
21	28. II—1967	2. VI—1967	270	13	—2	100
		5. X—1967		23	—1	100
		12. XII—1967		32	6	125
28	28. II—1967	25. IV—1967	230	4,6	—1	105
		2. VI—1967		14	—0,5	95
		12. XII—1967		42	—3	105
29	28. II—1967	25. IV—1967	230	0	0	—
		2. V—1967		22	4	70
		5. X—1967		38	1	65
		12. XII—1967		14	2	100
31	28. II—1967	25. IV—1967	230	0	0	—
		2. VI—1967		0	0	—
		5. X—1967		25	—2	135
		12. XII—1967		75	30	135
1	20. IV—1966	28. II—1967	300	38	—35	150
8	28. II—1967	2. VI—1967	300	18	—7	135
		5. X—1967		20	—0,5	135
		12. XII—1967		35	—3	135
14	5. X—1967	12. XII—1967	300	51	15	80

Таблица 18

№№ точек	Глубина от поверхности, м	Дата измерения исходных напряжений и установки датчиков	Дата измерения приращений напряжений	Приращение напряжений			Абсолютные значения напряжений		
				σ_1'' , кг/см ²	σ_2'' , кг/см ²	φ'' , град	σ_1 , кг/см ²	σ_2 , кг/см ²	φ , град
2	300	20. IV—1966	28. II—1967	—	—	—	168	98	30
			28. II—1967	7	—5	—5	177	91	35
			2. VI—1967	5	—0,5	20	173	98	30
			5. X—1967	7	—0,6	30	175	98	30
3	300	30. IV—1966	28. II—1967	—	—	—	538	538	—
			28. II—1967	7	—1	160	544	537	163
4	300	20. IV—1966	28. II—1967	—	—	—	660	465	125
			28. II—1967	25	0	30	660	487	125
5	300	20. IV—1966	28. II—1967	—	—	—	830	465	20
			28. II—1967	1,3	—7	150	824	465	20
6	300	20. IV—1966	28. II—1967	—	—	—	533	354	150
			2. VI—1967	12	—2	20	536	360	150
			2. VI—1967	11	—4	60	530	365	150
7	300	20. IV—1966	28. II—1967	—	—	—	986	820	10
			28. II—1967	4	—8	45	990	811	10
			2. VI—1967	4	4	—	990	824	10
			5. X—1967	4	4	—	990	824	10
9	30	28. II—1967	2. VI—1967	—	—	—	115	—11	120
			2. VI—1967	24	—5	10	107	17	130
			5. X—1967	56	12	165	152	19	130
			12. XII—1967	78	10	170	150	42	135
15	300	5. X—1967	12. XII—1967	—	—	—	133	45	165
			12. XII—1967	10	—4	170	143	41	165
17	270	28. II—1967	12. XII—1967	—	—	—	—59	—1	80
			12. XII—1967	40	—3	115	—39	16	60
18	270	28. II—1967	25. IV—1967	—	—	—	496	332	130
			25. IV—1967	21	—3	103	519	329	130
			2. VI—1967	18	—9	80	489	350	130
			5. X—1967	7	—6	10	499	332	130
			12. XII—1967	0	0	—	496	332	130
			12. XII—1967	0	0	—	496	332	130
30	230	28. II—1967	12. XII—1967	—	—	—	172	135	145
37	230	20. IV—1966	28. II—1967	—	—	—	548	440	60
			28. II—1967	42,4	—9	90	582	439	70
			25. IV—1967	32	—12	90	569	440	70
38	230	20. IV—1966	28. II—1967	—	—	—	432	240	95
			28. II—1967	52	—2	35	474	249	105
			2. VI—1967	46	—7	20	473	251	105

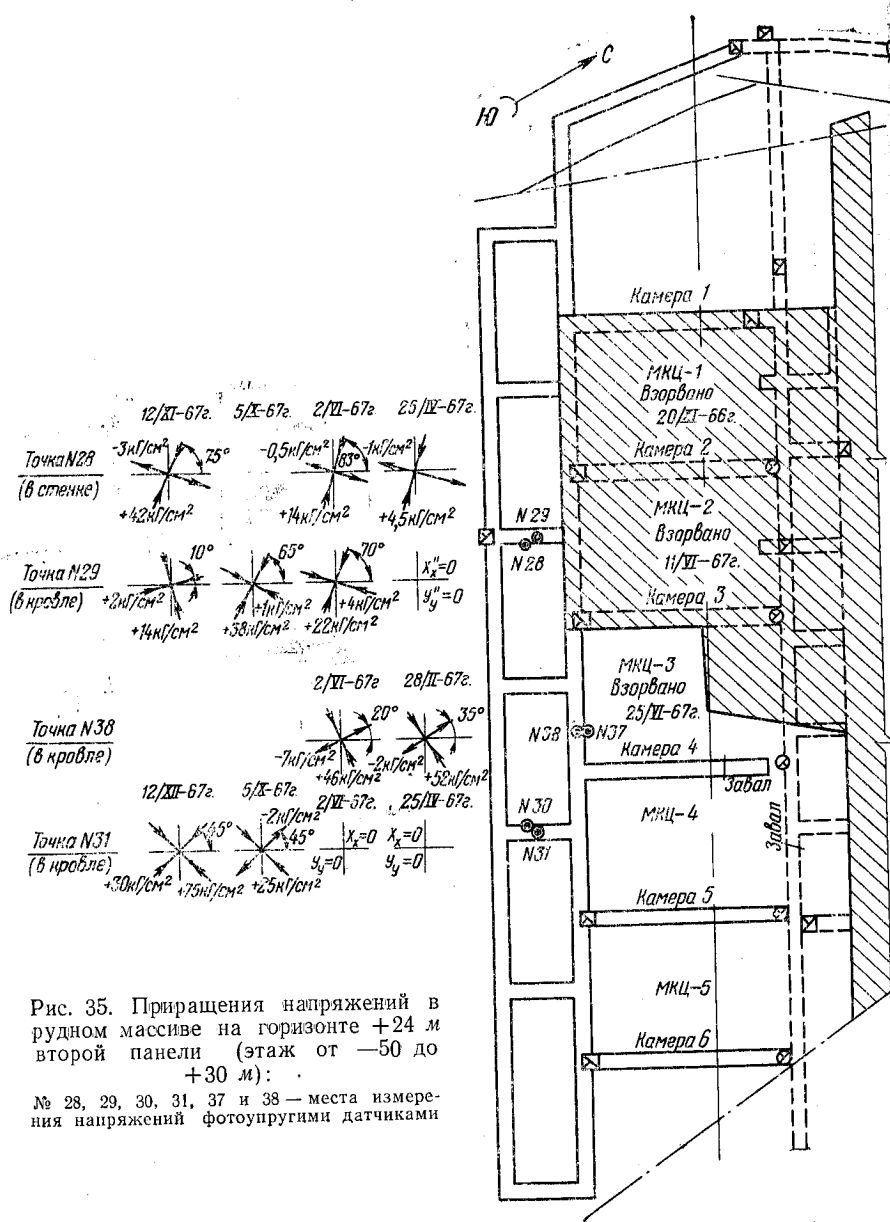


Рис. 35. Приращения напряжений в рудном массиве на горизонте +24 м второй панели (этаж от -50 до +30 м):

№ 28, 29, 30, 31, 37 и 38 — места измерения напряжений фотоупругими датчиками

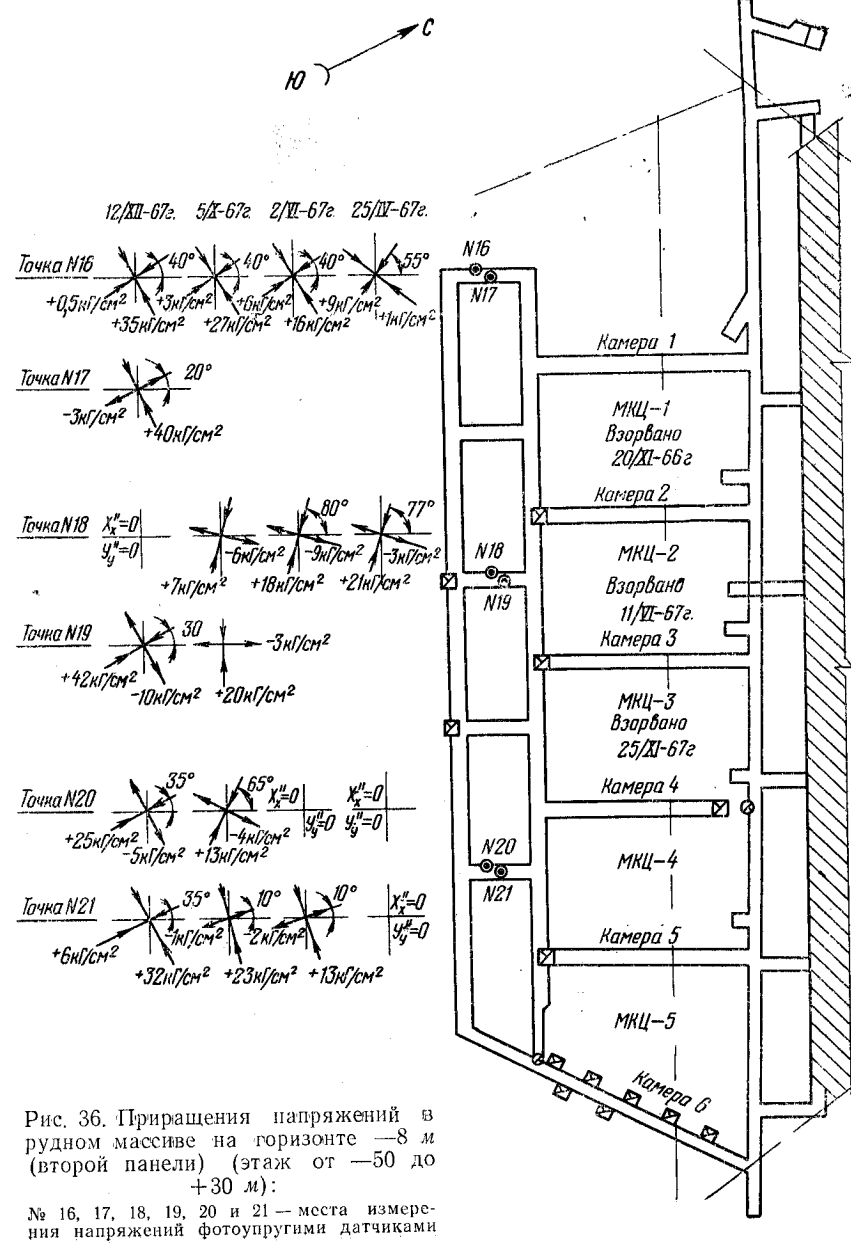


Рис. 36. Приращения напряжений в рудном массиве на горизонте -8 м (второй панели) (этаж от -50 до +30 м):

№ 16, 17, 18, 19, 20 и 21 — места измерения напряжений фотоупругими датчиками

располагались в выработках, пройденных в рудном массиве по границе обрабатываемой панели с последующей (третьей) панелью. Такое расположение точек обусловлено тем, что эта часть массива панели является менее нарушенной, и, кроме того, в этом случае представляется возможным использовать эти же точки при отработке третьей панели.

В точках № 37 и 38 (горизонт +24 м), фотоупругие датчики были установлены до начала разработки панели, когда была произведена подсечка лишь небольшого участка первой секции. После массового взрыва первой и подсечки второй секций в точке № 37, установленной в стенке выработки, приращения напряжений составили +42,4 и +9 кг/см^2 . При этом в вертикальном направлении приращения напряжений были сжимающие, а в горизонтальном — растягивающие. За последующие два месяца, в течение которых производился выпуск руды и расширение подсечки до расположения точки № 37 в плане, приращения напряжений в вертикальном и горизонтальном направлениях возросли до —12 кг/см^2 .

В точке № 38, установленной в горизонтальной плоскости в кровле выработки в одно и то же время с точкой № 37, приращения напряжений после взрыва первой секции составили +52 и +2 кг/см^2 . Растягивающие приращения напряжений были направлены примерно по диагонали подсеченного рудного массива (см. рис. 35). На период проведения взрыва второй секции сжимающее приращение напряжений несколько уменьшилось, а растягивающее увеличилось с —2 до —7 кг/см^2 . Направление главных приращений напряжений практически сохранилось. Все остальные точки измерения в рудном массиве панели были оборудованы позднее, после отработки первой секции.

Таким образом, измерение напряжений в точках № 37 и 38 показало, что максимальные приращения напряжений в них были сжимающие и не превышали +52 кг/см^2 . Растягивающие приращения напряжений составляли от —7 до —12 кг/см^2 и были направлены в плане примерно по диагонали подсеченного рудного массива. Это свидетельствует о том, что рудный массив панели, подсеченный снизу, деформировался как консольная балка. Небольшие целики, оставляемые на подсечке по границе с выработанным пространством, по-видимому, претерпевали большие деформации.

Точки № 16 и 17 на горизонте —8 м были заложены в лежащем боку для исследования развития опорного давления, возникающего вследствие расширения выработанного пространства (рис. 36).

Величины приращений напряжений в точке № 16, установленной на стенке выработки, и характер их изменения во времени представлены в табл. 17. Первоначально более интенсивный прирост напряжений происходил со стороны выработанного пространства под углом 55°. Однако в дальнейшем приращение напряже-

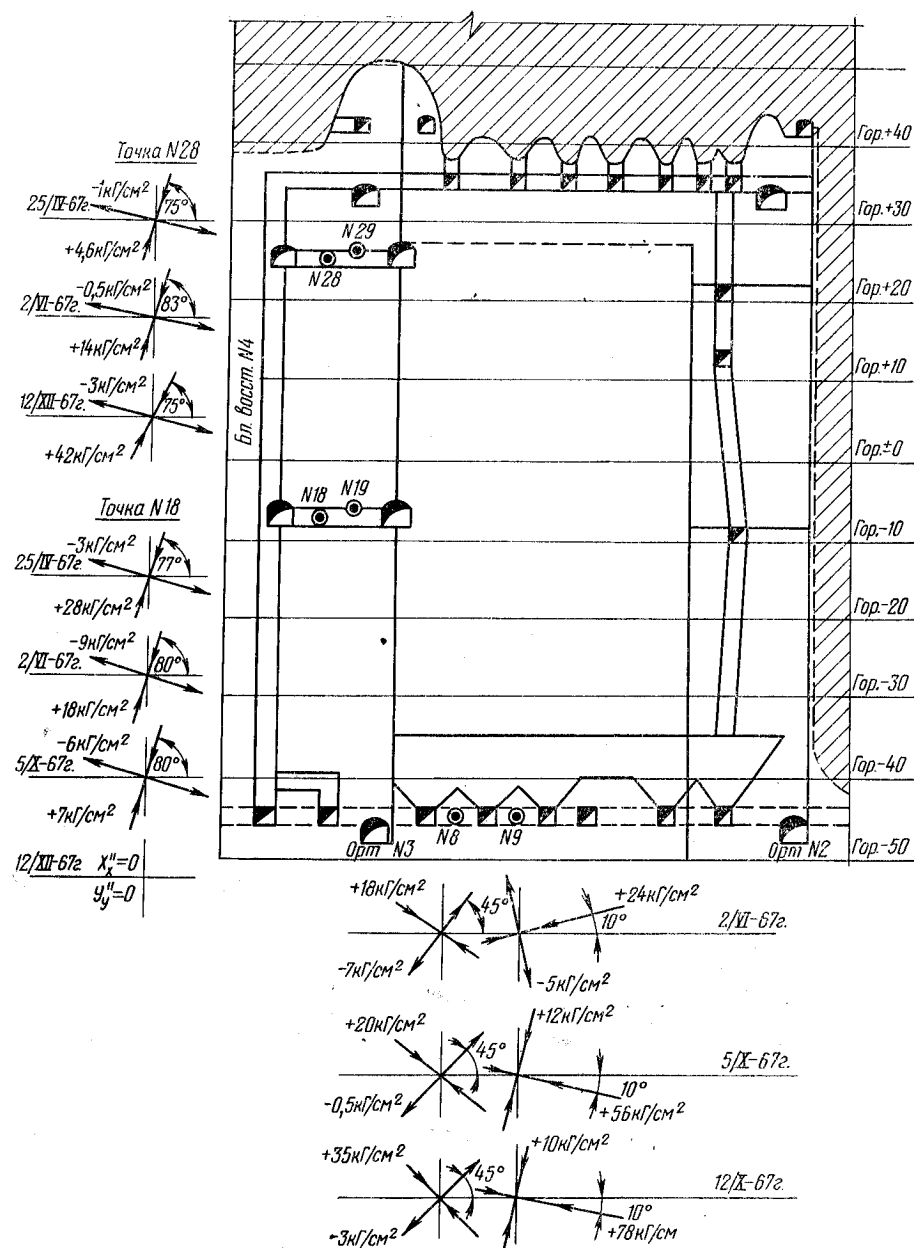


Рис. 37. Приращение напряжений по высоте отбиваемой секции второй панели (этаж —50÷30 м):

№ 8, 9, 18, 19, 28 и 29 — места измерения напряжений фотоупругими датчиками

ний в этом направлении прекратилось и наблюдалось их медленное уменьшение. Одновременно в направлении, перпендикулярном первому, начался интенсивный рост напряжений, достигший после взрыва второй секции 27 кг/см^2 , а после взрыва третьей секции 35 кг/см^2 .

В горизонтальной плоскости главные приращения направлений, измеренные в точке № 17, установленной в кровле выработки, за это же время достигли $+40$ и -3 кг/см^2 .

Таким образом, даже относительно небольшое увеличение площади выработанного пространства (на 2500 м^2 при 7500 м^2 существовавшей ранее) привело к увеличению напряжений на $35-40 \text{ кг/см}^2$. Поэтому следует ожидать, что при дальнейшем росте площади выработанного пространства опорное давление на границах рудного массива может достигнуть значительной величины.

Точки № 18 и 19 горизонта -8 м в плане находятся под точками № 28 и 29 горизонта $+24 \text{ м}$ (рис. 37 и см. рис. 35 и 36). Установлены они были одновременно. Аналогично поставлены точки № 20 и 21 горизонта -8 м и № 30 и 31 горизонта $+24 \text{ м}$. В задачу этой группы точек входило исследование закономерностей горного давления при приближении горных работ и последующему их удалению от места измерения.

Точки № 18, 19 и 28, 29 были установлены после взрыва первой секции, т. е. очистные работы находились от них в $5-7 \text{ м}$. Вторая секция к этому времени была полностью подсечена. При подсечке половины площади третьей секции приращение напряжений в точках, заложенных в стенках горных выработок (точки № 18 и 28, см. рис. 37), на 25 апреля 1967 г. на горизонте $+24 \text{ м}$ составили $+4,6$ и -1 кг/см^2 , на горизонте -8 м , они равнялись 21 и 3 кг/см^2 . После отработки второй и третьей секций главные приращения напряжений на горизонте -8 м оказались равными нулю, т. е. напряженное состояние в точке измерения после прохождения очистных работ вернулось к исходному состоянию. На горизонте $+24 \text{ м}$ вертикальные напряжения увеличились на 42 кг/см^2 , а горизонтальные уменьшились на $+3 \text{ кг/см}^2$.

Приращения напряжений в горизонтальной плоскости измерялись в точках № 19 и 29, установленных в кровле выработок. В точке № 19 после взрывания второй секции главные приращения напряжений составили $+21$ и -3 кг/см^2 . Растягивающие приращения напряжений были направлены в сторону выработанного пространства (см. рис. 36).

После обрушения третьей секции, когда забой очистных работ находился на расстоянии около 40 м от этой точки измерения, главные приращения напряжений имели величины $+42$ и -10 кг/см^2 .

В точке № 29, расположенной на горизонте $+24 \text{ м}$, в результате производства работ на подсечке главные приращения напряжений были равны 38 и 1 кг/см^2 .

Максимальное приращение напряжений было направлено под

углом 65° к границе панели (см. рис. 35). После обрушения второй и третьей секций главные приращения напряжений составили $+14$ и $+2 \text{ кг/см}^2$.

Таким образом, в вертикальном сечении панели имеют место следующие закономерности распределения напряжений при прохождении очистных работ. При подсечении рудного массива второй панели на границе с третьей в средней части этажа возникают растягивающие напряжения.

В верхней части этажа происходит увеличение сжимающих напряжений. После обрушения второй панели сжимающие напряжения в верхней части и растягивающие в средней части этажа уменьшаются.

Группа точек № 20, 21, 30 и 31 установлены против четвертой секции аналогично предыдущей группе точек (см. рис. 35 и 36). В точке № 20, установленной на стенке выработки горизонта -8 м , после подсечки второй и третьей секций приращения напряжений оказались равными $+13$ и -4 кг/см^2 . После их обрушения приращения напряжений составили $+25$ и -5 кг/см^2 (см. рис. 36).

В горизонтальной плоскости в точке № 21 в результате подсечки второй и третьей секций главные приращения напряжений были $+23$ и -1 кг/см^2 , причем растяжение происходило в направлении второй панели. После обрушения обеих секций приращения напряжений стали равными 32 и 6 кг/см^2 . Направление их изменилось незначительно, следовательно, обрушение секций сняло растягивающие напряжения с массива, направленные в сторону подсеченной второй панели, на величину около 7 кг/см^2 .

В точке № 31, установленной в кровле выработки на горизонте $+24 \text{ м}$, в результате подсечки тех же секций второй панели главные приращения напряжений достигли величины $+25$ и -2 кг/см^2 и были направлены под углом 45° к границе панели (см. рис. 35). Растягивающие приращения напряжений были направлены в сторону подсеченных секций. После их обрушения направление главных приращений сохранилось прежним, а величины их стали равными 75 и 30 кг/см^2 . Следовательно, и здесь обрушение обеих секций привело к снятию растягивающих усилий, направленных в сторону обрушаемых секций, на величину до 32 кг/см^2 .

Таким образом, результаты измерений, полученные по двум группам точек, дают следующее представление о влиянии горных работ на напряженное состояние по границе между панелями. После подсечки массив второй панели прогибается в сторону выработанного пространства. Главный вектор прогиба, судя по направлению главных приращений напряжений в точках № 21 и 31, направлен по диагонали подсеченного массива, соединяющей выступающий угол панели с внутренним углом подсечки. Такая деформация подсеченного массива вызывает растягивающие усилия по границам подсеченного массива с третьей панелью и не подсеченной частью второй панели. Величина растягивающих уси-

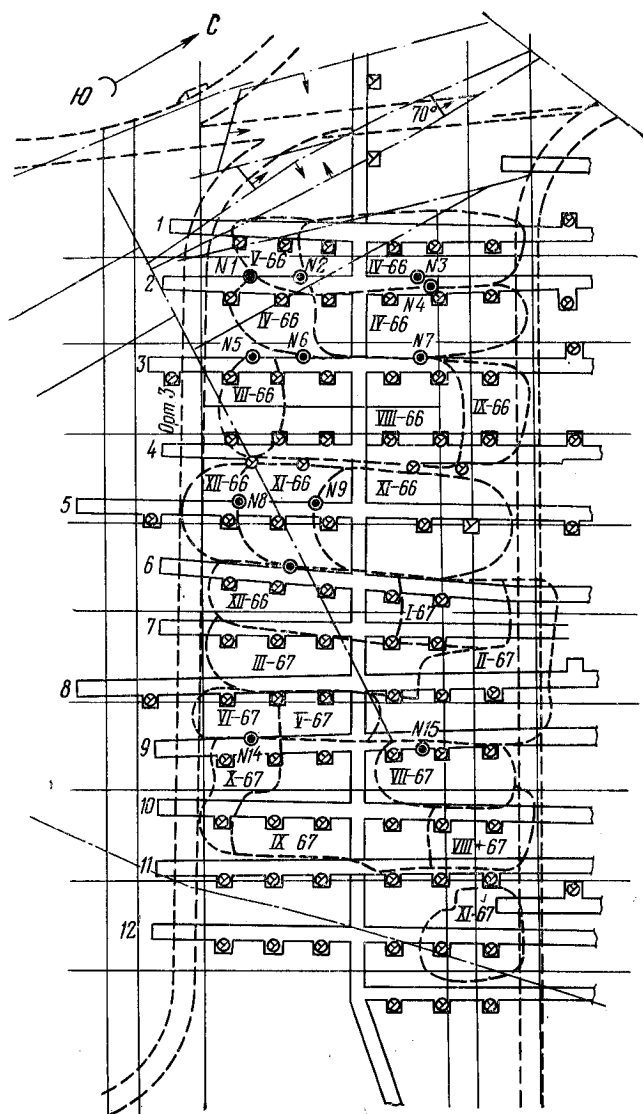


Рис. 38. Места измерения напряжений в днище второй панели фотоупругими датчиками:

1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 — скреперные штреки; № 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 14 и 15 — точки замера; IV-66, V-66 и т. д. — время образования подсечки

лий в точках измерения находилась в пределах $32-35 \text{ кг/см}^2$.

Давление обрушенных горных пород на днище панели определялось косвенно, путем измерения напряжений, возникающих в породах стенок скреперных штреков. Для этого на стенках измерялись исходные напряжения во времени, устанавливались фотоупругие датчики из стекла. За время выполнения работы в днище второй панели, где проводились исследования, было оборудовано 18 точек измерений в скреперных штреках № 2, 3, 5 и 9, находящихся под первыми тремя секциями (рис. 38).

Точки измерения № 1, 2, 3 и 4 в скреперном штреке № 2 были установлены в апреле 1966 г. В это время подсечка панели была произведена лишь над скреперным штреком № 1. Приращения напряжений были измерены лишь в феврале 1967 г. За это время была полностью произведена подсечка второй и первой секций и взорван рудный массив первой секции.

Таким образом, приращение напряжения являлись результатом разгрузки массива днища при образовании подсечки и последующего нагружения взорванной рудой и обрушенной пустой породой.

В точке № 1, расположенной у границы второй панели с рудным массивом, главные приращения напряжений были максимальными и равными $35-38 \text{ кг/см}^2$ (рис. 39). Приращение сжимающих напряжений происходило со стороны рудного массива под углом 30° к горизонтальной оси. В остальных точках в направлении, близком к горизонтальному, также наблюдались приращения сжимающих напряжений, а в перпендикулярном к ним направлении — приращения напряжений были растягивающими. Это свидетельствует о том, что на площади обрушения одной секции ($27 \times 50 = 1350 \text{ м}^2$) давление обрушенных горных пород на днище создает напряжение на стенках выработок, меньшие по величине, чем существовавшие до подсечки панели.

Кроме того, неодинаковые приращения напряжений, меньшие

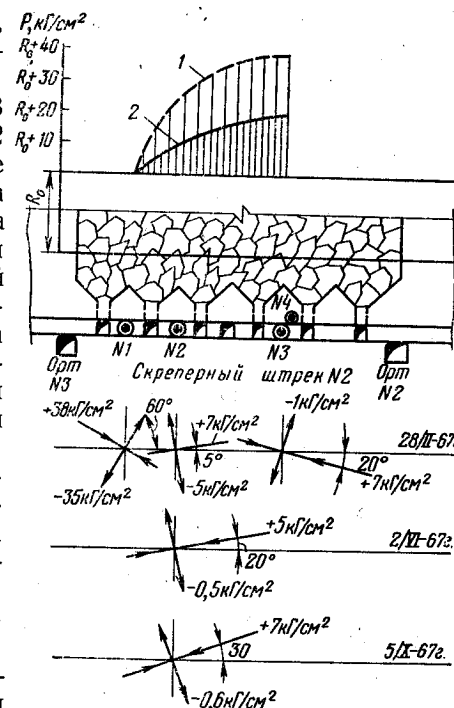


Рис. 39. Приращение напряжений в скреперном штреке № 2 второй панели: № 1, 2 и 3 — места измерений фотоупругими датчиками; 1 — относительное изменение приращения главного нормального напряжения; 2 — относительное изменение приращения главного нормального напряжения

у границы с рудным массивом и большие у границы с отработанной первой панелью, позволяют предположить, что по ширине панели давление обрушенных пород и руд распределяется неравномерно.

У границы, оно, по-видимому, уменьшается за счет взаимодействия обрушенных горных пород с рудным массивом. Распределение давления обрушенных пород вдоль скреперного штрека № 2 в относительных величинах представлено в виде графика на рис. 39.

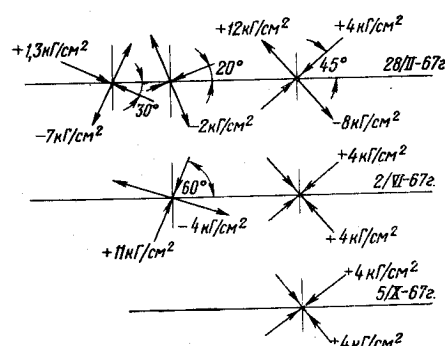
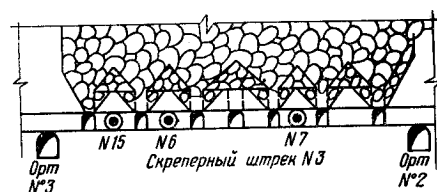


Рис. 40. Приращение напряжений в скреперном штреке № 3 второй панели: № 5, 6, 7 — места измерений фотоупругими датчиками

(рис. 40). Вертикальные приращения напряжений во всех точках были растягивающими и имели величины от $-0,4$ до -2 кг/см². При дальнейшем развитии очистных работ вертикальные приращения напряжений стали сжимающими.

Таким образом, в этих скреперных штреках главные приращения напряжений в точках измерения, вызванные проведением подсечки и обрушением секций I и II, имели максимальную величину от -35 до $+38$ кг/см².

В скреперном штреке № 5 фотоупругие датчики в точках № 8 и 9 были установлены в феврале 1967 г. после производства над ним подсечки (см. рис. 37). Первый замер был сделан в июне 1967 г. Главные приращения напряжений в обеих точках примерно одинаковы, но направлены различно (см. табл. 17 и 18). Эти приращения напряжений были обусловлены развитием работ на подсечке в третьей секции.

Прирост напряжений в горизонтальном направлении составляет от 7 до 23 кг/см² и, по-видимому, обусловлен концентрацией напряжений в массиве дна при образовании выработанного пространства.

Точка № 2 просуществовала до октября 1967 г. После взрыва второй секции приращения напряжений в ней составили 7 и $-0,6$ кг/см² и после пересчета было установлено, что вертикальные напряжения превышали напряжения, существовавшие до подсечки, на 1,3 кг/см².

В скреперном штреке № 3 точки измерения были оборудованы одновременно с точками в скреперном штреке № 2. После обрушения первой секции главные приращения напряжений (28/II—1967 г.) имели величины от 1,3 до 12 кг/см².

После обрушения второй секции главные приращения напряжений в точке № 8 на 5/X 1967 г. составили $-0,5$ и $+20$ кг/см², причем направлены они были под углом 45° к вертикальной и горизонтальной осям. В точке № 9, расположенной ближе к середине панели, главные приращения напряжений имели большие значения и составляли $+56$ и $+12$ кг/см². Направление максимального приращения напряжений почти горизонтальное. Вертикальные приращения напряжений, определенные по главным нормальным напряжениям в обеих точках, после обрушения второй секции были сжимающими и по величине равными 4,3 кг/см² в точке № 8 и 17,4 кг/см² в точке № 9.

Обрушение третьей секции вызвало приращение вертикальных сжимающих напряжений в точке № 8 на 6 кг/см², а в точке № 9 — уменьшение их на 1,3 кг/см².

В этих точках на протяжении всего времени исследований наблюдался постоянный прирост горизонтальных сжимающих напряжений. В точке № 8 со времени производства подсечки до обрушения третьей секции они увеличились на $+16$ кг/см², а в точке № 9 на $+76$ кг/см².

В скреперном штреке № 9 под третьей секцией фотоупругие датчики были установлены в октябре 1967 г. за полтора месяца до взрыва секции. Подсечка в этой секции к моменту установки датчика была сделана полностью. После обрушения этой секции главные приращения напряжений в точке № 14 составили $+51$ и $+15$ кг/см², а в точке № 15 они составили $+10$ и -4 кг/см². Направление главных приращений напряжений было близким к вертикальному и горизонтальному. В точке № 14 максимальное приращение было близким к вертикальному, а в точке № 15 — близким к горизонтальному (см. табл. 17, 18).

Исследования напряженного состояния дна, проведенные в процессе отработки трех секций второй панели, показали, что вертикальные напряжения в массиве дна при проведении подсечки над ним уменьшаются. После обрушения подсеченного массива они снова возрастают. Величина их зависит от места расположения точки измерения. В точках, расположенных у границы панели, конечные величины вертикальных напряжений имеют меньшее значение, чем до образования дна. В центральных точках панели напряжение от давления обрушенных пород превышает исходные на $5-7$ кг/см².

Это свидетельствует о том, что по площади дна давление обрушенных пород распределяется неравномерно. В краевых зонах, прилегающих к горному массиву, а также вблизи целиков, оставленных по границе между панелями, давление обрушенных пород меньше, чем в центральной части панели.

Горизонтальные приращения напряжений в рассматриваемых точках не дают определенных закономерностей в отношении их распределения. Почти во всех точках увеличивалось горизонталь-

ное напряжение. Максимальная величина приращений их была равна 76 кг/см^2 .

Анализ абсолютных значений главных нормальных напряжений и главных приращений, а также их направлений показывает, что в днище панели имеет место исключительно сложное поле напряжений. Распределение напряжений в нем зависит от многих факторов, основными из которых являются изрезанность рудного массива выработками скреперования и выпуска и распределение давления обрушенных пород по площади днища. Кроме того, напряженное состояние днища претерпевает постоянные изменения, связанные с развитием очистных работ, очередностью выпуска и степенью уплотнения обрушенных пород.

Основной задачей исследования горного давления в днищах является оценка устойчивости выработок выпуска и доставки. Поэтому исследование напряженного состояния пород на контурах этих выработок имеет большое значение и оно может быть в полной мере произведено комплексным методом измерения напряжений горных пород с применением фотоупругих датчиков. Этот метод впервые применяется для исследования напряженного состояния массива днища и давления обрушенных пород на него. Изложенные результаты показывают перспективность этого метода при определении давления обрушенных пород.

Проведенные исследования закономерностей горного давления во времени комплексным методом позволяют сделать некоторые выводы о методике.

Прежде всего необходимо отметить, что абсолютные значения главных нормальных напряжений на Высокогорском руднике значительно отличаются друг от друга. По-видимому, величина их во многом зависит от тектоники участка, а возможно, от наличия остаточных напряжений, связанных с образованием руд и пород.

Приращения напряжений составляют небольшую часть от абсолютных их значений и тесно связаны с образованием горных выработок. Приращения напряжений лишь в отдельных случаях достигали $75-78 \text{ кг/см}^2$. Тем не менее, несмотря на их небольшую величину, они могут быть непосредственной причиной самообрушений рудного массива. Это еще раз наводит на мысль, что в абсолютных значениях главных нормальных напряжений значительная доля может приходиться на напряжения, свойственные только отдельным прочным блокам породы, будь то структурные блоки или блоки иного характера.

Поэтому исследование изменений напряженного состояния горного массива является эффективным средством изучения закономерностей горного давления, так как все изменения напряжений в точке измерения связаны именно с изменением горных работ, с их конфигурацией, скоростью подвигания и т. п. Эти исследования будут тем эффективнее, чем раньше до начала влияния очистных работ будут расставлены фотоупругие датчики и чем чаще будет сеть их установки.

Таким образом, применение изложенных методов измерения напряжений горных пород позволило на Высокогорском руднике установить закономерность распределения и изменения напряжений в рудном массиве при производстве очистных работ, а также в первом приближении характер давления обрушенных пород на днище вынимаемых панелей.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЦЕЛИКОВ НА ПОКРОВСКОМ РУДНИКЕ

На Покровском руднике Богословского рудоуправления при подземной разработке образовалось около 350 тыс. м^3 пустот со значительными площадями обнажения кровли [11]. Накопление

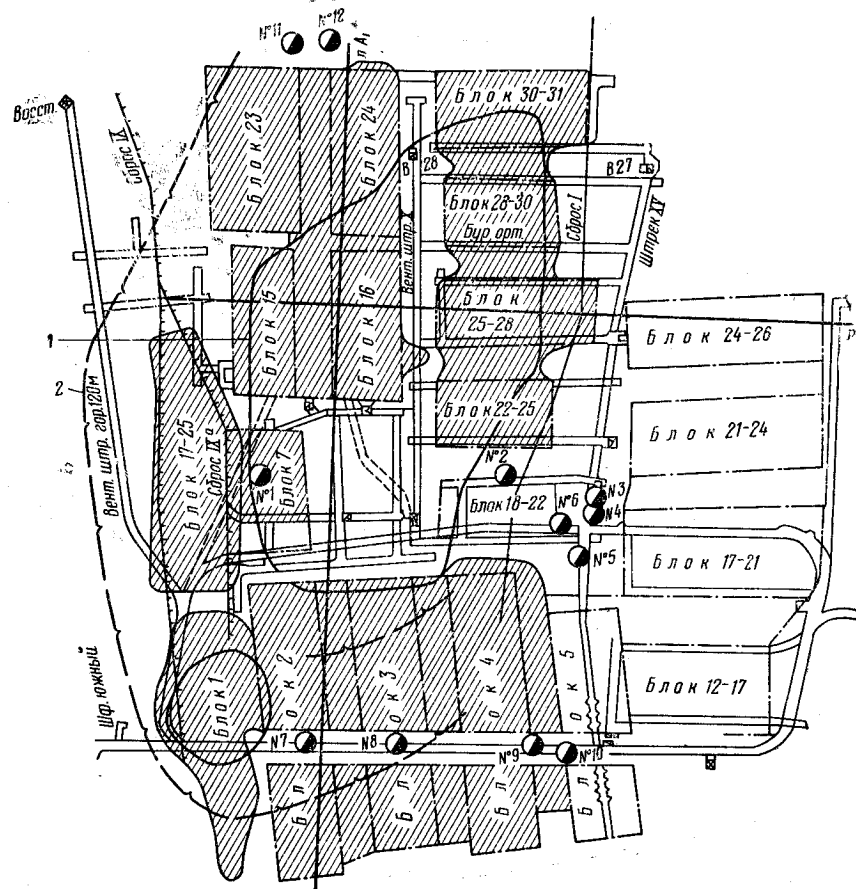


Рис. 41. План горных работ по гор. +120 м (глубина 100 м) Покровского рудника: № 1, 2, 3 и т. д. — места измерения напряжений: 1 — граница провалов поверхности после ликвидации пустот; 2 — трещины на поверхности после ликвидации пустот

пустот было обусловлено несоответствием принятого метода их погашения прочности налегающих пород. В результате этого появилась опасность внезапного массового самообрушения налегающих пород с большими воздушными ударами.

Покровское железорудное месторождение сложено главным образом изверженными и частично осадочными породами. Рудное тело пластообразной формы представлено магнетитовыми и скарновыми рудами с коэффициентом крепости по шкале М. М. Протодьяконова $f=8-12$. Налгающая толща в основном состоит из разновидностей порфирита и скарна с коэффициентом крепости $f=12-15$ и объемным весом $2,8-2,9 \text{ т/м}^3$.

Рудное тело имеет пологое падение и мощность в среднем 16 м. Глубина залегания около 100 м. С юга участок ограничен сбросами IX и IXa, а с севера сбросом I (рис. 41). Сбросы заполнены перематым материалом и являются плоскостями ослабления налегающей толщи пород.

Разработка месторождения производилась камерной системой. Междуканальные целики вынимались массовым взрыванием. Пустоты на отработываемом участке гасились путем взрывания десятиметровой толщи покрывающих пород. Однако при принятом методе управления налегающей толщи основная масса пород кровли не обрушалась, хотя площади обнажения отдельных участков достигали 4—5 тыс. м^2 и более. В результате на руднике накопилось много пустот общей площадью около 22 тыс. м^2 . Эти пустоты сосредоточены в четырех основных участках, разделенных рудными целиками шириной 10—15 м (см. рис. 41). Характеристика участков и размеры пустот приведены в табл. 19. Площадь целиков, поддерживающих подработанную налегающую толщу пород, не превышала 17% от площади выработанного участка.

Таблица 19

Участки и блоки	Размеры участка, м	Площадь обнажения, м^2	Объем пустот, тыс. м^3
Северо-восточный (блоки № 15, 16, 23 24)	92×52	5000	115
Северо-западный (блоки 22, 25, 25—28, 28—30 и 30—31)	110×45	4600	92
Южный (блоки № 1, 2, 3 и 4)	90×95	8700	98
Центральный (блоки № 17—25, 7, 8 и 18—20)	75×45	3600	41

Таким образом, к 1964 г. на руднике создавалась опасность самообрушения пород на значительных площадях с воздушными ударами. Выходом из данной ситуации могла быть только ликвидация пустот. Была выполнена специальная научно-исследовательская работа по изучению закономерностей горного давления на Покровском руднике. В результате этой работы посадку на-

легающей толщи было предложено производить путем взрывания опорных целиков без дополнительных работ по разрушению налегающей толщи. При этом исходили из конкретных горнотехнических условий участка. Учитывая наличие сбросов I и IX, участок подработанной толщи между ними рассматривался как балка, лежащая на опорах, в качестве которых служил массив руды и породы северо-восточной и юго-западной границ. Сцеплением по контактам сбросов ввиду сильной перематости пород практически можно пренебречь. Возможность обрушения пород налегающей толщи после погашения опорных целиков исследовалась аналитически с помощью метода сеток и методами фотоупругого и эквивалентного моделирования. В результате этих исследований было установлено, что потолочина после погашения целиков должна обрушиться под действием собственного веса.

Однако, чтобы проверить расчеты, необходимо было установить, действительно ли сбросы I и IX полностью изолируют рассматриваемую толщу от окружающего массива и не будут ли они служить опорой после взрывания целиков. Проверка была произведена путем исследования загруженности опорных целиков под подработанной толщей пород. Установить степень их загруженности можно было лишь путем экспериментальных замеров напряжений в них. При этом необходимо было определить нагрузку на целик, а не распределение напряжений по его сечению.

Для этой цели был использован метод частичной разгрузки с наклейкой тензометрических датчиков, так как он менее трудоемок по сравнению с полной разгрузкой и позволяет без больших затрат произвести большое число измерений по всему подработанному участку во многих целиках. Измерения напряжений производились на стенках горных выработок бурового горизонта (см. рис. 41). Результаты измерений приведены в табл. 20.

Таблица 20

№№ точек	Величины напряжений на стенке горной выработки, кг/см^2		Угол между осью x и σ_1 , град	Вертикальные напряжения в целике, кг/см^2	Дата измерения
	σ_1	σ_2			
1	200	117	150	67	IV—1963
2	683	535	150	228	II—1964
3	272	247	160	91	II—1964
4	278	253	150	93	V—1964
5	465	399	5	155	II—1964
6	890	344	165	296	II—1964
7	347	265	160	115	II—1964
8	241	210	5	80	II—1964
9	418	364	10	139	II—1964
10	540	441	160	180	II—1964
11	103	53	175	35	VI—1964
12	134	10	—	45	VI—1964

В табл. 20 даются величины и направления главных нормальных напряжений на стенках горных выработок. Для получения представления о величине вертикальной составляющей напряженного состояния целика исходили из следующего. Выработки, в которых производились измерения, находились в целиках небольшой ширины, в плоскости поперечного сечения которых имело место напряженное состояние, близкое к одноосному. В этом случае максимальная концентрация напряжений на стенках выработки, у которых форма поперечного сечения приближается к круговой, не более трех [24]. Следовательно, вертикальные напряжения в этом случае в целике ориентировочно могут быть определены из выражения

$$N_{в.ц} = \frac{1}{3} \sigma_y. \quad (90)$$

Как видно из табл. 20, максимальные напряжения были в целиках, расположенных в центральной части участка. Это, очевидно, связано с тем, что деформации прогиба потолочины здесь имеют наибольшее значение. Большие напряжения были в целике южного квершлага (см. рис. 41). При этом распределение напряжений вдоль целика было неодинаковым и зависело от его состояния. В районе точек № 7 и 8 верхняя часть целика была частично разрушена и напряжения были меньше, чем в ненарушенной части (район точек № 9 и 10). Вероятно, целик из-за частичного разрушения не полностью воспринимал нагрузку от вышележащих пород и за счет деформации уходил от давления.

Точки № 3 и 4 находились на расстоянии 30 см друг от друга. Измерения в точке № 4 производились на три месяца позже, чем в точке № 3. За это время площадь подработки в ближайшем блоке увеличилась на 140 м². Напряжения возросли всего лишь на 6 кг/см². В точке № 3 был установлен фотоупругий датчик, который показал такое же приращение напряжений.

Таким образом, было установлено, что опорные целики несут значительную нагрузку от пород налегающей толщи. Подсчет величины напряжений в них, исходя из веса вышележащих пород, распределенного между целиками и массивом окружающих выработанное пространство пород, показывает, что они должны быть в среднем около 77 кг/см². Из экспериментальных замеров следует, что фактические средние напряжения в целиках не менее 150 кг/см². Этот факт подтверждает предположение о том, что сбросы I и IX являются настолько слабыми, что нагрузка через них не передается на окружающий массив, и она сосредоточена на опорных целиках и на массиве пород по северо-восточной и юго-западной границам.

Следовательно, после удаления целиков подработанная толща пород будет представлять собой балку-стенку с высотой около 100 м и пролетом 220 м, опирающуюся на массив пород по северо-восточной и юго-западной границам, которая согласно аналитиче-

ским расчетам и результатам моделирования должна обрушиться под действием собственного веса.

Массовый взрыв опорных целиков полностью подтвердил правильность расчетов. Сразу же после взрывания целиков произошло обрушение поверхности в центральной части подработанной толщи на площади около 10 тыс. м², а примерно через 8 ч после взрыва поверхность обрушилась над блоком I на площади около 2 тыс. м². Трещины появились по всему контуру обрушаемой площади (см. рис. 41). Провалу поверхности по всей площади препятствовала руда взорванных целиков. В дальнейшем при ее выпуске наблюдалось опускание поверхности обрушенного участка.

В результате этого взрыва пустоты были ликвидированы и тем самым устранена угроза внезапных обрушений пород на больших площадях и шахта приступила к нормальной работе по дальнейшей разработке месторождения.

Таким образом, применение методов частичной разгрузки и комплексного метода позволило определить на Покровском руднике напряжения горных пород в опорных целиках и установить степень нарушения сплошности налегающих пород тектоническими сбросами.

ВЫВОДЫ

Рассмотрение вопросов измерения напряжений в массиве крепких горных пород, изложение методов, методики и результатов этих измерений позволяют сделать некоторые общие выводы.

1. Для определения величины и закономерности изменения напряжений в массиве горных пород при разработке месторождения необходимо иметь большое число измерений за сравнительно короткое время, чтобы получить представление о проявлении горного давления и его влиянии на ведение горных работ.

2. Из существующих методов измерения величин и направлений напряжений в крепких горных породах в производственных условиях практическое применение нашли только методы разгрузки. Остальные же (геофизические, радиометрические, пьезоэлектрические и др.) находятся пока в стадии лабораторных и полупромышленных испытаний.

3. В существующих методах разгрузки измерение деформации горных пород производится с помощью магнитострикционных датчиков, тензометрических розеток, механических тензометров и за последнее время — с помощью фотоупругих покрытий и тензометров, которые, на наш взгляд, являются одними из перспективных.

4. Для определения степени устойчивости обнажений горного массива (кровли и стенок горных выработок) рекомендуется метод частичной разгрузки с наклейкой тензометрических датчиков и со съёмными тензометрами. Этот метод может с успехом применяться при изучении закономерности проявления горного давления и при определении напряжений в элементах металлической и бетонной крепи.

Предложенные формулы и номограммы позволяют быстро обрабатывать экспериментальные данные.

5. Определение напряженности в глубине горного массива рекомендуется производить методом полной разгрузки с использованием фотоупругих тензометров. Для нахождения величин и направлений главных нормальных напряжений предлагаются выведенные авторами расчетные формулы.

6. Для нахождения закономерности изменения напряжений в

крепких горных породах в процессе разработки месторождения предлагается применять комплексный метод, состоящий из разгрузки и фотоупругих датчиков. Определение приращений и абсолютных величин напряжений в горных породах авторы рекомендуют производить по выведенным ими формулам, позволяющим легко и быстро обрабатывать экспериментальные данные.

7. Изложенные методы измерений позволили на железных рудниках Среднего Урала установить закономерность проявления горного давления и найти способы управления им, благодаря которым повысились безопасность и эффективность подземной разработки железорудных месторождений.

8. Рекомендуемые методы измерения напряжений в крепких горных породах не претендуют на безупречность. Они, как и всякие другие методы, должны совершенствоваться по пути повышения надежности и точности измерений и в особенности снижения трудоемкости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Барковский В. М. Струнный тензометр типа ДС-3 для измерения поперечных деформаций скважин. Труды ВНИМИ, сб. 66, Л., 1966.
2. Барон Л. И. и др. Определение свойств горных пород. Госгортехиздат, М., 1962.
3. Батугин С. А., Шаманская А. Т. Исследование напряженного состояния массива горных пород методом разгрузки в условиях Таштагольского железорудного месторождения. «Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых», № 2, 1965.
4. Безухов Н. И. Сборник задач по теории упругости и пластичности. Госгеолтехиздат, М., 1957.
5. Безухов Н. И. Основы теории упругости, пластичности, ползучести. Изд-во «Высшая школа», М., 1961.
6. Богданов П. А. Методы и аппаратура, применяемые в Криворожском бассейне для измерения проявления горного давления. Сб. научных трудов НИГРИ, № 5. Госгортехиздат, М., 1962.
7. Борисенко С. Г., Гузченко В. Т. Определение напряжений в потолочине и днище методом разгрузки. «Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых», № 4, 1967.
8. Бугаенко С. Е. О точности определения на дисковых образцах оптико-механических характеристик материала для моделей поляризационно-оптического метода. В сб. «Поляризационно-оптический метод исследования напряжений». Изд-во «Наука», М., 1965.
9. Бугаенко С. Е., Купрякова Н. А., Пригоровский Н. И., Щеголевская Н. А. Материал для моделей поляризационно-оптического метода. В сб. «Поляризационно-оптический метод исследования напряжений». Изд-во «Наука», М., 1965.
10. Влох Н. П., Сашурин А. Д. и др. Проявления горного давления на Гороблагодатском руднике. «Горный журнал», № 6, 1967.
11. Влох Н. П., Мошинский Л. Г. и др. Ликвидация пустот на Покровском руднике. «Горный журнал», № 12, 1965.
12. Галушко П. Я. Результаты изучения напряженного состояния горных пород тензометрическими измерениями. Изв. высших учебных заведений, «Горный журнал», № 3, 1962.
13. Галушко П. Я. Метод лабораторного эталонирования при тензометрических измерениях. Научные доклады высшей школы, «Горное дело», № 2, 1959.
14. Динник А. Н. Распределение напряжений вокруг подземных горных выработок. Труды совещания по управлению горным давлением. Изд-во АН СССР, М., 1938.
15. Ефимов А. С., Морозов Б. А. Способ устранения краевого эффекта в оптически активном материале на основе эпоксидной смолы ЭД-6. «Заводская лаборатория», № 11, 1965.
16. Жовтяк А. С. Применение емкостных датчиков для исследования напряжений в горных породах. «Металлургическая и горнорудная промышленность», № 3, 1967.
17. Иливицкий А. А., Сашурин А. Д. Определение величины и направления главных нормальных напряжений методом частичной разгрузки. В сб. «Вопросы горного давления», вып. 20. Изд-во СО АН СССР, 1964.
18. Кокер Э., Файлон Л. Оптический метод исследования напряжений. ОНТИ, Л.—М., 1936.
19. Кузнецов Г. Н. Механические свойства горных пород. Углетехиздат, М., 1947.
20. Кузнецов С. Т., Бублик Ф. П., Иванов Г. А. Результаты определения напряжений в целиках методом разгрузки на шахте «Полысаевская-Северная». Труды ВНИМИ, сб. 12, Л., Издание ВНИМИ, 1962.
21. Кутепов В. М. Опыт определения напряженного состояния в массиве метаморфических пород створа Саяно-Шушенской ГЭС. «Гидротехническое строительство», № 1, 1965.
22. Кутепов В. М. Результаты изучения естественных напряжений в массивах трещиноватых пород горных склонов. Вестн. МГУ, серия IV, геология № 6, 1966.
23. Лейбензон А. С. Курс теории упругости. ОГИЗ — Гостехиздат, М.—Л., 1947.
24. Мусхелишвили Н. И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. Изд-во «Наука», 1966.
25. Нестеренко Г. Т. Методы и приборы, разработанные рудной лабораторией для исследования сдвижения горных пород и проявлений горного давления. Труды ВНИМИ, сб. 66, Л., Издание ВНИМИ, 1966.
26. Нестеренко Г. Т., Твердовский Р. К., Артемов Р. П. Совершенствование метода разгрузки для определения напряжений в крепких трещиноватых породах, Труды ВНИМИ, сб. 62, Л., Издание ВНИМИ, 1966.
27. Нестеренко Г. Т. Методика и некоторые результаты исследования параметров камерно-столбовой системы разработки. В сб. «Методы определения размеров опорных целиков и потолочин». Изд-во АН СССР, М., 1962.
28. Оппель Г. Оптические упругие наклеиваемые тензометры. В сб. «Проблемы прочности в машиностроении», вып. 8. Изд-во АН СССР, М., 1962.
29. Перри К., Лиснер Г. Основы тензометрирования. Изд-во иностр. лит., М., 1957.
30. Романов В. А. Теория ошибок и способ наименьших квадратов. Углетехиздат, М., 1952.
31. Рудаков М. Л., Сашурин А. Д. Измерение напряжений методом частичной разгрузки. Труды ИГД, вып. 6, Свердловск, 1963.

32. Ружга З. Электрические тензометры сопротивления. Изд-во «Мир», М., 1964.
33. Руппелейт К. В. Физико-механические свойства горных пород. Углетехиздат, М., 1954.
34. Рыжов П. А., Борщ-Компанеев В. И., Ильин А. И. Опыт измерения напряжений внутри массива скальных пород методом разгрузки. В сб. «Усовершенствование техники буровзрывных работ и управление кровлей при подземных горных работах», изд. ВНИИЦветмет, М., 1963.
35. Сашурин А. Д., Влох Н. П., Зубков А. В., Царегородцев В. М. Фотоупругие датчики для измерения напряжений в массиве горных пород. Труды ИГД., вып. 12. Изд-во «Недра», 1966.
36. Сашурин А. Д., Влох Н. П., Зубков А. В. Измерение напряжений в горных породах оптическими датчиками. «Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых», № 3, 1967.
37. Слободов А. А. Методы и аппаратура, разработанные и применяемые ВНИИ при исследовании проявлений горного давления в шахтах и рудниках. В сб. «Вопросы горного давления», вып. 11. Изд-во СО АН СССР, 1962.
38. Слободов М. А. Опыт применения метода разгрузки при исследовании напряжений в глубине массива. «Уголь», № 7, 1958.
39. Талобр Ж. Механика горных пород. Госгортехиздат, М., 1960.
40. Терцаги К. Измерение напряжений в породах. «Проблемы инженерной геологии», сб. статей, М., 1964.
41. Трумбачев В. Ф., Молодцова Л. С., Катков Г. А. Применение метода фотоупругих покрытий в горном деле. В сб. «Проектирование и строительство угольных предприятий», ЦНИИТЭИУгля, М., 1963, № 4.
42. Трумбачев В. Ф., Катков Г. А. Измерение напряжений и деформаций методом фотоупругих покрытий. Изд-во «Наука», М., 1966.
43. Трумбачев В. Ф., Молодцова Л. С. Применение оптического метода для исследования напряженного состояния пород вокруг горных выработок. Изд-во «Наука», М., 1963.
44. Турчин А. М., Новицкий П. В. Проволочные преобразователи и их техническое применение. Госэнергоиздат, М., 1957.
45. Турчанинов И. А. Применение метода фотоупругости для исследования напряженного состояния горных пород и горного давления в натурных условиях. В сб. «Вопросы горного давления», вып. 13. Изд-во СО АН СССР, 1962.
46. Фрохт М. М. Фотоупругость. Т. I. ОГИЗ, М.—Л., 1948.
47. Экспресс-информация «Горнорудная промышленность», № 6 (реферат 26, «Измерение горного давления»), 1964.
48. Chakravarty P. K. Application of Photoelastic techniques for in situ Measurement of stress and Strain in Rock, «Sheffield Univ. Mining Mag.», 1963.
49. Everling G., Gesteinmechanische Untersuchung an Bohrkernen und bearbeiten Handstücken aus dem Flöz Girondelle und seinem Nebengestein auf der Schachtanlage Neumuhl, Glückauf, No. 13/14, 1956.
50. Galle E. M., Photo-Elastic Analysis of Stress near the bottom of a cylindrical cavity due to non symmetrical loading. M. Sc. Thesis, The Rice Institute, Houston, Texas, April, 1959.
51. Griswold G. B., How to measure rock pressures: new to — olds and proved techniques aid mine design, «Engng. and Mining J.», 164, No. 10, 1963.
52. Hast N., The measurement of rock pressure in Mines, Sveriges Geologiska undersökning, Arsbok, 52, 1958.
53. Hast N., Bergtrycksmätningar i gruvor Jernkontorets ann., 141, No. 10, 1957.
54. Hawkes J., Dhir R. K., Rose H., An application of photoelastic transducers to load measurement in building foundations, «Civil Engng. and Public Works Rev.», 59, No. 701, 1964.
55. Heim A. Mechanismus der Gebirgsbildung, Bale, 1878.
56. Hiromatsu J., Stress measurements in roofs, floors and pillars, «4-th Internat. Conf. Strata Control and Rock Mech.», N—Y, 1964.
57. Kirsch G., Die Theorie der Elastizität und die Bedürfnisse der Festigkeitslehre, «Zeitschrift d. VDJ», т. 42, 1898.
58. Leeman E. R., Rock stress measurements using the trepanning stress-relieving technique, «Mine and Quarry Engineering», 30, No. 6, 1964.
59. Leeman E. R., Remote measurement of rock stress under development in South Africa, «Engineering and Mining J.», No. 9, 1964.
60. Leeman E. R., The measurement of stress in rock, Part 1, 2, «J. South Afric. Inst. Mining and Metallurgy», 65, No. 2, 1964.
61. Mathar J., Ermittlung von Eigenspannungen durch Messung von Bohrlochverformungen, «Arch. für d. Eisenhütt.», H—7, 277 (1933).
62. Mohr F., Measurement of rock pressure, «Mine and Quarry Engineering», May, 1956.
63. Oppel G., Unmittelbar anzeigende polarisationsoptische Meßelemente für die Dehnung — und Spannungsanalyse an Bauteilen, «VDJ — zeitschrift», Bd. 101, No. 20, 1959.
64. Roberts A., Hawkes J., The application of photoelastic devices for measuring strata pressures and support loads, «Mine and Quarry Engng.», v. 29, No. 9, 1963.
65. Roberts A., Emery C. L., Hawkes J., Williams F. T., Chakrawarty P. K., Photoelastic Coating Technique Applied to Research in Rock Mechanics, «Trans. Inst. Min. Met.», v. 71, 1962.
66. Roberts A., Hawkes J., Williams F. T., Murrell S. A. F., Determination of the strength of rock in situ, «Consult. Engr.», 26, No. 1, 1964.
67. Roberts A., Hawkes J., Williams F., Dhir R., A laboratory study of the photoelastic stressmeter, «International Journal rock Mechanic and Mining Sciences», vol. 1, 1964.
68. Tincelin E., Pressions et Deformations de Terrain dans les Mines de Fer de Lorraine, Paris, 1957.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	
Глава I. Измерение напряжений на обнаженных поверхностях крепких горных пород методом частичной разгрузки	
1. Сущность методов измерений	
2. Метод частичной разгрузки с наклейкой тензометрических датчиков	
3. Измерение напряжений методом частичной разгрузки со съёмными тензометрами	
4. Условия применения и задачи, решаемые методом частичной разгрузки	
Глава II. Измерение напряжений горных пород в глубине массива методом полной разгрузки с фотоупругими тензометрами	
1. Сущность и существующие методы измерения напряжений в глубине горного массива	
2. Сущность метода полной разгрузки в глубине горного массива с применением фотоупругих тензометров	
3. Аналитическая зависимость между разностью хода поляризованного света в тензометре и величиной главных нормальных напряжений в породе	
4. Свойства фотоупругих тензометров	
5. Измерение напряжений и обработка экспериментальных данных	
6. Вопросы, решаемые методом полной разгрузки в глубине горного массива и перспективы его дальнейшего применения	
Глава III. Измерение напряжений в массиве горных пород во времени	
1. Существующие методы измерения напряжений, изменяющихся во времени	
2. Сущность комплексного метода измерения напряжений	
3. Фотоупругие датчики	
4. Вывод формул для определения приращений напряжений	
5. Методика измерения напряжений во времени и обработка экспериментальных данных	
6. Вопросы, решаемые комплексным методом измерения напряжений	
Глава IV. Измерение напряжений в горных породах при исследовании горного давления на железных рудниках Урала	
1. Исследование закономерностей проявления горного давления на Гороблагодатском руднике	
2. Исследование напряженного состояния рудного массива при разработке Высокогорского месторождения	
3. Исследование напряженного состояния целиков на Покровском руднике	
Выводы	111
Литература	116
	120

Влох Николай Петрович
Сашурин Анатолий Дмитриевич

ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В МАССИВЕ КРЕПКИХ ГОРНЫХ ПОРОД

Редактор издательства Э. Н. Чернегова

Техн. редактор В. В. Соколов
Корректор В. П. Крымов

Подписано в набор 17/III 1970 г. Подписано в печать 26/VI 1970 г. Т-090
Формат 60×90¹/₁₆ Печ. л. 7,75 Уч.-изд. л. 7,82 Бумага № 2 Индекс 1-
Заказ 841/3275-9 Тираж 1700 экз. Цена 39 коп.

Издательство «Недра». Москва, К-12, Третьяковский проезд, д. 1/19.
Московская типография № 6 Главполиграфпрома
Комитета по печати при Совете Министров СССР.
Москва, Ж-88, 1-й Южно-портовый пр., 17.

39 коп.

НЕДРА - 1970