

622.83

П 85

Г. И. ГРИЦКО, Г. И. КУЛАКОВ

ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ ФОТОУПРУГИМИ ДАТЧИКАМИ



2005.

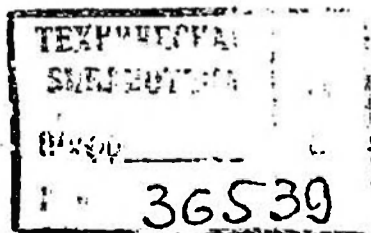
622.83
185

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ИНСТИТУТ ГОРНОГО ДЕЛА

Г. И. ГРИЦКО, Г. И. КУЛАКОВ

ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ ФОТОУПРУГИМИ ДАТЧИКАМИ

Ответственный редактор
чл.-кор. АН СССР Е. И. Шемякин



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
Новосибирск · 1978

УДК 622.831

Грицко Г. И., Кулаков Г. И. Измерение напряжений в горных породах фотоупругими датчиками. Новосибирск, «Наука», 1978. 144 с.

В книге описан новый метод исследования напряженного состояния преимущественно осадочных горных пород. Приведена теория фотоупругих датчиков, выполнен анализ особенностей оптической картины в них. Рассмотрены конструкции фотоупругих датчиков и полярископов. Подробно изучены вопросы измерения тензоров напряжений в условиях плоского и объемного напряженного состояния массива горных пород. Описаны способы и результаты лабораторных и шахтных исследований работы датчиков в различных породах и материалах.

Работа предназначена для научных и инженерно-технических работников научно-исследовательских организаций, горных и строительных предприятий, занимающихся изучением и контролем напряженно-деформированного состояния горных пород и бетонных сооружений, будет полезна преподавателям и студентам горных и строительных вузов.

Ил. 34, табл. 16, библи. 40.

ВВЕДЕНИЕ

При изучении поведения и свойств горных пород вблизи выработок одной из задач является разработка и внедрение простых и эффективных способов измерения всех компонент тензоров напряжений и деформаций в горных породах. Этим требованиям в наибольшей степени удовлетворяют датчики из оптически чувствительных материалов, выполненные в виде кольцевого диска или цилиндра с осевым отверстием небольшого диаметра, которое служит концентратором напряжений. Использование такого датчика основано на особенности оптической картины вокруг малого кругового отверстия, состоящей в том, что ее узор зависит от величины и соотношения главных напряжений в исследуемом материале и имеет две оси симметрии, совпадающие с направлениями этих напряжений. Датчики являются двухосными приборами и, будучи прикрепленными по своему внешнему круговому контуру к исследуемому телу, дают информацию о плоском тензоре напряжений или деформаций (в зависимости от соотношения упругих постоянных породы и материала датчика) в плоскости, нормальной к оси прибора.

При измерениях напряжений и деформаций в горных породах применяются два типа указанных датчиков: кольцевые фотоупругие тензометры и скважинные фотоупругие датчики.

Простейший датчик первого типа представляет собой диск толщиной 2—3 мм, изготовленный из оптически чувствительного материала, обычно из отвержденных эпоксидных смол или органического стекла. По внешнему краю диск имеет утолщение, а в центре — осевое отверстие, играющее роль концентратора напряжений. С одной стороны диск покрывается зеркальным слоем и по утолщенному внешнему контуру приклеивается к плоским поверхностям исследуемого тела, в том числе к плоским забоям скважин. Эти датчики служат для измерения деформаций. Переход к напряжениям осуществляется по формулам теории упругости.

Кольцевые фотоупругие тензометры впервые предложены в 1937 г. в США Г. Оппелем [1]. Работа таких тензометров подробно рассмотрена также в монографии В. Ф. Трумбачева и Г. А. Каткова [2].

Исследования тензометров для измерения напряжений на стенках горных выработок проводились в Англии под руководством А. Робертса [3]. Значительный объем экспериментальных и теоретических исследований кольцевых фотоупругих тензометров для измерения напряжений в крепких горных породах методом разгрузки выполнен в ИГД Министерства черной металлургии (г. Свердловск) [4, 5].

Простейший скважинный фотоупругий датчик представляет собой цилиндр с осевым отверстием, изготовленный из оптически чувствительного стекла. Скважинный фотоупругий датчик отличается от кольцевого фотоупругого тензометра большей толщиной и способом установки. В отличие от фотоупругих тензометров, которые приклеиваются к плоским поверхностям исследуемого объекта, фотоупругий датчик устанавливается в скважине, пробуренной в горной породе, и крепится к ее боковым стенкам с помощью клея или цемента. Фотоупругий датчик впервые предложен японскими изобретателями Нива и Нишида в 50-х годах [6]. Первые теоретические исследования скважинного фотоупругого датчика (в дальнейшем этот датчик будем называть фотоупругим датчиком) выполнены в Киотском университете (Япония) под руководством И. Хирамицу [6, 7]. Здесь рассмотрена работа датчика в условиях плоского напряженного состояния, для одного частного случая проанализирован вид оптической картины в датчике в условиях двухосного сжатия, а также высказаны соображения о возможности использования фотоупругих датчиков из стекла для измерения напряжений в осадочных горных породах и бетонной крепи. Здесь же выполнены первые лабораторные и шахтные исследования работы фотоупругих датчиков.

Несколько позднее, но в большем объеме, лабораторные и шахтные исследования проведены в Шеффилдском университете под руководством А. Робертса [8—11]. Предложенный в Шеффилдском университете фотоупругий датчик снабжен встроенным источником света и предназначен для установки в скважинах глубиной до 6 м.

Используя решение И. Хирамицу, К. Баррон [12], а позднее И. Хакес и Г. Филлерс [13] рассмотрели влияние модуля упругости и коэффициента Пуассона исследуемой среды, а также величины отношения измеряемых главных напряжений на показания датчика.

Измерения фотоупругими датчиками напряжений в горных породах проводились также в США, Канаде, Южно-Африканской Республике, Бельгии, Индии и др. В нашей

стране такие работы ведутся в ИГД МЧМ СССР (г. Свердловск) [5, 14, 15], Горно-металлургическом институте Кольского филиала АН СССР [16], ВостНИГРИ [17], ИГД СО АН СССР [18—20] и ряде других научно-исследовательских организаций.

В ИГД МЧМ СССР фотоупругие датчики применяются для измерения напряжений в крепких скальных породах на рудниках Урала [14]. Используемый в этих исследованиях датчик представляет собой диск с осевым отверстием, изготовленный из оптического стекла марки К8. Внешний диаметр датчика 35 мм, внутренний 5 мм, толщина 10 мм. Датчик устанавливается в торце скважины на песчано-цементном растворе. Для защиты от повреждений отражающий зеркальный слой датчика покрывается слоем краски или отвержденной эпоксидной смолы. Чтобы исключить сцепление бетона с датчиком по его задней торцевой поверхности, последняя иногда дополнительно покрывается слоем воска. Для описания взаимодействия фотоупругого датчика с породным массивом предложено использовать решение задачи об упругом кольцевом включении в однородной изотропной пластине, полученное Г. Н. Савиным [21].

В основу настоящей работы положены проведенные в ИГД СО АН СССР теоретические и экспериментальные исследования по измерению напряжений в осадочных горных породах и углях только с помощью скважинных фотоупругих датчиков. Были также использованы материалы, опубликованные в отечественной и зарубежной печати.

В проведении ряда теоретических и экспериментальных исследований принимали участие канд. техн. наук Д. П. Селук, а при составлении программ для расчетов на ЭВМ — инженер Е. Т. Ендропова, которым авторы выражают свою признательность.

Глава I

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДА ФОТОУПРУГИХ ДАТЧИКОВ

§ 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ ФОТОУПРУГИМИ ДАТЧИКАМИ

В основе метода фотоупругих датчиков лежит, с одной стороны, эффект фотоупругости, с другой — свойство контактирующих твердых тел, в том числе материала датчика и горных пород, совместно деформироваться при изменении воздействия внешних сил.

Эффект фотоупругости — это свойство некоторых изотропных прозрачных материалов приобретать временное двойное лучепреломление при нагружении, т. е. становиться оптически анизотропными. Материалы, обладающие таким свойством, называются оптически чувствительными (стекло, целлулоид, некоторые виды органического стекла, отвержденные эпоксидные смолы, игдантин, агар-агар и др.).

Двулучепреломление — это свойство оптически анизотропных тел разлагать луч света, проходящий через них в определенных направлениях, на два плоскополяризованных луча со взаимно перпендикулярными направлениями колебания световой волны. В теории поляризованного света один из этих лучей называется обыкновенным, второй — необыкновенным. Скорости распространения этих лучей в оптически чувствительном материале различны, причем приобретаемая ими разность хода при прохождении через оптически чувствительный материал, находящийся под нагрузкой, пропорциональна разности главных напряжений, действующих в этом материале в плоскости, нормальной к направлению распространения световой волны. [22]

$$\Gamma = Cd(\sigma_1 - \sigma_2), \quad (1.1)$$

где Γ — разность хода лучей света, мкм; C — оптическая постоянная материала по напряжениям, мкм·см/кгс; $\sigma_1 - \sigma_2$ — разность главных напряжений в материале, кгс/см²; d — длина пути света в оптически чувствительном материале, см.

Формула (1.1) выражает основной закон фотоупругости (закон Бертгейма), устанавливающий количественную связь

между оптическим эффектом и разностью главных напряжений [23]. Оптическая постоянная C зависит от физических свойств материала и длины волны применяемого света.

Учитывая, что $(\sigma_1 - \sigma_2) / 2 = \tau_{\max}$, разность хода лучей можно выразить через максимальные касательные напряжения:

$$\Gamma = 2Cd\tau_{\max} \quad (1.2)$$

При практическом использовании эффекта фотоупругости применяют поляризованный свет, т. е. такой свет, электромагнитные колебания которого упорядочены каким-либо образом. Если колебания света упорядочены так, что электрический вектор (с которым связывают свойства фотоупругости) электромагнитной волны колеблется в одной плоскости, то говорят о плоскополяризованном свете. Если электрический вектор совершает колебания по кругу, то говорят о круговой поляризации света. Возможен эллиптически-поляризованный свет.

Известны различные способы получения поляризованного света. Для получения плоскополяризованного света при поляризационно-оптических исследованиях применяют специальные поляризаторы, в качестве которых обычно используют поляроидные пленки (тонкая пленка из мельчайших кристалликов специального вещества — гепатита). Такие поляризаторы пропускают световые колебания только в плоскости колебаний. Плоскость, перпендикулярная плоскости колебаний, называется плоскостью поляризации. Если луч света пропустить через один поляроид, называемый поляризатором, а затем через второй, называемый анализатором, и если плоскости поляризации обоих поляроидов параллельны, то свет, прошедший через первый поляроид, полностью пройдет через второй. Это схема со светлым полем. Если плоскости поляризации поляроидов взаимно перпендикулярны (скрещенные поляроиды), то получается полное гашение света — схема с темным полем. В случае расположения плоскостей поляризации под каким-либо углом, отличным от нуля или прямого, свет пройдет частично. Источник света и две поляроидные пластинки, одна из которых, расположенная ближе к источнику света, играет роль поляризатора, а вторая — роль анализатора, образуют простейший поляризационный прибор — плоский полярископ.

Для получения света, поляризованного по кругу, используют два поляроида и две четвертьволновые пластинки. Последние устанавливают между поляроидами и ориентируют их оптические оси под углом 45° к оптическим осям поляроидов. Полярископ, состоящий из поляризатора, двух четвертьволновых пластинок и анализатора, называется круговым полярископом, или полярископом с круговой поляризацией.

Четвертьволновой называется пластинка из прозрачного материала, создающая разность хода лучей света в одну четверть длины волны. В качестве четвертьволновых чаще всего используют пластинки из слюды толщиной 0,027 мм при желтом свете и 0,025 мм — при зеленом. Первую из них обычно используют и при белом свете.

Если между скрещенными поляроидами поместить нагруженную модель из оптически чувствительного материала например фотоупругий датчик, нагруженный каким-либо усилием в плоскости, перпендикулярной его оси, то такой материал создаст дополнительную разность хода лучей, в результате часть света пройдет через анализатор. На этом основан поляризационно-оптический метод исследований и, в частности, его наиболее распространенная разновидность — метод фотоупругости.

Метод фотоупругости предполагает, что используется упругий оптически чувствительный материал, т. е. материал, связь между напряжениями и деформациями в котором описывается линейным законом Гука. Упругими являются такие широко распространенные оптически чувствительные материалы, как стекло, материал типа СД, отвержденные эпоксидные смолы и др.

§ 2. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ ПОЛЯРИСКОПОВ

Принципиальное устройство простейшего полярископа описано в предыдущем параграфе.

Полярископ — это прибор, действие которого основано на использовании свойств поляризованного света. Поляризационные приборы предназначены для измерения изменений оптических свойств изотропных прозрачных материалов, вызванных действующими в них напряжениями.

Основными узлами любого полярископа являются фильтр-поляризатор, предназначенный для получения поляризованного света, и фильтр-анализатор, предназначенный для анализа света, прошедшего через исследуемый объект. Фильтр-поляризатор состоит либо из одного поляроида в случае, когда необходимо получить плоскополяризованный свет, либо из поляроида и четвертьволновой пластинки, если необходима круговая поляризация. Аналогично фильтр-анализатор состоит из одного поляроида в случае плоского полярископа или из поляроида и четвертьволновой пластинки в случае кругового полярископа. Необходимой составной частью любого полярископа является также источник света. Последний может быть либо встроенным конструктивно в полярископ, либо самостоятельным. Используют источники как белого, так и монохроматического света. Кроме этих

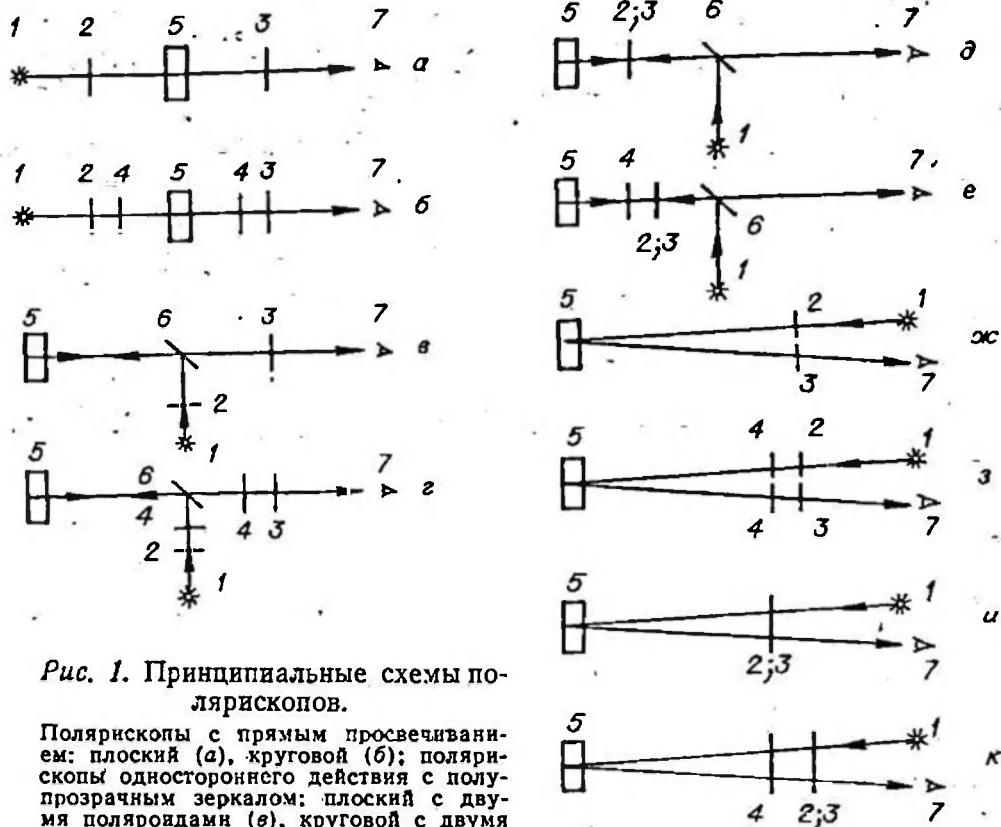


Рис. 1. Принципиальные схемы полярископов.

Полярископы с прямым просвечиванием: плоский (а), круговой (б); полярископы одностороннего действия с полупрозрачным зеркалом: плоский с двумя поляроидами (в), круговой с двумя поляроидами (г), плоский с одним поляроидом (д), круговой с одним поляроидом (е); полярископы одностороннего действия V-образного типа: плоский с двумя поляроидами (ж), круговой с двумя поляроидами (з), плоский с одним поляроидом (и), круговой с одним поляроидом (к). 1 — источник света; 2 — поляризатор; 3 — анализатор; 4 — четвертьволновые пластинки; 5 — фотоупругий датчик (модель); 6 — полупрозрачное зеркало; 7 — глаз наблюдателя.

трех основных элементов в полярископы часто включают линзы, зеркала, компенсаторы. Последние предназначены для повышения точности измерений. Из механических элементов полярископов наиболее важны отсчетные шкалы.

При поляризационно-оптических исследованиях свет либо проходит через объект, и тогда говорят о работе в проходящем свете, либо одна из сторон исследуемого объекта покрыта зеркальным слоем, и тогда говорят о работе в отраженном свете. Соответственно в методе фотоупругих датчиков различают датчики, работающие в проходящем свете, и датчики, работающие в отраженном свете.

Для наблюдения объектов в проходящем свете используются полярископы с прямым просвечиванием (полярископы проходящего света), для наблюдения объектов в отраженном свете — полярископы одностороннего действия (полярископы отражательного типа).

Схемы полярископов с прямым просвечиванием приведены на рис. 1, а, б. Исследуемый объект 5 в обеих схемах

располагается между поляризационными фильтрами, а все элементы полярископа — вдоль прямой линии. Полярископы, работающие по этой схеме, используются при наблюдении фотоупругих датчиков, работающих в проходящем свете. В этой схеме свет проходит через объект наблюдения один раз.

Для наблюдения фотоупругих датчиков отражательного типа применяются две разновидности полярископа одностороннего действия: с полупрозрачным зеркалом и V-образного типа.

В полярископах с полупрозрачным зеркалом источник света располагается сбоку от линии наблюдения. В схемах полярископов, приведенных на рис. 1, в, г, луч света от источника проходит через фильтр-поляризатор и попадает на полупрозрачное зеркало б, расположенное под углом 45° к направлению света. Частично преломившись и отразившись от пластинки, свет попадает в датчик 5. Отразившись от задней зеркальной стенки датчика, свет снова попадает на полупрозрачную пластинку, при этом часть его проходит через пластинку в фильтр-анализатор и далее к наблюдателю.

Возможен полярископ с одним поляризационным фильтром. Схема плоского полярископа с полупрозрачным зеркалом и одним фильтром приведена на рис. 1, д. Этот полярископ работает по параллельной схеме при светлом поле. На рис. 1, е изображена схема кругового полярископа с полупрозрачным зеркалом и одним фильтром. Как нетрудно видеть, этот полярископ работает только на темном поле, т. е. при отсутствии оптической анизотропии в объекте наблюдения свет через этот полярископ не проходит — полностью гасится.

В полярископах V-образного типа оба фильтра располагаются рядом в одной плоскости, причем между лучом света, идущим от источника света к объекту наблюдения, и лучом света, идущим от объекта наблюдения к наблюдателю, имеется некоторый угол, величина которого для данного полярископа определяется расстоянием от полярископа до объекта наблюдения. В методе фотоупругих датчиков это расстояние может составлять от 20—30 см до нескольких метров. При расстоянии от полярископа до датчика 20—30 см угол между указанными лучами может достигать $10\text{--}20^\circ$, но уже при расстоянии 1 м этот угол уменьшается до $2\text{--}3^\circ$ и им практически можно пренебречь.

Схемы V-образного полярископа с двумя фильтрами показаны на рис. 1, ж (плоский) и 1, з (круговой). В качестве простейшего полярископа V-образного типа можно использовать один поляризатор — рис. 1, и (параллельная схема при светлом поле) или поляризатор и четвертьволновую пластинку — рис. 1, к (параллельная схема при темном поле).

В схемах *a*—*г*, *ж*, *з* (рис. 1) оптические оси поляризатора 2 и анализатора 3 могут быть установлены либо параллельно, либо скрещенно. При параллельной установке поляризатора и анализатора в схемах *a*, *в*, *ж* будет светлое поле, при скрещенных — темное. В схемах с круговой поляризацией нахождение света дополнительное влияние оказывают четвертьволновые пластинки.

В круговом полярископе происходит следующее:

1) поляризатор превращает обычный свет в плоскополяризованный;

2) первая четвертьволновая пластинка преобразует плоскополяризованный свет в поляризованный по кругу;

3) вторая четвертьволновая пластинка восстанавливает свет, поляризованный по кругу, в плоскополяризованный с колебаниями в первоначальной плоскости, если оптические оси первой и второй четвертьволновых пластинок скрещены, или в плоскости, повернутой на 90° к первоначальной, если оптические оси четвертьволновых пластинок параллельны;

4) анализатор задерживает или пропускает плоскополяризованный свет в соответствии с тем, какое поле, темное или светлое, требуется создать.

Математический аппарат описания явлений, происходящих в полярископе, довольно громоздок, поэтому здесь ограничимся рассмотрением простейшего случая (рис. 1, *a*).

Оптическая схема плоского полярископа проходящего света, включающая источник монохроматического света, поляризатор, анализатор и исследуемую модель (датчик), изображена на рис. 2.

Будем считать, что плоскость колебаний поляризатора направлена вертикально и совпадает с плоскостью колебаний плоскополяризованного луча A_1 , вышедшего из поляризатора, а плоскость колебаний анализатора направлена горизонтально. Предположим, что модель нагружена так, что направление одного из главных напряжений, действующих в ней, образует угол θ с горизонталью. Поскольку главные

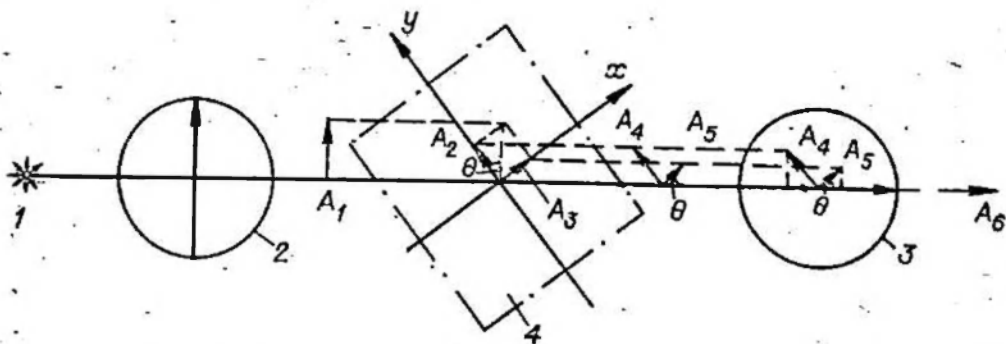


Рис. 2. Преобразование света в плоском полярископе.

1 — источник света; 2 — поляризатор; 3 — анализатор; 4 — модель (x , y — главные оси).

оптические оси оптически анизотропного материала при временном двулучепреломлении совпадают с направлениями главных напряжений в этом материале, то в рассматриваемой модели направления главных оптических осей x и y будут совпадать с направлениями главных напряжений σ_1 и σ_2 в ней. Примем, что под углом θ к горизонтали наклонена оптическая ось x .

Уравнение плоскополяризованного луча A_1 можно записать в виде [24]

$$A_1 = a \sin \omega t, \quad (1.3)$$

где a — амплитуда, ω — угловая скорость, t — время.

При прохождении через нагруженную модель (такая модель находится в состоянии временного двулучепреломления) луч A_1 разлагается на две составляющие (см. рис. 2):

$$A_2 = a \cos \theta \sin \omega t, \quad (1.4)$$

$$A_3 = a \sin \theta \sin \omega t.$$

Здесь θ — угол между направлением одного из главных напряжений в модели и горизонтальной осью. Из опыта известно, что эти составляющие выходят из нагруженной пластинки с некоторой угловой разностью фаз α , так что

$$A_4 = a \cos \theta \sin \omega t, \quad (1.5)$$

$$A_5 = a \sin \theta \sin(\omega t + \alpha).$$

Угловая разность фаз α связана с разностью хода Γ зависимостью

$$\Gamma = \alpha \lambda / 2\pi, \quad (1.6)$$

где λ — длина волны света. Учитывая (1.1), можно записать:

$$\alpha = (2\pi/\lambda) C d (\sigma_1 - \sigma_2). \quad (1.7)$$

Через анализатор пройдут только горизонтальные составляющие колебаний A_4 и A_5 . Выходящий из анализатора луч описывается уравнением

$$A_6 = A_5 \cos \theta - A_4 \sin \theta = b \cos(\omega t + \alpha/2), \quad (1.8)$$

где $b = a \sin 2\theta \sin(\alpha/2)$ — амплитуда выходящего луча.

Из оптики известно, что интенсивность света пропорциональна квадрату амплитуды:

$$I = k a^2 \sin^2 2\theta \sin^2(\pi \Gamma / \lambda), \quad (1.9)$$

где k — коэффициент пропорциональности. Из последнего выражения видно, что освещение оптической картины будет неравномерным. Максимальная интенсивность света будет наблюдаться в следующих случаях:

$$а) \Gamma = \lambda(2n+1)/2, \quad n=0, 1, 2 \dots, \quad (1.10)$$

т. е. когда разность хода лучей равна нечетному числу полуволн:

$$б) \theta = \pi(2k+1)/4, \quad k=0, 1, 2 \dots, \quad (1.11)$$

т. е. когда угол между плоскостью колебаний поляризатора и направлением одного из главных напряжений в модели составляет 45° .

Гашение света (темнота) будет наблюдаться в данной точке модели в следующих случаях:

$$а) \theta = \pi n/2, \quad n=0, 1, 2, \dots, \quad (1.12)$$

т. е. когда плоскость поляризации (в нашем случае горизонтальная плоскость) совпадает с направлением одного из главных напряжений или составляет с ним угол 90° ;

$$б) \Gamma = n\lambda, \quad n=1, 2, 3, \dots, \quad (1.13)$$

т. е. когда разность хода лучей равна целому числу волн;

$$в) \Gamma = 0, \dots \quad (1.14)$$

в этом случае, в соответствии с (1.1), имеем либо $\sigma_1 = \sigma_2$, либо $\sigma_1 = \sigma_2 = 0$.

Таким образом, в монохроматическом свете при наблюдении с помощью плоского полярископа в нагруженном датчике будет виден ряд темных и светлых полос, связанных с распределением напряжений в нем [23].

Полагая в выражении (1.12) $n=0, 1, 2, 3$, получаем $\theta=0, 90, 180$, и 270° . Если $\theta=0$ и 90° (два других случая сводятся к предыдущему), то при скрещенных поляризаторе и анализаторе в плоском полярископе в данной точке датчика направления главных напряжений σ_1 и σ_2 совпадают с направлениями плоскостей поляризации и в этой точке наблюдается затемнение. Темные линии, соединяющие точки, в которых направления главных напряжений одинаковы, называются изоклинами. Угол наклона φ плоскости поляризации прибора к фиксированной оси x называется параметром изоклины. Если датчик оставить неподвижным, а поляризатор и анализатор синхронно вращать от 0 до 90° , то для каждого зна-

чения угла будут наблюдаться изоклины со своим значением параметра φ .

Для разности хода Γ существуют выражения (1.10), (1.13) и (1.14). Рассмотрим вначале два первых.

В точках датчика, где $\Gamma = n\lambda$, $n = 1, 2, 3, \dots$ имеем погасание света, в точках, где $\Gamma = \lambda(2n+1)/2$, $n = 1, 2, 3, \dots$ имеем наибольшую интенсивность света. Следовательно, наблюдаемые в датчике при монохроматическом свете темные и светлые полосы являются геометрическим местом точек с одинаковой разностью хода. В соответствии с выражением (1.2) точки с одинаковой оптической разностью хода лучей соответствуют точкам с одинаковыми максимальными касательными напряжениями. Таким образом, описанные полосы являются геометрическим местом точек с одинаковыми максимальными касательными напряжениями. Эти полосы называются изохромами.

При совместном повороте анализатора и поляризатора изохромы не меняют своего положения, остаются на месте.

Рассмотрим, наконец, случай $\Gamma = 0$. Точки, для которых $\Gamma = 0$ и выполняется условие $\sigma_1 = \sigma_2$, называются особыми (изотропными). При совместном повороте анализатора и поляризатора эти точки остаются темными и не меняют своего положения. Через них проходят изоклины всех параметров. Точки, для которых выполняется условие $\sigma_1 = \sigma_2 = 0$, называются простыми. Эти точки также остаются темными и не меняют своего положения при совместном повороте поляризатора и анализатора.

При просвечивании модели белым светом (белым называется свет, состоящий из лучей всех длин волн) условие (1.11) для θ остается неизменным для всех длин волн, так как не зависит от длины волны λ , условие же (1.13) для Γ выполняется в каждой точке только для одной определенной длины волны λ , все остальные колебания проходят с той или иной интенсивностью через анализатор. Поэтому в датчике при наблюдении его в белом свете изоклины останутся темными, а вместо темных полос будут видны цветные.

В методе фотоупругих датчиков обычно пользуются картиной изохром, изоклины же затемняют оптическую картину в датчике, затрудняя ее наблюдение и расшифровку.

Для устранения изоклин в оптической картине применяют круговые поляризаторы. Четвертьволновая пластинка, установленная под углом 45° к плоскости поляризации, разлагает падающий на нее плоскополяризованный луч на два луча со взаимно перпендикулярными плоскостями колебаний и с равными амплитудами, т. е. преобразует плоскополяризованный свет в поляризованный по кругу в определенном направлении.

Вторая четвертьволновая пластинка вызывает круговую поляризацию обратного знака. Следовательно, в круговом полярископе на анализатор попадают лучи света с той разностью хода, которую они приобретают в модели, так как влияние четвертьволновых пластинок взаимно компенсируется.

Пользуясь методикой, изложенной для плоского полярископа, можно показать, что для кругового полярископа уравнение колебаний световой волны, выходящей из анализатора, будет иметь вид

$$A = a \sin(\alpha/2) \cos(\omega t + 2\theta - \alpha/2). \quad (1.15)$$

Соответственно интенсивность выходящего света

$$I = ka^2 \sin^2(\pi\Gamma/\lambda). \quad (1.16)$$

Максимальная интенсивность света будет при

$$\Gamma = \lambda(2n+1)/2, \quad n=0, 1, 2, 3, \dots,$$

условие гашения света запишется в виде

$$\Gamma = n\lambda, \quad n=0, 1, 2, \dots$$

Два последних условия совпадают с условиями (1.10), (1.13) и (1.14) для плоского полярископа.

Из выражения (1.16) следует, что в круговом полярископе условие, аналогичное условию (1.12), не имеет места, т. е. в круговом полярископе отсутствуют условия для образования изоклин. Поэтому круговой полярископ дает только картину полос (изохром): при монохроматическом свете — чередование белых и черных полос, при белом — цветную картину полос.

§ 3. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗНОСТИ ХОДА ЛУЧЕЙ И ПОРЯДКА ПОЛОСЫ

В собственно поляризационно-оптическом методе непосредственно из эксперимента определяют разность главных напряжений в плоскости модели по измеренной разности хода в той или иной точке модели и направление этих напряжений по картине изоклин. Затем расчетным путем, используя дифференциальные уравнения равновесия упругого тела, находят величину главных напряжений (или деформаций).

В методе фотоупругих датчиков величина и направление главных напряжений в датчике не представляют интереса и их не определяют. Целью этого метода является определение величины и направления главных напряжений в горной породе в месте установки датчика. Как будет показано в следующей главе, для этого достаточно найти разность хода лучей или порядок полосы в одной или нескольких точках оптической картины в датчике и направление осей симметрии этой картины.

Для определения разности хода или порядка полосы в датчике можно применять различные методы, используемые в поляризационно-оптических исследованиях [2, 22, 23].

Метод сопоставления цветов. При наблюдении фотоупругого датчика с помощью полярископа в белом свете видна цветная картина изохром. Сопоставляя наблюдаемые цвета изохром с интерференционными цветами колец Ньютона (табл. 1) [23], можно определить порядок полосы и соответствующую ей разность хода.

Увеличение нагрузки на датчик (разности главных напряжений в датчике) и соответственно увеличение разности хода лучей сопровождаются постепенной сменой цветов. Цвета появляются в такой последовательности: желтый, красный, фиолетовый, синий, зеленый. Если нагрузка продолжает увеличиваться, то цвета повторяются. Однако по мере перехода от одного порядка к другому происходит некоторое видоизменение цветов.

Все цвета между начальной темной окраской и первым зеленым относятся к цветам первого порядка, первый зеленый цвет относится ко второму порядку, и т. д. Наиболее ярко выражены цвета в первом, втором и третьем порядках, в последующих они постепенно бледнеют и почти совершенно исчезают. В датчиках из стекла наиболее яркой является красная полоса третьего порядка. Практически в датчиках нередко удается различать красный и зеленый цвета до 10—12 порядков.

Установив цвет и порядок полосы в данной точке датчика, по таблице цветов находят соответствующую разность хода. Описанный порядок появления цветов (см. табл. 1) имеет место при скрещенном полярископе и темном поле.

Метод полос отличается тем, что здесь подсчитывают порядок полосы в исследуемой точке. Обычно за полосу целого порядка удобно принимать изохрому красного цвета, тогда изохрома зеленого цвета соответствует половине полосы.

Подсчет целого числа полос на оптической картине в датчике не вызывает затруднений, если общее число полос не очень велико и в поле зрения присутствует полоса нулевого порядка. Это обычно темная, иногда красноватая полоса, расположенная вблизи внешнего контура датчика. Если

Таблица I

Разности хода, соответствующие различным цветам (скрещенный круговой полярископ с темным полем)

Порядок цветов (полос)	Погасший цвет	Дополнительный наблюдаемый цвет	Разность хода Г, мкм	
1	Все цвета	Черный	0	
		Желто-черный	50	
		Лавандово-серый	100	
		Серо-голубой	150	
		Серовато-белый	200	
		Белый	250	
		Фиолетовый	Светло-желтый	300
			Ярко-желтый	350
			Оранжево-желтый	400
		Голубой	Оранжевый	450
			Красно-оранжевый	500
Зеленый	Красный	550		
2	Желтый	Пурпуровый	565	
		Фиолетовый	575	
	Оранжевый	Индиго	590	
		Небесно-синий	665	
		Зеленовато-синий	730	
	Красный	Зеленый	750	
		Светло-зеленый	800	
		Желтовато-зеленый	850	
		Желтый	900	
		Оранжевый	950	
		Оранжево-красный	1000	
		Красный	1060	
	Фиолетово-красный		1100	
		Фиолетовый	1130	
	Желтый	Индиго	1150	
		Зеленовато-голубой	1250	
	Красный	Голубовато-зеленый	1330	
Ярко-зеленый		1380		
Зеленовато-желтый		1430		
Розово-красный		1500		
Карминово-красный		1530		
Пурпурово-карминовый		1620		
4		Фиолетово-серый	1650	
	Голубовато-серый	1680		
	Светло-зеленовато-голубоватый	1710		
	Синевато-зеленый	1750		
	Бледно-желто-зеленый	1810		
	Бледно-зеленоватый	1930		
	Бледно-красный	2000		
	5	Бледно-зеленый	2500	
Бледно-красный		3500		
6	Бледно-зеленый	4000		
	Бледно-красный	5000		
7	Бледно-зеленый	6500		

полоса нулевого порядка, отсутствует, что бывает при большом числе полос, то подсчет порядка полос затруднен. В этом случае можно попытаться установить порядок какой-либо изохромы, пользуясь методом сопоставления цветов и вести отсчет от этой изохромы.

Дробную часть порядка полосы можно оценивать на глаз по отношению расстояния от исследуемой точки до ближайшей яркой изохромы к общему расстоянию между двумя соседними изохромами одинакового цвета.

Все сказанное о методе сопоставления цветов и о методе полос относится к случаю использования полярископа, работающего на темное поле. Если полярископ настроен на светлое поле, то все отсчеты будут сдвинуты на половину длины волны. Вообще в круговом полярископе можно определить точки, в которых относительное запаздывание равно целому числу полуволн: тогда в этих точках порядок полос равен 0, 1, 2, 3 ... если полярископ настроен на темное поле, и 0,5; 1 1/2, 2 1/2 ..., если полярископ настроен на светлое поле.

Метод компенсации — наиболее точный метод определения разности хода лучей или суммы целого и дробного порядка полосы в исследуемой точке. В этом случае измерения производят с помощью полярископов, снабженных специальными оптическими устройствами-компенсаторами.

В полярископах для метода фотоупругих датчиков нашли применение компенсаторы типа Бабинне, Берека, а также способ компенсации методом Тарди.

Принцип измерения разности хода лучей компенсаторами типа Бабинне и Берека состоит в том, что к разности хода лучей, создаваемой моделью, добавляется компенсатором разность хода, равная по величине искомой, но обратная по знаку. В этом случае результирующая разность хода лучей равна нулю, и при темном поле полярископа наблюдается затемнение в измеряемой точке модели.

Компенсатор Бабинне состоит из двух кварцевых клиньев, оптические оси которых взаимно перпендикулярны (рис. 3). Один из клиньев закреплен неподвижно, а другой перемещается с помощью винта, так что общая толщина двух клиньев может меняться. Ход микрометрического винта градуируется либо в единицах относительной разности хода, выраженной в длинах волн используемого света, либо в целых и дробных порядках полос. Подробное описание работы компенсатора Бабинне можно найти в монографии [22].

В компенсаторе Берека переменная разность хода создается путем вращения кристаллической пластинки вокруг оси, лежащей в плоскости этой пластинки и перпендикулярной лучу [23]. Кристаллическая пластинка расположена таким образом, что при нормальном падении на нее света (нулевое

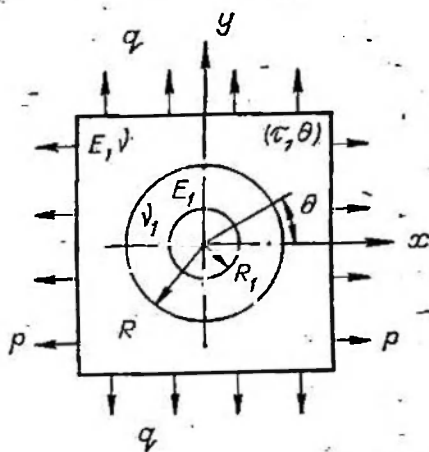
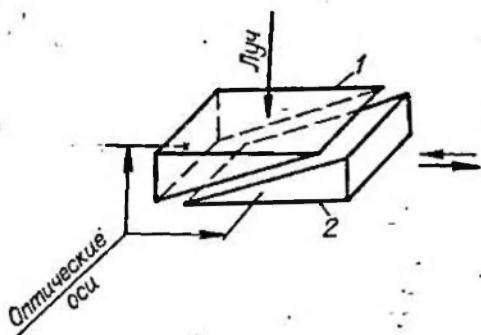


Рис. 3. Схема компенсатора Бабинне.

Рис. 4. Расчетная схема.

1 — неподвижный клин, 2 — подвижный.

деление) оптическая разность хода равна нулю. При ее вращении разность хода возрастает до некоторой величины, зависящей от пути прохождения луча через пластинку. Обычно такие компенсаторы рассчитаны на 4 порядка. Поворот пластинки осуществляется барабаном, на который наносится шкала.

Метод Тарди прост и удобен. Круговой полярископ ориентируется так, чтобы скрещенные оси поляризатора и анализатора были параллельны главным напряжениям в рассматриваемой точке, и затем отсчитывается целый порядок полосы в этой точке. После этого анализатор поворачивается против часовой стрелки до тех пор, пока в наблюдаемой точке не появится полоса целого порядка. Величина угла поворота анализатора будет пропорциональна дробному порядку полосы.

Если уравнение луча поляризованного света, вышедшего из поляризатора, записать в виде выражения (1.3) и проделать все тригонометрические преобразования, соответствующие прохождению луча через полярископ при наблюдении датчика в случае компенсации методом Тарди, то уравнение луча, вышедшего из анализатора, запишется в виде

$$A = -a \sin(\omega t \pm \alpha/2) \sin(\beta \pm \alpha/2). \quad (1.17)$$

Здесь, как и ранее, α — угловая разность фаз, β — угол поворота анализатора в процессе компенсации. Условие компенсации запишется в виде

$$\sin(\beta \pm \alpha/2) = 0, \quad (1.18)$$

т. е. компенсация имеет место при повороте анализатора против часовой стрелки на угол $\alpha/2$.

Из (1.18) следует:

$$\alpha = 2k\pi + 2\beta, \quad k = 0, 1, 2, \dots, \quad (1.19)$$

а относительная разность хода, или порядок полосы, будет

$$n = \alpha/2\pi = k + \beta/\pi. \quad (1.20)$$

Целая часть k определяется подсчетом целых порядков полос при установке анализатора в первоначальное положение т. е. при $\beta = 0$.

Из выражения (1.20) следует, что шкалу удобно наносить на половине окружности в десятичных единицах (а не в градусах). Обычно на половине окружности наносят 100 делений.

ТЕОРИЯ РАБОТЫ ФОТОУПРУГОГО ДАТЧИКА
В УПРУГОЙ СРЕДЕ

§ 1. НАПРЯЖЕНИЯ В ФОТОУПРУГОМ ДАТЧИКЕ
И В ПОРОДЕ ВБЛИЗИ ДАТЧИКА

Рассматривая породный массив как упругую, однородную и изотропную среду и полагая, что материал датчика является упругим, однородным и изотропным, задачу о взаимодействии фотоупругого датчика с породным массивом можно рассматривать как плоскую задачу теории упругости о бесконечной пластинке, ослабленной круговым отверстием малого диаметра, подкрепленным упругим кольцом, спаянным со стенками скважины. В наиболее общем случае решение этой задачи получено Г. Н. Савиным [21].

Итак, пусть в упругом, однородном и изотропном породном массиве пробурена скважина радиусом R и в ней установлен и склеен с ее стенками фотоупругий датчик. Чтобы можно было использовать результаты решения плоской задачи, положим, что датчик устанавливается вдали от торца скважины, поэтому влияние последнего на распределение напряжений вблизи датчика не сказывается. Будем считать, что датчик склеен со стенками скважины, но толщина слоя клея бесконечно мала, так что наружный радиус датчика равен R и совпадает с радиусом скважины. Радиус внутреннего отверстия датчика R_1 .

После того, как клей затвердел и набрал расчетную прочность, к породному массиву вдали от скважины с датчиком прикладываются равномерно распределенные усилия p и q , действующие в двух взаимно перпендикулярных направлениях (рис. 4).

При сформулированных условиях напряжения в датчике и окружающей горной породе задаются следующими выражениями: в датчике ($R_1 \leq r \leq R$)

$$\begin{aligned} \sigma_{r1} &= (a_1 - b_{-1}R^2/2r^2)(p+q)/2 + (b_1/2 - 2a_{-1}R^2/r^2 - \\ &\quad - 3b_{-3}R^4/2r^4)(\cos 2\theta)(p-q)/2, \\ \sigma_{\theta 1} &= (a_1 + b_{-1}R^2/2r^2)(p+q)/2 - (b_1/2 - 6a_{-3}r^2/R^2 - \\ &\quad - 3b_{-3}R^4/2r^4)(\cos 2\theta)(p-q)/2, \end{aligned} \quad (2.1)$$

$$\tau_{r\theta 1} = (\alpha_{-1} R^2 / r^2 - b_{-1} / 2 - \alpha_{-1} R^2 / r^2 - 3\beta_{-3} R^4 / 2r^4) \times \\ \times (\sin 2\theta) (p - q) / 2;$$

в породе ($r \geq R$)

$$\begin{aligned} \sigma_r &= (1 - \beta_{-1} R^2 / 2r^2) (p + q) / 2 + (1 - 2\alpha_{-1} R^2 / r^2 - \\ &\quad - 3\beta_{-3} R^4 / 2r^4) (\cos 2\theta) (p - q) / 2, \\ \sigma_\theta &= (1 + \beta_{-1} R^2 / 2r^2) (p + q) / 2 - (1 - 3\beta_{-3} R^4 / 2r^4) \times \\ &\quad \times (\cos 2\theta) (p - q) / 2, \\ \tau_{r\theta} &= -(1 + \alpha_{-1} R^2 / r^2 + 3\beta_{-3} R^4 / 2r^4) (\sin 2\theta) (p - q) / 2, \end{aligned} \quad (2.2)$$

где σ_r , σ_{r1} — радиальные напряжения соответственно в породе и датчике; σ_θ , $\sigma_{\theta 1}$ — то же, тангенциальные (кольцевые); $\tau_{r\theta}$, $\tau_{r\theta 1}$ — то же, касательные; r , θ — текущие полярные координаты.

В формулах (2.1) и (2.2) коэффициенты задаются следующими выражениями:

$$\begin{aligned} \alpha_{-1} &= 2(1 + \kappa) [(G/G_1 - 1) + m^6 (1 + \kappa_1 G/G_1)] / D, \\ \alpha_1 &= m^2 (1 + \kappa) / \{2(G/G_1 - 1) - m^2 [(G/G_1 - 1) - \\ &\quad - (1 + \kappa_1 G/G_1)]\}, \\ \alpha_3 &= -2(1 + \kappa) m^4 (m^2 - 1) (G/G_1 - 1) / D, \\ \beta_{-3} &= -2(1 + \kappa) [(G/G_1 - 1) + m^4 (1 + \kappa_1 G/G_1)] / D, \\ \beta_{-1} &= 2(1 + \kappa) / \{2(G/G_1 - 1) - m^2 [(G/G_1 - 1) - \\ &\quad - (1 + \kappa_1 G/G_1)]\}, \\ \beta_1 &= 2 - 2(m^2 - 1) (1 + \kappa) / \{2(G/G_1 - 1) - m^2 [(G/G_1 - 1) - \\ &\quad - (1 + \kappa_1 G/G_1)]\}, \\ b_1 &= 2m^2 (1 + \kappa) [(G/G_1 - 1) (4 - 3m^2) + m^6 (1 + \\ &\quad + \kappa_1 G/G_1)] / D, \\ \alpha_{-1} &= 2 - 2(1 + \kappa) [(G/G_1 - 1) (3m^6 - 6m^4 + 4m^2 - 1) + \\ &\quad + m^6 (m^2 - 1) (1 + \kappa_1 G/G_1)] / D, \\ \beta_{-3} &= -2 + 2(1 + \kappa) [(G/G_1 - 1) (4m^6 - 7m^4 + 4m^2 - 1) + \\ &\quad + m^4 (m^4 - 1) (1 + \kappa_1 G/G_1)] / D, \end{aligned} \quad (2.3)$$

где введены обозначения:

$$m = R/R_1,$$

$$D = (\kappa + G/G_1) m^2 [(G/G_1 - 1) (3m^4 - 6m^2 + 4) + \\ + m^6 (1 + \kappa_1 G/G_1)] + (\kappa_1 G/G_1 - \kappa) [(G/G_1 - 1) + m^6 (1 + \kappa_1 G/G_1)].$$

В формулах (2.3) G , G_1 — модули сдвига породы и материала датчика соответственно, связанные с модулями упругости следующими соотношениями:

$$G = E/2(1 + \nu); \quad G_1 = E_1/2(1 + \nu_1), \quad (2.4)$$

где E , E_1 — модули упругости породы и материалы датчика соответственно; ν , ν_1 — коэффициенты Пуассона породы и материала датчика; κ , κ_1 — некоторые постоянные (одна из постоянных Ляме), связанные с коэффициентами Пуассона следующими соотношениями:
в случае плоской деформации

$$\kappa = 3 - 4\nu; \quad \kappa_1 = 3 - 4\nu_1, \quad (2.5)$$

в случае плоского напряженного состояния

$$\kappa = (3 - \nu)(1 + \nu); \quad \kappa_1 = (3 - \nu_1)(1 + \nu_1). \quad (2.6)$$

В дальнейшем еще потребуются выражения для главных напряжений σ_1 и σ_2 и максимального касательного напряжения τ_{\max} в датчике:

$$\sigma_{1,2} = (\sigma_{r1} + \sigma_{\theta1})/2 \pm \left[\sqrt{(\sigma_{r1} - \sigma_{\theta1})^2 + 4\tau_{r\theta1}^2} \right] / 2, \quad (2.7)$$

$$\tau_{\max} = (\sigma_1 - \sigma_2)/2 = \left[\sqrt{(\sigma_{r1} - \sigma_{\theta1})^2 + 4\tau_{r\theta1}^2} \right] / 2. \quad (2.8)$$

§ 2. АНАЛИЗ ОПТИЧЕСКОЙ КАРТИНЫ В ДАТЧИКЕ

В соответствии с выражением (1.2) разность хода лучей света, приобретаемая в фотоупругом датчике,

$$\Gamma = 2Cd\tau_{\max}.$$

Для конкретного датчика величины C и d постоянны и разность хода лучей определяется только величиной максимальных касательных напряжений в датчике. Следовательно, изолинии τ_{\max} вполне однозначно определяют оптическую картину полос в датчике.

На рис. 5 приведены рассчитанные на ЭВМ по формулам (2.8) с учетом (2.1), (2.3), (2.4) и (2.5) изолинии максимальных касательных напряжений в датчике τ_{\max} для следующих данных: $E_1 = 6,3 \cdot 10^5$ кгс/см², $\nu_1 = 0,21$ (стекло); $E = 1,575$ кгс/см², $\nu = 0,25$ (алевролит); $m = \bar{R}/\bar{R}_1 = 6$ и различных соотношений нагрузки $-i \leq p/q \leq i$ с шагом 0,25.

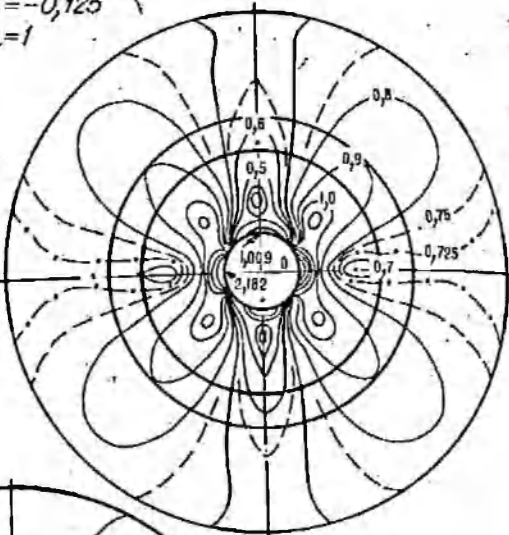
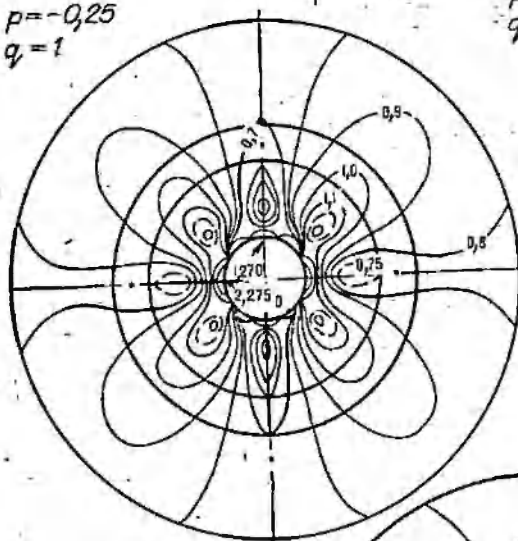
В результате анализа картины изолиний τ_{\max} можно сделать следующие важные для метода фотоупругих датчиков выводы.

$$p = -0,25$$

$$q = 1$$

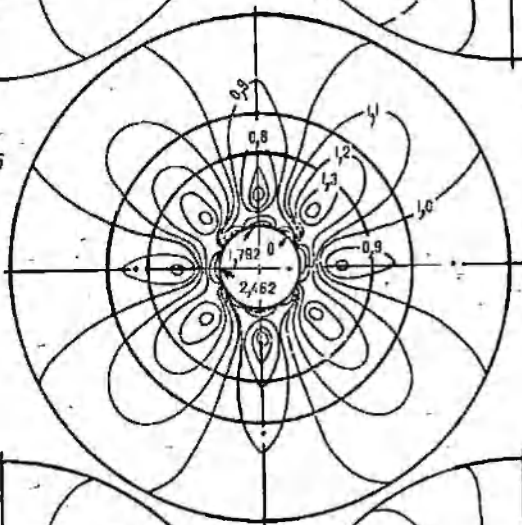
$$p = -0,125$$

$$q = 1$$



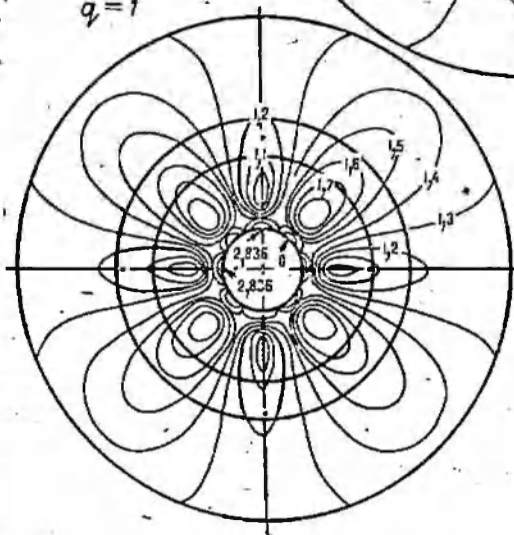
$$p = -0,5$$

$$q = 1$$



$$p = -1$$

$$q = 1$$



$$p = -0,75$$

$$q = 1$$

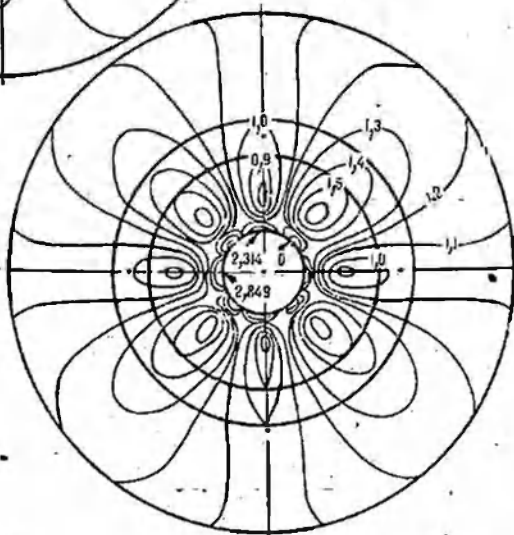
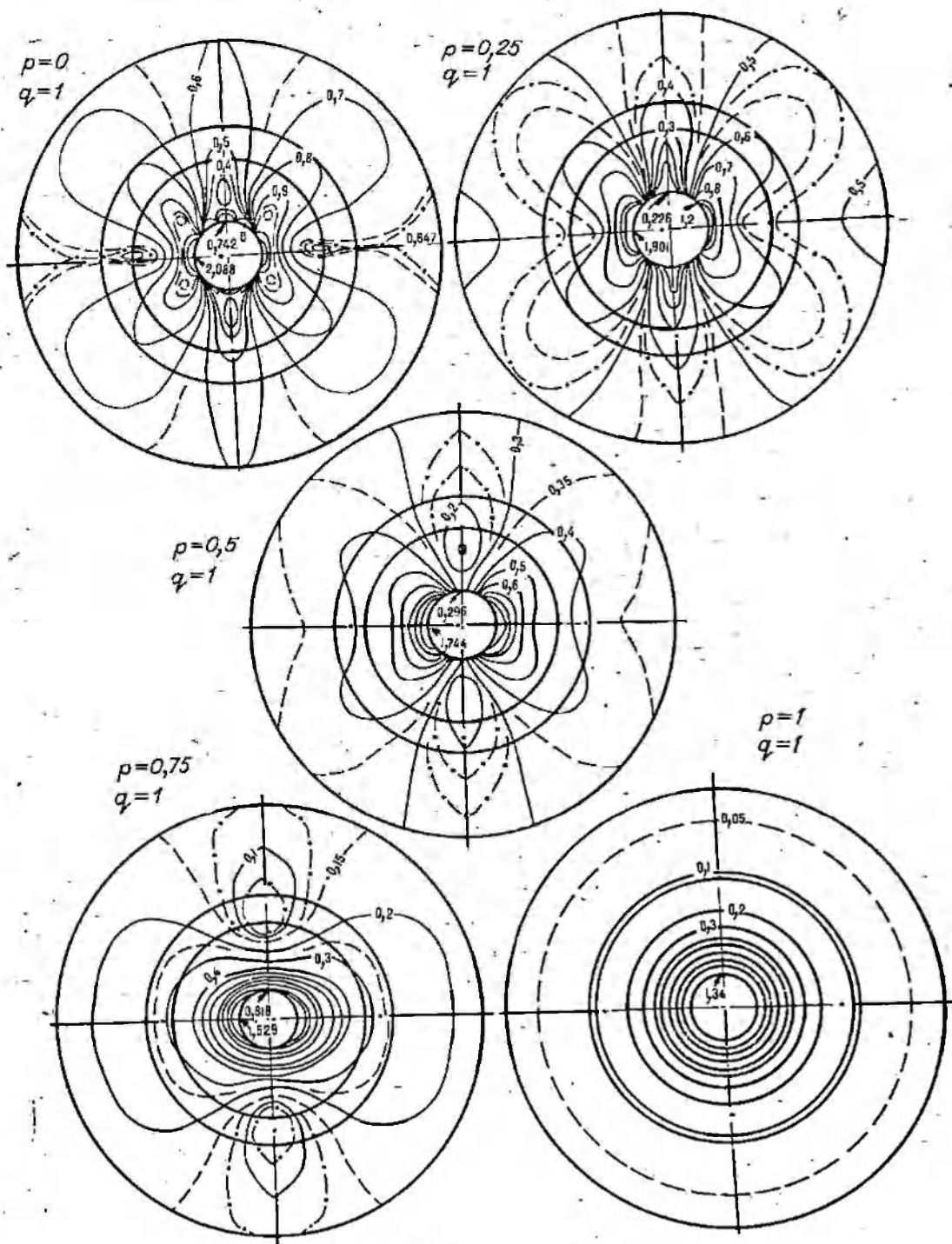


Рис. 5. Изолинии максимальных касате.

1. Картины изолиний τ_{\max} (а следовательно, и картины полюс в датчике) имеют две оси симметрии, совпадающие с направлениями главных напряжений в породе. Ту ось симметрии, которая совпадает с направлением большего напря-



льных напряжений в датчике.

жения (в нашем случае с q), будем называть главной осью симметрии, вторую — неглавной.

2. Характер (узор, рисунок) картины изолиний τ_{\max} зависит от вида напряженного состояния среды вдали от датчика,

т. е. от соотношения главных напряжений p и q в породе, и изменяется с изменением этого соотношения.

3. В случае гидростатического поля напряжений в породе (т. е. при $p=q$) все направления становятся главными и изолинии τ_{\max} превращаются в concentрические окружности.

4. В случае чистого сдвига (т. е. при $p=-q$) картина изолиний в датчике имеет четыре оси симметрии, две из них (будем называть их основными) совпадают с направлениями главных напряжений в породе, две другие (дополнительные) направлены под углом 45° к первым.

5. Плотность изолиний τ_{\max} не равномерна. Наиболее густо изолинии располагаются в области датчика, прилегающей к его внутреннему отверстию, которое играет роль концентратора напряжений. По мере приближения к внешнему контуру датчика плотность изолиний постепенно уменьшается. На неравномерность распределения изолиний τ_{\max} существенное влияние оказывает коэффициент гидростатичности, равный отношению главных напряжений $\lambda=p/q$. При величине отношения $\lambda=0\div 0,4$ наибольший градиент изменения τ_{\max} наблюдается на неглавной оси симметрии вблизи внутреннего края датчика, наименьший — вблизи внешнего контура датчика и вблизи главной оси симметрии. По мере увеличения λ от 0,4 до 0,7 градиент изменения τ_{\max} вдоль главной оси симметрии увеличивается и при $\lambda>0,7$ практически совпадает с таковым вдоль неглавной оси симметрии.

При отрицательных значениях λ неравномерность распределения τ_{\max} больше, чем при положительных.

6. Область наиболее высоких градиентов изменения τ_{\max} вблизи внутреннего отверстия датчика занимает очень узкое кольцо, ширина которого не превышает $1/6$ длины наружного радиуса датчика. Эта область удобна для наблюдений при малых нагрузках, однако при больших приростах напряжений в породе полосы в этой области сливаются и становятся неразличимыми.

7. При величине $-1\leq\lambda<0,25$ на внутреннем контуре датчика имеются четыре простые точки, в которых $\tau_{\max}=0$ и $\sigma_1=\sigma_2=0$. При $\lambda=-1$ эти точки расположены под углом 45° к основным осям симметрии и совпадают с дополнительными осями. При увеличении λ эти точки приближаются к главной оси симметрии.

8. Как следует из картин изолиний τ_{\max} , в датчике существует ряд точек, в которых полосы либо зарождаются, либо исчезают. Для области, прилегающей к внутреннему отверстию датчика, при $\lambda<0,375$ имеются четыре точки зарождения полос, они находятся на краю отверстия на осях симметрии.

При $\lambda>0,375$ две такие точки, лежащие на главной оси симметрии, перестают быть источником полос.

В основной области датчика при $\lambda \leq 0$ четыре источника полос, они расположены примерно посередине между главными осями симметрии на расстоянии около $0,3R_1$ от внутреннего контура (в дальнейшем эти точки будем обозначать буквой K) и при $\lambda = -1$ лежат точно на дополнительных осях симметрии. При $\lambda > 0$ эти четыре точки перестают быть источниками полос, единственными источниками остаются указанные выше точки на внутреннем контуре.

В основной области датчика имеются также четыре точки, расположенные на основных осях симметрии примерно посередине между внутренним и внешним краями и являющиеся точками схода полос. При $\lambda > 0$ две из этих точек, лежащие на неглавной оси симметрии, исчезают, а при $\lambda > 0,375$ исчезают и две другие, лежащие на главной оси. При $\lambda > 0,5$ на главной оси появляются две изотропные точки, которые при увеличении λ перемещаются к внешнему контуру и при $\lambda = 1$ исчезают.

Положение последних двух точек относительно внешнего контура датчика можно использовать для определения величины λ . Наличие двух точек схода полос на неглавной оси симметрии при $\lambda = 0$ — удобный критерий для характеристики одноосного поля напряжений в породе.

9. Во всех случаях точки с наибольшим значением τ_{\max} расположены на краю внутреннего отверстия датчика на неглавной оси симметрии.

10. При одновременном увеличении или уменьшении величин p и q (т. е. при $\lambda = \text{const}$) характер картины изолиний τ_{\max} остается прежним, но так как величина τ_{\max} при этом меняется, то изменяется и количество полос на оптической картине в датчике, а следовательно, и порядок полосы в каждой точке датчика.

Отмеченные особенности оптической картины в той или иной степени могут быть использованы при расшифровке показаний датчика.

Для облегчения условий наблюдения при расшифровке оптической картины в ряде случаев оказывается удобным иметь на лицевой поверхности датчика одну или несколько концентрических окружностей, выполненных в виде тонких проточек. Для большей контрастности их следует заполнять черной краской. В дальнейшем эти окружности будем называть делительными. В настоящей работе в качестве делительных приняты окружности радиуса $2,67R_1$ и $3,5R_1$, где R_1 — радиус внутреннего отверстия датчика. Эти окружности, в частности, изображены на рис. 6.

Выделим на оптической картине в датчике ряд характерных точек, в которых удобно производить отсчеты (на рис. 6 эти точки обозначены заглавными латинскими буквами). Все выделенные точки можно разделить на неподвижные — $A, B,$

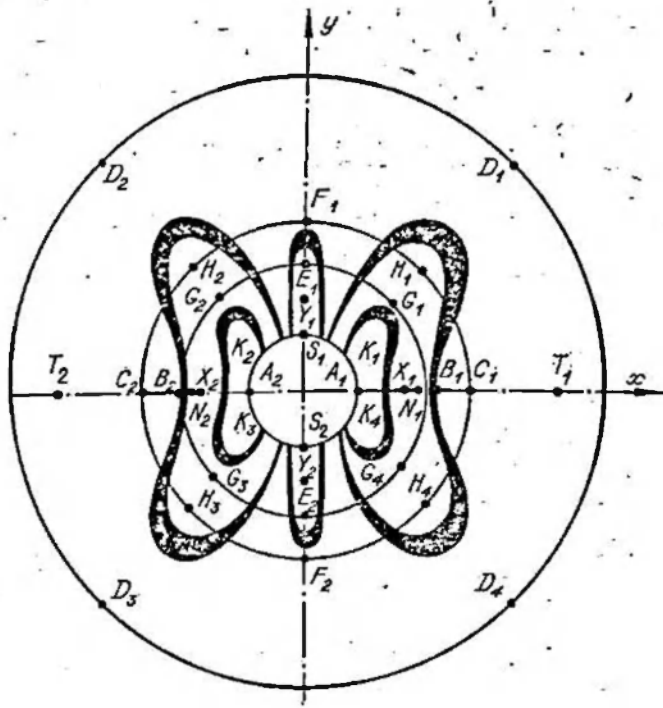


Рис. 6. Расположение характерных точек на оптической картине в фотоупругом датчике.

C, E, F, S и подвижные — D, K, G, H, N, T, X, Y . Неподвижные точки связаны с оптической картиной двумя координатами. Действительно, в полярной системе координат для всех неподвижных точек заданы обе координаты — r и θ . Так, точка A_1 имеет координаты $r=R_1, \theta=0$; для точки A_2 $r=R_1, \theta=\pi$; для точки E_1 $r=2,67R_1, \theta=\pi/2$ и т. д.

Все подвижные точки характеризуются либо одной строго фиксированной координатой — радиусом или полярным углом, либо имеют обе переменные координаты. Так, точки D, G, H имеют фиксированный радиус, точки N, T, X, Y — фиксированный угол. Для точек K обе координаты не фиксированы. Изменение координат подвижных точек в основном связано с изменением величины λ .

Приведем правило нахождения на оптической картине всех подвижных точек. Положение неподвижных точек ясно из рисунка.

Точки $K_i, i=1, 2, 3, 4$ расположены примерно посередине между осями симметрии на расстоянии $(0,2-0,3)R_1$ от внутреннего края отверстия и, как уже отмечалось, при $\lambda \leq 0$ являются точками зарождения полос. На картине изолиний τ_{\max} эти точки соответствуют центрам лепестков, расположенных между осями симметрии. На оптической картине в датчике эти точки появляются ранее всего как четыре сначала жел-

товатых пятна, постепенно переходящих в красные. При $0 < \lambda < 0,4$ точки K уже не являются точками зарождения полос, однако отсчеты в этих точках очень удобны на практике, поэтому всегда желательно иметь какие-либо условные точки, соответствующие точкам K . В качестве таковых обычно можно принимать по-прежнему центры лепестков между осями симметрии. При $\lambda > 0,4$ лепестки исчезают и точки K отсутствуют.

Точки G_i и H_i , $i=1, 2, 3, 4$ расположены на делительных окружностях радиусов $2,67R_1$ и $3,5R_1$ и являются точками касания изохром в вершинах лепестков с этими окружностями. Аналогично точки D — это точки касания изохром в вершинах лепестков с внешним краем датчика. Точки H, G, D наблюдаются при $\lambda < 0,4$. При $\lambda = -1$ они расположены на дополнительных осях симметрии, т. е. точно под углом 45° к основным осям симметрии. При увеличении λ эти точки несколько смещаются в сторону неглавной оси.

Две точки X лежат на неглавной оси симметрии и имеют тот же порядок полосы, что и точки H . Они наблюдаются при $-0,5 \leq \lambda \leq 0,5$, причем при $\lambda \leq 0,5$ положение их на неглавной оси заметно изменяется с изменением величины λ , что можно использовать при практических измерениях.

Точки схода полос на главной оси симметрии обозначены Y_1 и Y_2 . Они наблюдаются при $-1 < \lambda < 1$, причем в пределах $0,5 \leq \lambda < 1$ заметно смещаются вдоль большей оси симметрии к внешнему контуру датчика.

Точки схода полос на неглавной оси симметрии обозначены N_1 и N_2 и наблюдаются при $-1 \leq \lambda < 0$. Они всегда расположены по внешнюю сторону от точек X_1 и X_2 . Важная их особенность состоит в том, что при $\lambda > 0$ они не наблюдаются, поэтому при появлении их на оптической картине $\lambda \leq 0$, т. е. либо $p=0$, либо $p < 0$.

Точки T_1 и T_2 находятся на меньшей оси симметрии как точки касания изохром с этой осью и наблюдаются при $-0,125 \leq \lambda < 0$.

Изложенное выше о характере оптической картины в датчике относится к случаю $m=6$. При других значениях параметра m характер оптической картины несколько меняется. При $m > 6$ оптическая картина мало отличается от картины при $m=6$, только лепестки узора несколько больше вытянуты, однако вблизи внешнего края датчика число полос уменьшается. При $m < 6$ узор оптической картины заметно отличается от узора при $m=6$. При $m=6$ материал датчика используется наиболее рационально, в то же время полностью сохраняются все особенности оптической картины, обусловленные наличием малого отверстия. В этом смысле $m=6$ является оптимальным.

§ 3. СПЛОШНОЙ ФОТОУПРУГИЙ ДАТЧИК

Если в формулах (2.1) и (2.3) положить $\bar{K}_1 = 0$, т. е. $1/m = 0$, то получим следующие выражения для напряжений в сплошном датчике ($r \leq R$):

$$\begin{aligned}\sigma_{r1} &= (p+q)a_1/2 + (p-q)b_1(\cos 2\theta)/4, \\ \sigma_{\theta 1} &= (p+q)a_1/2 - (p-q)b_1(\cos 2\theta)/4, \\ \tau_{r\theta 1} &= (p-q)b_1(\sin 2\theta)/4,\end{aligned}\quad (2.9)$$

где

$$\begin{aligned}a_1 &= (1+\kappa)/[(G/G_1-1) - (1+\kappa_1 G/G_1)], \\ b_1 &= 2(1+\kappa)/(\kappa + G/G_1).\end{aligned}$$

Вычислим разность хода лучей в сплошном датчике:

$$\Gamma = (p-q)Cdb_1/2. \quad (2.10)$$

Из последнего выражения следует, что разность хода лучей в сплошном фотоупругом датчике не зависит от текущих координат точек датчика, следовательно, во всех точках она одна и та же, т. е. в таком датчике будет наблюдаться изохрома одного порядка. Этот факт впервые, по-видимому, был отмечен в работах Хирамицу [7].

§ 4. ВЛИЯНИЕ ЖЕСТКОСТИ ФОТОУПРУГОГО ДАТЧИКА НА ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ

Влияние жесткости датчика удобно проследить на сплошном цилиндрическом включении.

Пусть разность хода лучей в сплошном датчике равна Γ . Определим величину напряжения в породе, соответствующую этой разности хода. Из выражения (2.10), положив для удобства $q=0$, находим

$$p = 2\Gamma/Cdb_1. \quad (2.11)$$

В случае, когда датчик и порода находятся в условиях плоской деформации,

$$b_1 = 8(1-\nu)(1+\nu)E_1/[3-4\nu)(1+\nu)E_1 + (1+\nu_1)E]. \quad (2.12)$$

Посмотрим, как влияет на определение напряжений в породе ошибка в определении модуля упругости породы E .

Если p — истинное напряжение, действующее в породе, p' — величина напряжения, рассчитанная по формуле (2.11) с учетом (2.12) для случая, когда модуль упругости породы

определен с некоторой ошибкой, то относительная ошибка измерения

$$\delta = (p' - p)/p = b_1/b_1' - 1, \quad (2.13)$$

где

$$b_1' = 8(1 - \nu)(1 + \nu)E_1 / [(3 - 4\nu)(1 + \nu)E_1 + (1 + \nu_1)E']. \quad (2.14)$$

Здесь E' — приближенное значение модуля упругости породы.

Относительная ошибка в определении величины модуля упругости породы

$$\delta_{\pi} = (E' - E)/E. \quad (2.15)$$

Очевидно, ошибка возможна как в сторону завышения, когда $E' > E$, так и в сторону занижения, когда $E' < E$. В первом случае $\delta_{\pi} > 0$, во втором $\delta_{\pi} < 0$.

Обозначим $E'/E = \alpha$ и запишем формулу (2.13) в следующем виде:

$$\delta = [(3 - 4\nu)(1 + \nu)E_1/E + (1 + \nu_1)\alpha] / [(3 - 4\nu)(1 + \nu)E_1/E + (1 + \nu_1)] - 1. \quad (2.16)$$

Обозначим

$$E_1/E = k \quad (2.17)$$

и назовем эту величину коэффициентом жесткости датчика.

Приведем результаты расчетов по формуле (2.16), выполненных на ЭВМ «Мир» для $k = 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12$ и для следующих значений δ_{π} и соответствующих им значений α :

$\delta_{\pi}, \%$	. . . . .	-25	-50	-100	+25	+50	+100
α	. . . . .	0,75	0,5	0	1,25	1,5	2

Результаты расчетов приведены в табл. 2 и на рис. 7.

Аналогично можно рассмотреть ошибку при измерении по кольцевому фотоупругому датчику. Однако в этом случае выписать в явном виде выражение, аналогичное (2.16), не представляется возможным.

В табл. 3 приведены значения ошибки в определении величины напряжения в породе по показаниям кольцевого датчика для случая плоской деформации, если при пересчете показаний датчика в напряжения в массиве использован модуль упругости породы, определенный с ошибкой δ_{π} . Расчеты выполнены для точки K на оптической картине в датчике ($r = 0,5$ см, $\theta = 38^\circ$) при величине отношения главных напряжений в породе $\lambda = 0,25$.

Графики величины относительной ошибки в случае кольцевого датчика для точек A, K, H (рис. 8) построены для

Величина ошибки δ (сплошной датчик)

Коэффициент Пуассона		Коэффициент жесткости k																			
		1					2					4					6				
		Относительная ошибка (%) в определении величины модуля упругости породы δ																			
ν	ν_1	+25	+50	+100	+25	+50	+100	+25	+50	+100	+25	+50	+100	+25							
0	0	0,63 -0,062	0,125 -0,125	0,25 -0,25	0,036 -0,036	0,071 -0,071	0,143 -0,143	0,019 -0,019	0,038 -0,038	0,080 -0,080	0,013 -0,013										
0,125	0,125	0,071 -0,071	0,142 -0,142	0,286 -0,286	0,041 -0,042	0,083 -0,083	0,167 -0,166	0,023 -0,023	0,045 -0,045	0,091 -0,091	0,015 -0,015										
0,25	0,25	0,083 -0,083	0,167 -0,167	0,333 -0,333	0,050 -0,050	0,1 -0,1	0,2 -0,2	0,028 -0,028	0,056 -0,056	0,111 -0,111	0,019 -0,019										
0,375	0,375	0,10 -0,10	0,2 -0,2	0,4 -0,4	0,063 -0,062	0,125 -0,125	0,25 -0,25	0,035 -0,035	0,071 -0,071	0,143 -0,143	0,025 -0,025										
0,5	0,5	0,125 -0,125	0,25 -0,25	0,5 -0,5	0,083 -0,083	0,167 -0,166	0,333 -0,333	0,05 -0,05	0,10 -0,10	0,2 -0,2	0,036 -0,036										
0	0,25	0,073 -0,073	0,147 -0,147	0,294 -0,294	0,043 -0,043	0,086 -0,086	0,172 -0,172	0,02 -0,02	0,047 -0,047	0,094 -0,094	0,016 -0,016										
0,5	0,25	0,114 -0,114	0,227 -0,227	0,455 -0,455	0,074 -0,074	0,147 -0,147	0,294 -0,294	0,04 -0,04	0,086 -0,086	0,172 -0,172	0,03 -0,03										
0,25	0	0,071 -0,071	0,143 -0,143	0,286 -0,286	0,042 -0,042	0,83 -0,83	0,167 -0,167	0,02 -0,02	0,045 -0,045	0,091 -0,091	0,016 -0,016										
0,25	0,5	0,094 -0,094	0,187 -0,187	0,375 -0,375	0,053 -0,053	0,116 -0,116	0,231 -0,231	0,03 -0,03	0,065 -0,065	0,13 -0,13	0,023 -0,023										

Окончание табл. 2

Коэффициент Пуассона		Коэффициент жесткости k											
		6			8			10			12		
		Относительная ошибка (%) в определении величины модуля упругости породы δ											
ν	ν_1	+50	+100	+25	+50	+100	+25	+50	+100	+25	+50	+100	
0	0	0,026 -0,026	0,053 -0,053	0,01 -0,01	0,02 -0,02	0,04 -0,04	0,008 -0,008	0,016 -0,016	0,032 -0,032	0,007 -0,007	0,014 -0,014	0,027 -0,027	
0,125	0,125	0,031 -0,031	0,063 -0,063	0,012 -0,012	0,024 -0,024	0,048 -0,048	0,01 -0,01	0,019 -0,019	0,038 -0,038	0,008 -0,008	0,016 -0,016	0,032 -0,032	
0,25	0,25	0,038 -0,038	0,077 -0,077	0,015 -0,015	0,029 -0,029	0,059 -0,059	0,012 -0,012	0,024 -0,024	0,047 -0,047	0,01 -0,01	0,02 -0,02	0,04 -0,04	
0,375	0,375	0,05 -0,05	0,1 -0,1	0,019 -0,019	0,038 -0,038	0,08 -0,08	0,016 -0,016	0,031 -0,031	0,062 -0,062	0,013 -0,013	0,026 -0,026	0,053 -0,053	
0,5	0,5	0,071 -0,071	0,143 -0,143	0,028 -0,028	0,056 -0,056	0,111 -0,111	0,023 -0,023	0,045 -0,045	0,091 -0,091	0,019 -0,019	0,038 -0,038	0,077 -0,077	
0	0,25	0,032 -0,032	0,065 -0,065	0,012 -0,012	0,025 -0,025	0,05 -0,05	0,01 -0,01	0,02 -0,02	0,04 -0,04	0,008 -0,008	0,017 -0,017	0,034 -0,034	
0,5	0,25	0,061 -0,061	0,122 -0,122	0,024 -0,024	0,047 -0,047	0,094 -0,094	0,019 -0,019	0,038 -0,038	0,077 -0,077	0,016 -0,016	0,032 -0,032	0,065 -0,065	
0,25	0	0,031 -0,031	0,063 -0,063	0,012 -0,012	0,024 -0,024	0,048 -0,048	0,01 -0,01	0,019 -0,019	0,038 -0,038	0,008 -0,008	0,016 -0,016	0,032 -0,032	
0,25	0,5	0,045 -0,045	0,091 -0,091	0,017 -0,017	0,035 -0,035	0,07 -0,07	0,014 -0,014	0,028 -0,028	0,057 -0,057	0,012 -0,012	0,024 -0,024	0,048 -0,048	

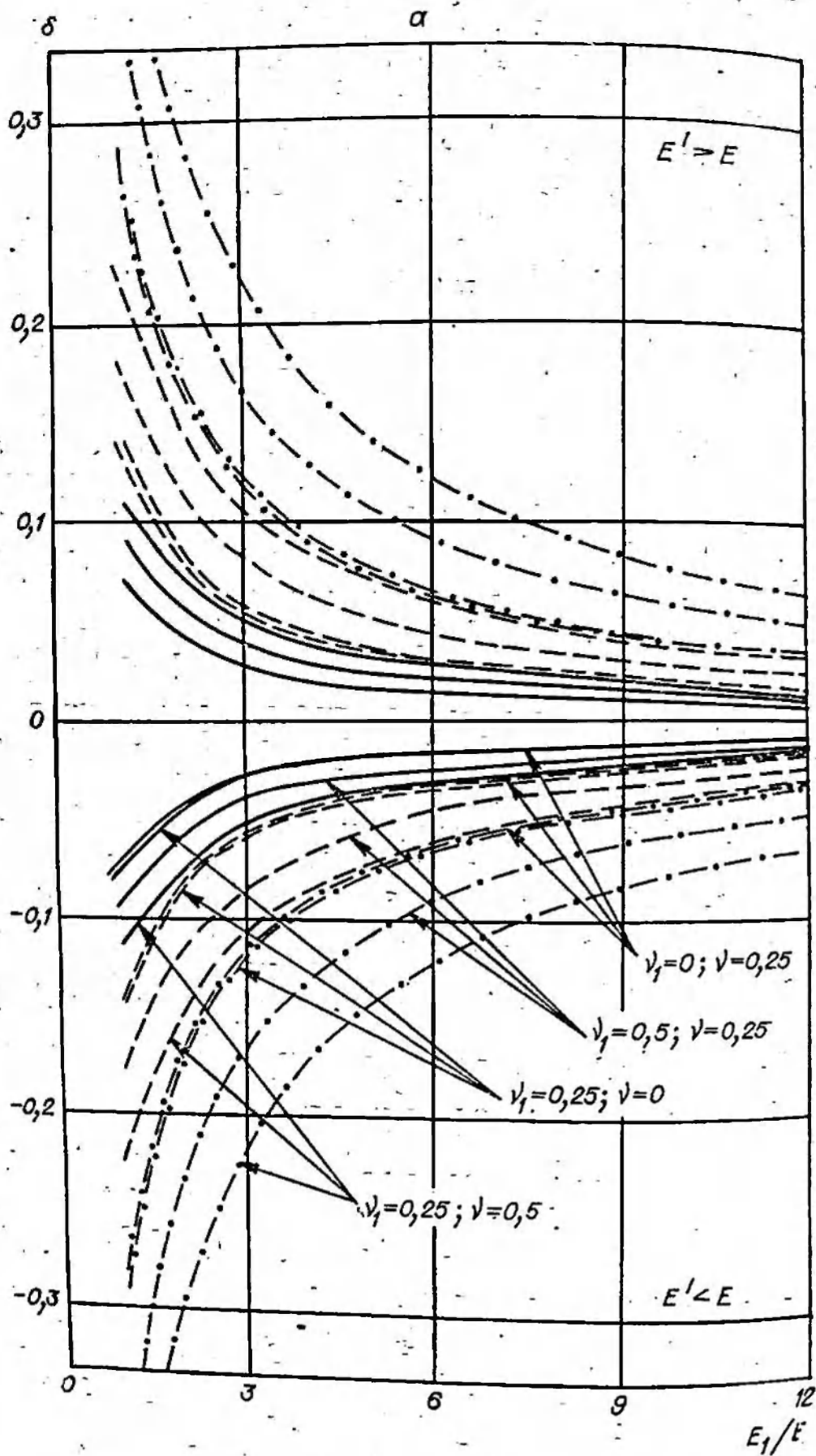
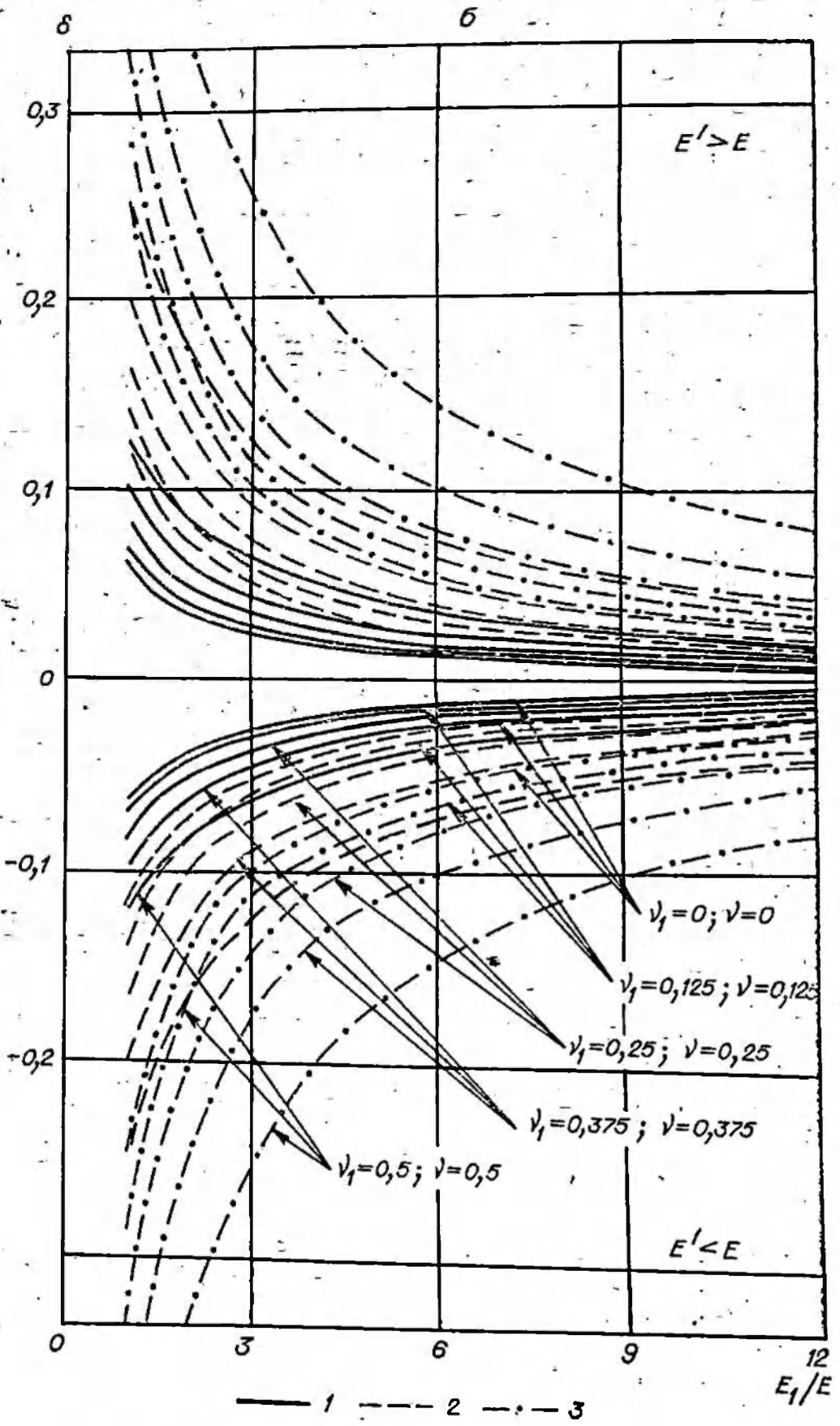


Рис. 7. Графики для относительной ошибки
 а — для случая $\nu_1 \neq \nu$; б — для случая $\nu_1 = \nu$.



бкн б в случае сплошного датчика.
 $\delta_{\text{п}}$ равно $\pm 25\%$ (1), $\pm 50\%$ (2), $\pm 100\%$ (3).

Коэффициент Пуассона		Коэффициент жесткости k									
		1			2			4			6
		Относительная ошибка в определении величины модуля упругости породы δ_{Π}									
ν	ν_1	± 25	± 50	± 100	± 25	± 50	± 100	± 25	± 50	± 100	± 25
0	0	0,082 -0,084	0,162 -0,172	0,321 -0,377	0,054 -0,056	0,106 -0,115	0,208 -0,247	0,034 -0,035	0,066 -0,071	0,128 -0,150	-0,025 0,025
0,125	0,125	0,074 -0,088	0,167 -0,178	0,343 -0,376	0,056 -0,057	0,110 -0,119	0,218 -0,242	0,034 -0,034	0,066 -0,069	0,170 -0,144	0,024 -0,024
0,25	0,25	0,093 -0,094	0,184 -0,188	0,366 -0,391	0,058 -0,059	0,116 -0,120	0,232 -0,250	0,035 -0,035	0,069 -0,070	0,136 -0,161	0,024 -0,026
0,375	0,375	0,100 -0,103	0,198 -0,206	0,389 -0,430	0,066 -0,067	0,132 -0,137	0,260 -0,281	0,041 -0,041	0,080 -0,083	0,157 -0,168	0,029 -0,03
0,5	0,5	0,108 -0,116	0,211 -0,240	0,393 -0,510	0,066 -0,085	0,163 -0,172	0,316 -0,352	0,053 -0,054	0,105 -0,109	0,207 -0,219	0,038 -0,039
0	0,25	0,088 -0,089	0,175 -0,180	0,351 -0,377	0,056 -0,057	0,110 -0,114	0,219 -0,241	0,033 -0,034	0,066 -0,068	0,131 -0,143	0,023 -0,024
0,5	0,25	0,119 -0,121	0,238 -0,244	0,474 -0,496	0,081 -0,081	0,162 -0,162	0,320 -0,337	0,051 -0,051	0,100 -0,102	0,198 -0,203	0,036 -0,037
0,25	0	0,086 -0,087	0,171 -0,177	0,337 -0,377	0,055 -0,056	0,108 -0,113	0,213 -0,239	0,033 -0,033	0,065 -0,068	0,126 -0,142	0,024 -0,025
0,25	0,5	0,068 -0,075	0,131 -0,157	0,240 -0,352	0,051 -0,053	0,098 -0,111	0,185 -0,232	0,032 -0,033	0,063 -0,067	0,122 -0,139	0,024 -0,024

Окончание табл. 3

Коэффициент Пуассона		Коэффициент жесткости k										
		6		8		10		12				
		Относительная ошибка (%) в определении величины модуля упругости породы δ_{Π}										
ν	ν_1	± 50	± 100	± 25	± 50	± 100	± 25	± 50	± 100	± 25	± 50	± 100
0	0	0,048 -0,052	0,095 -0,108	0,019 -0,021	0,038 -0,042	0,076 -0,085	0,016 -0,017	0,033 -0,035	0,064 -0,067	0,014 -0,015	0,029 -0,030	0,055 -0,059
0,125	0,125	0,048 -0,049	0,094 -0,104	0,019 -0,020	0,037 -0,040	0,074 -0,080	0,015 -0,016	0,030 -0,032	0,062 -0,066	0,013 -0,014	0,026 -0,027	0,053 -0,050
0,25	0,25	0,049 -0,054	0,099 -0,100	0,019 -0,020	0,039 -0,040	0,077 -0,087	0,016 -0,017	0,032 -0,033	0,064 -0,067	0,014 -0,014	0,027 -0,029	0,054 -0,057
0,375	0,375	0,058 -0,059	0,115 -0,120	0,022 -0,024	0,045 -0,046	0,089 -0,092	0,018 -0,019	0,037 -0,037	0,074 -0,077	0,016 -0,016	0,032 -0,032	0,063 -0,065
0,5	0,5	0,077 -0,079	0,153 -0,159	0,031 -0,031	0,062 -0,062	0,121 -0,124	0,025 -0,026	0,051 -0,052	0,100 -0,103	0,021 -0,022	0,043 -0,043	0,086 -0,087
0	0,25	0,047 -0,050	0,093 -0,101	0,018 -0,019	0,037 -0,039	0,072 -0,079	0,015 -0,016	0,031 -0,032	0,060 -0,065	0,013 -0,014	0,027 -0,028	0,052 -0,056
0,5	0,25	0,071 -0,073	0,144 -0,149	0,029 -0,029	0,057 -0,058	0,113 -0,117	0,023 -0,023	0,047 -0,048	0,093 -0,096	0,020 -0,021	0,04 -0,04	0,080 -0,080
0,25	0	0,047 -0,050	0,093 -0,102	0,018 -0,019	0,037 -0,039	0,072 -0,079	0,015 -0,016	0,031 -0,032	0,060 -0,065	0,013 -0,014	0,027 -0,028	0,052 -0,055
0,25	0,5	0,046 -0,049	0,091 -0,099	0,018 -0,019	0,036 -0,037	0,071 -0,076	0,015 -0,016	0,030 -0,031	0,059 -0,063	0,013 -0,013	0,026 -0,027	0,050 -0,053

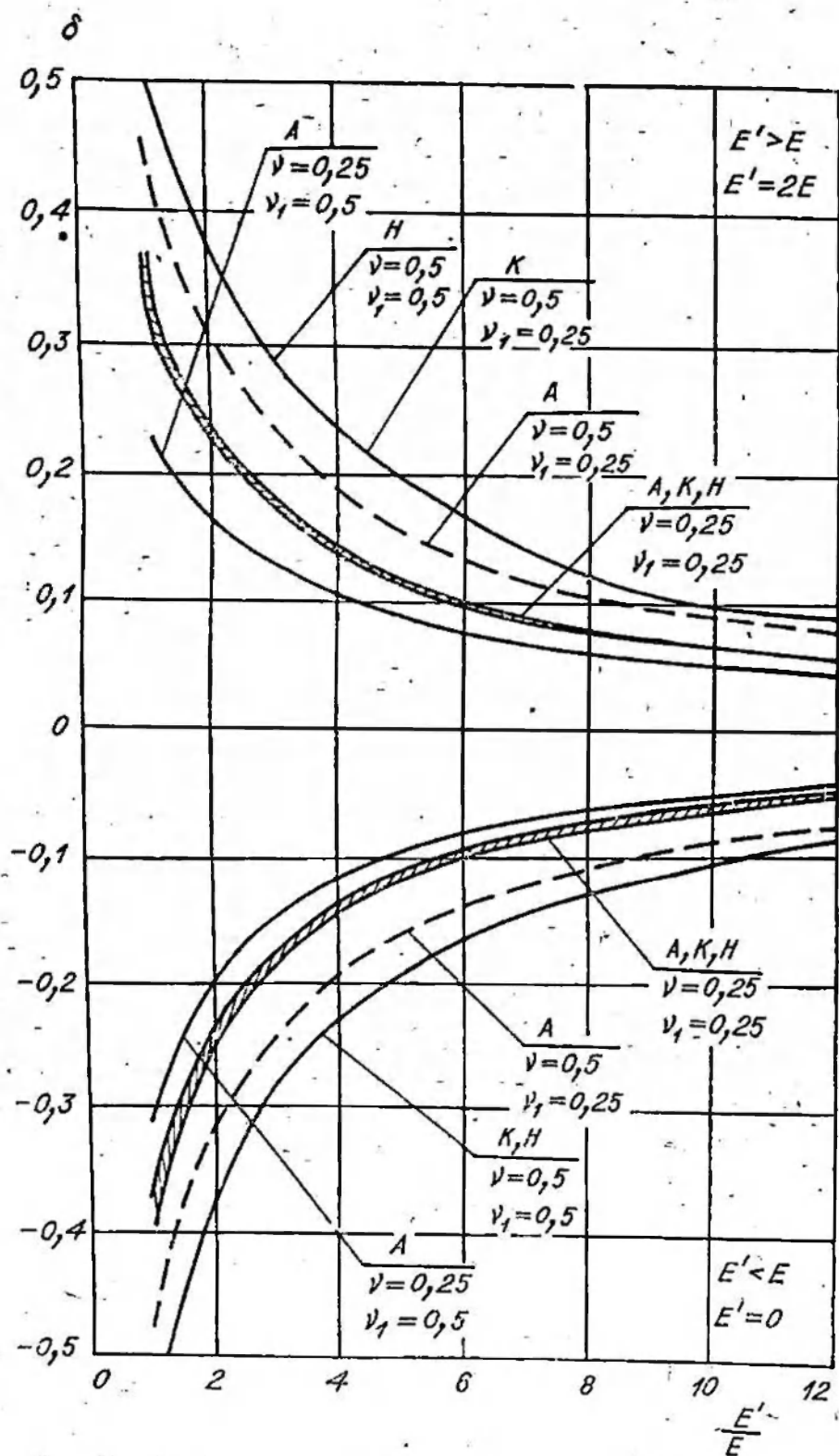


Рис. 8. Графики для относительной ошибки δ в случае кольцевого датчика.

$\delta_{\pi} = +100\%$ (верхняя половина) и для $\delta_{\pi} = -100\%$ (нижняя половина).

Анализируя табл. 2, 3 и рис. 7, 8, можно сделать следующие выводы.

1. Величина ошибки асимптотически стремится к нулю при увеличении жесткости датчика до ∞ и асимптотически стремится к ∞ при уменьшении жесткости датчика до нуля.

При $k < 2$ величина ошибки с уменьшением k очень быстро увеличивается. При $k > 2$ относительная ошибка начинает стабилизироваться. Так, при изменении коэффициента жесткости в пределах от 2 до 4 при $\delta_{\pi} = \pm 100\%$ относительная ошибка уменьшается примерно в 1,8 раза (или по абсолютной величине на 15%), а при изменении в пределах от 10 до 12 относительная ошибка уменьшается только в 1,2 раза (или по абсолютной величине на 1%).

2. Относительная ошибка принимает положительные значения, если $\delta_{\pi} > 0$, т. е. когда величина модуля упругости породы завышена, и отрицательные значения, если $\delta_{\pi} < 0$, т. е. когда величина модуля упругости породы занижена. Иначе говоря, знак относительной ошибки δ совпадает со знаком δ_{π} .

По абсолютной величине отрицательная ошибка во всех случаях, кроме $\lambda = 1$, несколько больше, чем положительная ошибка, причем эта несимметричность становится значительной для случаев, когда величина коэффициента Пуассона породы близка к 0,5.

3. При возрастании ошибки δ_{π} ровно в 2 раза ошибка δ также возрастает примерно в 2 раза, однако наблюдаются небольшие отклонения от этой закономерности, возрастающие с увеличением абсолютной величины δ_{π} .

4. На величину ошибки δ оказывают влияние коэффициенты Пуассона материала датчика и породы, а также их соотношение, причем это влияние различно для различных точек датчика и зависит от величины λ . Однако если при изменении коэффициента жесткости датчика от 12 до 1 ошибка измерения увеличивается в 5—8 раз, то при изменении самого благоприятного сочетания коэффициентов Пуассона на самое их неблагоприятное сочетание эта ошибка возрастает всего в 2 раза.

5. Самостоятельный интерес представляет случай $\delta_{\pi} = -100\%$. Каково бы ни было отношение истинных значений модулей упругости материала датчика и породы, модуль упругости материала породы E' принимается здесь равным нулю. На практике такое представление имеет некоторое удобство, так как, приняв $E' = 0$, уже не надо определять величину истинной ошибки δ_{π} , ибо заведомо в этом случае $\delta_{\pi} = -100\%$ (см. рис. 8).

6. В случае плоского напряженного состояния характер взаимодействия датчика с массивом остается таким же, как

Средние значения ошибки измерения δ

$\delta_{п}, \%$	Коэффициент жесткости k						
	2	4	8	12	20	50	100
± 25	± 8	± 4	± 3	± 2	$\pm 0,6$	$\pm 0,5$	$\pm 0,3$
± 50	± 16	± 8	± 5	± 4	$\pm 1,2$	$\pm 1,0$	$\pm 0,5$
± 100	± 30	± 16	± 11	± 8	$\pm 2,4$	$\pm 1,9$	$\pm 1,0$

и в случае плоской деформации. Отклонение отсчетов по оптической картине в датчике в одних и тех же точках для этих двух случаев не превышает 1—2%.

7. Размером осевого отверстия в датчике обусловлено распределение напряжений в датчике и в меньшей степени — величина ошибки в определении напряжений в массиве по величине максимального касательного напряжения в датчике. Это влияние становится заметным лишь при $m < 5$.

Значения относительной ошибки δ в определении напряжений в породе по показаниям фотоупругого датчика в практически важных случаях при $0,125 \leq v \leq 0,375$ и $0,125 \leq v_1 \leq 0,375$ приведены в табл. 4.

§ 5. КЛАССИФИКАЦИЯ ФОТОУПРУГИХ ДАТЧИКОВ ПО ЖЕСТКОСТИ

Из сказанного в предыдущем параграфе следует, что основным параметром, определяющим работу фотоупругого датчика, является его жесткость, т. е. отношение модулей упругости материала датчика и породы (2.17): $k = E_1/E$.

Для конкретного датчика величина модуля упругости его материала E_1 задана, т. е. $E_1 = \text{const}$, и, следовательно, условия работы датчика (его жесткость) определяются модулем упругости породы.

Рассмотрим табл. 2—4 и рис. 7 и 8.

Пусть имеется датчик из стекла с модулем упругости $E_1 = 6,3 \cdot 10^5$ кгс/см² и проводятся измерения в массиве, сложенном породами, модуль упругости которых лежит в пределах $E = (1 \cdot 10^5 - 5 \cdot 10^5)$ кгс/см², причем его истинное значение равно $E = 2,5 \cdot 10^5$ кгс/см². Тогда

$$k = E_1/E = 6,3 \cdot 10^5 / 2,5 \cdot 10^5 = 2,5.$$

Относительная ошибка в определении модуля упругости массива по верхнему пределу

$$\delta_{п}^B = (E' - E)/E = (5 \cdot 10^5 - 2,5 \cdot 10^5) / 2,5 \cdot 10^5 = 1 = 100\%,$$

по нижнему пределу.

$$\delta_{\Pi}^{\text{н}} = (E' - E)/E = (1 \cdot 10^5 - 2,5 \cdot 10^5)/2,5 \cdot 10^5 = \\ = -0,6 = -60\%.$$

Из табл. 4 находим: при $k=2$ относительная ошибка в определении напряжений в массиве при отсчете по точкам К, обусловленная очень приближенной оценкой величины модуля упругости породы $\delta_{\Pi} = +100\%$, не превысит 30% , и при $\delta_{\Pi} = -60\%$ не превысит -17% . Таким образом, ошибка будет заключена в интервале от -17 до $+30\%$.

Предположим, что после визуального изучения состава исследуемой горной породы можно принять, что ее модуль упругости не выходит за пределы $E = (1,5 \cdot 10^5 - 4 \cdot 10^5)$ кгс/см², тогда

$$\delta_{\Pi}^{\text{в}} = (4 \cdot 10^5 - 2,5 \cdot 10^5)/2,5 \cdot 10^5 = 0,6 = 60\%;$$

$$\delta_{\Pi}^{\text{н}} = (1,5 \cdot 10^5 - 2,5 \cdot 10^5)/2,5 \cdot 10^5 = -0,4 = -40\%.$$

В этом случае ошибка измерения напряжений в породе лежит в пределах $\pm 15\%$, т. е. величина интервала ошибки измерения уменьшилась в 1,5 раза.

Если в месте установки датчиков провести инструментальное измерение модуля упругости породы с точностью $\pm 25\%$ (например, методом бурения), то ошибка измерения будет лежать в пределах $\pm 7,5\%$.

Рассмотрим второй пример. Тот же датчик используется для измерения напряжений в угле. Как известно, модуль упругости угля не превышает $4 \cdot 10^4$ кгс/см². Ориентировочно положим нижний предел на один порядок ниже. Пусть истинное значение модуля упругости угля в месте измерения $E = 3 \cdot 10^4$ кгс/см². В этом случае

$$k = 6,3 \cdot 10^5 / 3 \cdot 10^4 = 21;$$

$$\delta_{\Pi}^{\text{в}} = (4 \cdot 10^4 - 3 \cdot 10^4) / 3 \cdot 10^4 = 0,33 = 33\%;$$

$$\delta_{\Pi}^{\text{н}} = (4 \cdot 10^3 - 3 \cdot 10^4) / 3 \cdot 10^4 = -0,83 = -83\%.$$

Из табл. 4 находим: при $k=20$ для $\delta_{\Pi} = 33\%$ ошибка измерения не превысит 1% и для $\delta_{\Pi} = -83\%$ не превзойдет -2% .

По сравнению с первым примером во втором никаких дополнительных мер к уточнению величины интервала возможных значений модуля упругости исследуемого массива не принималось, более того, этот интервал даже в 2 раза шире, тем не менее интервал ошибки измерения всего 3% вместо 47% в первом случае. Здесь наглядно прослеживается влияние жесткости датчика на ошибку измерения.

Выше было введено понятие коэффициента жесткости датчика как отношение модулей упругости материала датчика породы. Введенный таким образом коэффициент жесткости на самом деле не характеризует жесткость самого датчика, а является некоторой численной характеристикой системы датчик — порода. Под жесткостью собственно кольцевого датчика можно понимать число, показывающее, во сколько раз при одной и той же нагрузке деформации кольцевого датчика превосходят деформации сплошного датчика из того же материала. Однако в дальнейшем будем употреблять термин жесткость датчика в первом смысле, т. е. как некоторую численную характеристику системы датчик — порода.

Величину коэффициента $k = E_1/E$, понимаемого как некоторая численная характеристика системы датчик — порода, удобно положить в основу классификации условий работы фотоупругих датчиков (табл. 5). Всего по величине коэффициента k выделено пять классов точности измерений, наименее точен первый класс, наиболее точен — пятый. В дальнейшем будем говорить о классификации датчиков по жесткости, учитывая, что физически это классификация системы датчик — порода.

В изверженных, метаморфических и некоторых осадочных породах датчики из стекла будут работать в первом классе точности, в песчаниках, алевролитах, известняках — во втором, в некоторых типах песчаников и алевролитов с глинистым цементом, а также в аргиллитах — в третьем, в некоторых типах алевролитов и аргиллитов — в четвертом. Во всех углях, а также в слабых породах датчики из стекла будут работать в пятом классе точности.

Класс точности измерений по существу определяет требования к точности определения модуля упругости исследуемой породы, причем чем точнее нужны измерения, тем точнее требуется вычислить модуль упругости. Однако при высокой жесткости датчика даже при очень грубом определении модуля упругости породы точность измерения напряжений будет достаточно высокой. Это одно из важнейших преимуществ жестких датчиков.

Фотоупругие датчики, работающие в третьем классе точности и выше, можно считать собственно датчиками напряжений, поскольку даваемая этими датчиками информация при заданной точности измерений практически зависит только от величины напряжений в породе. Фотоупругие датчики, работающие в первом классе точности, не являются датчиками напряжений. Они дают сведения о деформациях стенок скважины, а также о направлении главных деформаций в породе. Следовательно, такие датчики можно называть деформометрами. При измерениях с помощью деформометров необходимо одновременно находить в месте установки датчика модуль

Классификация фотоупругих датчиков по жесткости

Класс точности	Класс датчика по жесткости системы датчик—порода	Коэффициент жесткости k	Относительная ошибка определения модуля упругости породы $\delta, \%$	Относительная ошибка измерения $\delta, \%$	Виды пород при использовании датчиков из стекла марки К8 ($E_1=8,23 \cdot 10^5$ кгс/см ²)
I	Мягкие	$k < 2$	± 50 ± 100	Более ± 16 Более ± 30	Изверженные, метаморфические, железные руды и др., $E > 4 \times 10^5$ кгс/см ²
II	Полужесткие	$2 \leq k < 4$	± 50 ± 100	$\pm (8,5 \div 16)$ $\pm (17 \div 30)$	Песчаники, алевролиты, аргиллиты, известняки, $E = (2 \div 4) \times 10^5$ кгс/см ²
III	Жесткие	$4 \leq k < 8$	± 50 ± 100	$\pm (5 \div 8,5)$ $\pm (9,5 \div 17)$	Песчаники, алевролиты, аргиллиты, $E = (1 \div 2) \cdot 10^5$ кгс/см ²
IV	Жесткие (повышенной точности)	$8 \leq k < 20$	± 50 ± 100	$\pm (1,2 \div 5)$ $\pm (2,4 \div 9,5)$	Алевролиты, аргиллиты, $E = (1 \div 0,4) \cdot 10^5$ кгс/см ²
V	Очень жесткие (высоко точные)	$k \geq 20$	± 50 ± 100	Менее $\pm 1,2$ Менее $\pm 2,4$	Угль, слабые породы, $E < 4 \times 10^4$ кгс/см ²

упругости породы, а для определения напряжений привлекать аппарат механики сплошной среды.

Датчики, работающие во втором классе точности, являются переходными между деформометрами и собственно датчиками напряжений.

Надо помнить, что класс жесткости фотоупругого датчика существенно зависит от материала датчика. Так, датчик из органического стекла, модуль упругости которого $3,3 \cdot 10^4$ кгс/см², даже в угле будет работать в первом классе точности, т. е. может использоваться только как деформометр.

Следует еще отметить, что рассмотренная выше ошибка измерения δ относится только к случаю идеальной установки датчика, когда толщина слоя клея равна нулю.

§ 6. ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДАТЧИКА С ПОРОДОЙ НА ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ

В плоском случае, для которого только и справедлива изложенная теория, породный массив может находиться либо в условиях плоской деформации, либо в плоском напряженном состоянии. Аналогично датчик может находиться в одном из этих двух состояний в зависимости от его длины и свойств клея. Следовательно, возможны четыре комбинации механических состояний массива и датчика. Впрочем, случай, когда массив находится в плоском напряженном состоянии, а датчик в условиях плоской деформации, реального смысла не имеет.

В табл. 6 приведены величины τ_{\max} в датчике и величины относительной ошибки в определении напряжений в массиве по точкам отсчета с координатами ($r=2R_1$, $\theta=45^\circ$) и ($r=4R_1$, $\theta=0^\circ$), когда за эталонное состояние принято — массив и датчик находятся в условиях плоской деформации [25]. Вычисления выполнены для случая $p=0$, $q=1$ кгс/см², $\nu=0,25$, $\nu_1=0,21$ (стекло), $E=1,575 \cdot 10^5$ и $3,15 \cdot 10^5$ кгс/см²; $E_1=6,3 \cdot 10^5$ кгс/см².

Величина относительной ошибки определялась по формуле:

$$\Delta = (\tau_{\max}^{ij} - \tau_{\max}^{dd}) / \tau_{\max}^{dd}$$

где τ_{\max}^{dd} — максимальное касательное напряжение в датчике в случае, когда массив и датчик находятся в условиях плоской деформации; i — индекс состояния массива, принимающий значение $i=d$, если массив находится в состоянии плоской деформации, и $i=n$, если массив находится в плоском напряженном состоянии; j — индекс механического состояния дат-

Таблица 6

Влияние характера напряженного состояния системы массив — датчик на точность измерения

Величина	Координаты точек		$E_1/E=2$				$E_1/E=4$			
	r , см	θ , град	дн	дд	нн	нд	дн	дд	нн	нд
τ_{\max}	0,6	45	0,827	0,829	0,820	0,821	0,940	0,941	0,924	0,925
τ_{\max}	1,2	0	0,577	0,578	0,573	0,575	0,646	0,647	0,637	0,637
Δ	0,6	45	0,002	0	0,011	0,010	0,001	0	0,018	0,017
Δ	1,2	0	0,002	0	0,009	0,005	0,002	0	0,015	0,015

Примечание. д — плоская деформация, н — плоское напряженное состояние (первая буква относится к массиву, вторая — к датчику).

чика, принимающий значение $j=d$, если датчик находится в состоянии плоской деформации, и $j=n$, если датчик находится в плоском напряженном состоянии.

Относительная ошибка Δ в определении величины τ_{\max} в датчике (а значит, и величины напряжений в породе) при разных условиях взаимодействия датчика с массивом составляет 0,1—1,8% (см. табл. 6). При практических расчетах такой ошибкой вполне можно пренебречь.

§ 7. СВЯЗЬ ДЕЙСТВИТЕЛЬНОЙ КАРТИНЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В ДАТЧИКЕ С ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ. КВАЗИГЛАВНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ

До сих пор при рассмотрении теории взаимодействия фотоупругого датчика с породным массивом мы исходили из уравнений (2.1)—(2.6), которые учитывают следующие факторы:

- а) упругие постоянные материала датчика и породы;
- б) геометрическую форму датчика;
- в) величину напряжений, действующих в породе, и величину их отношения λ ;
- г) характер механического состояния породного массива и датчика, т. е. находятся ли они в плоском напряженном состоянии или в состоянии плоской деформации.

Однако формулы (2.1)—(2.4) получены при следующих ограничениях.

1. Материал датчика и порода — однородны, изотропны и упруги. Если по отношению к материалу датчика эти условия можно всегда выполнить, то по отношению к реальным поро-

дам указанные свойства являются лишь определенным приближением.

2. Датчик установлен так, что выполняются условия плоской задачи. Очевидно, для выполнения этого ограничения необходимо, чтобы ось датчика была ориентирована по направлению в массиве, в котором действует в данном случае постоянное главное напряжение при плоском напряженном состоянии или постоянная главная деформация при плоском дифференцированном состоянии. Кроме того, датчик должен быть установлен в достаточно длинной скважине вдали от ее торца, чтобы было исключено влияние торца скважины на распределение напряжений в породе вблизи датчика. На практике последнее выполнить нетрудно.

3. Датчик прочно сцеплен (спаян) со стенками скважины, и это сцепление непрерывно по всей поверхности их соприкосновения. Это условие предъявляет повышенные требования как к методике установки датчиков, так и к качеству используемых клеев.

4. Толщина слоя клея равна нулю. Это условие практически выполнить невозможно. Методика учета толщины слоя клея будет рассмотрена ниже.

5. Вблизи датчика нет каких-либо других концентраторов напряжений, кроме самого датчика. Концентраторами напряжений могут быть близко пробуренные скважины, неоднородные включения в породе, соизмеримые по величине с датчиком, трещины в породе и т. п.

6. Длина датчика достаточно велика, так что концентрацией напряжений вблизи его торцов можно пренебречь. Для выполнения этого условия длина датчика должна быть в 5—8 раз больше его диаметра. На практике же длина датчика обычно соизмерима с его диаметром или даже меньше его.

Отметим, что второе условие на практике выполняется в двух случаях: при установке датчика вблизи стенок выработки на глубине 3—5 см в скважинах, пробуренных нормально к обнаженной поверхности вдали от почвы и кровли выработки (плоское напряженное состояние), и при установке датчика в глубоких скважинах, пробуренных параллельно стенкам длинных горных выработок вдали от их стенок и сопряжений с другими выработками (породный массив в состоянии плоской деформации).

В общем случае породный массив находится в сложном объемном напряженном состоянии. Очевидно, датчик также будет находиться в таком состоянии. Возникает вопрос — можно ли использовать в подобном случае фотоупругие датчики и если можно, то что они будут измерять.

Рассмотрим вначале фотоупругий датчик, находящийся в сложном напряженном состоянии. В теории фотоупругости [26] показывается, что оптический эффект, имеющий место

при прохождении поляризованного света через объемное напряженное тело, связан с разностью квазиглавных напряжений, действующих в плоскостях, перпендикулярных лучу света.

Совместим ось z декартовой системы координат с продольной осью датчика и назовем плоскость xoy (рис. 9), перпендикулярную оси датчика, плоскостью измерения, или плоскостью датчика. Рассмотрим принадлежащий датчику элементарный объем (см. рис. 9), напряженное состояние которого определяется следующим тензором напряжений:

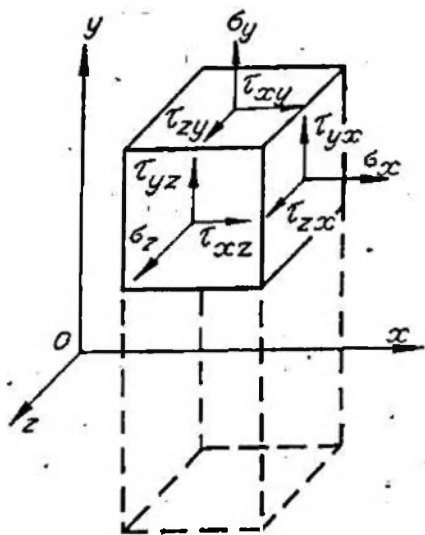


Рис. 9. Компоненты тензора напряжений.

$$\begin{vmatrix} \sigma_{x1} & \tau_{xy1} & \tau_{xz1} \\ \tau_{yx1} & \sigma_{y1} & \tau_{yz1} \\ \tau_{zx1} & \tau_{zy1} & \sigma_{z1} \end{vmatrix}. \quad (2.18)$$

Квазиглавные напряжения σ_1^i и σ_2^i для данного направления i определяются как главные напряжения, получаемые из составляющих тензора напряжений, лежащих в плоскости, перпендикулярной к данному направлению i . В нашем случае квазиглавные напряжения, соответствующие лучу света, направленному вдоль оси z , найдутся по составляющим σ_{x1} , σ_{y1} и τ_{xy1} :

$$(\sigma_1^i, \sigma_2^i)_{z1} = (\sigma_{x1} + \sigma_{y1})/2 \pm \left[\sqrt{(\sigma_{x1} - \sigma_{y1})^2 + 4\tau_{xy1}^2} \right] / 2. \quad (2.19)$$

Соответствующее этим квазиглавным напряжениям максимальное касательное напряжение может быть найдено по следующей формуле:

$$\tau_{\max} = [(\sigma_1^i - \sigma_2^i)/2]_{z1} = \left[\sqrt{(\sigma_{x1} - \sigma_{y1})^2 + 4\tau_{xy1}^2} \right] / 2. \quad (2.20)$$

По аналогии рассмотрим квазиглавные напряжения в породном массиве.

Пусть размеры датчика достаточно малы по сравнению с расстояниями в массиве, в пределах которых неоднородность напряжений в массиве становится заметной, что на практике всегда можно выполнить. В этом случае напряженное состояние массива в некоторой области вокруг датчика можно считать однородным. Такое предположение равносильно тому,

что датчик считается точкой. Поле напряжений в массиве в точке, где установлен датчик, характеризуется тремя главными напряжениями $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, произвольно ориентированными относительно датчика. Совместим ось z декартовой системы координат с осью скважины, в которой установлен датчик. Запишем в этой системе координат тензор напряжений в массиве:

$$\begin{vmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{vmatrix}. \quad (2.21)$$

Квазиглавные напряжения в массиве в плоскости измерения *хоу*, перпендикулярной оси датчика, найдутся по составляющим σ_x, σ_y и τ_{xy} :

$$\begin{aligned} (\sigma'_1, \sigma'_2)_z &= (\sigma_x + \sigma_y)/2 \pm \\ &\pm \left[\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2} \right] / 2. \end{aligned} \quad (2.22)$$

Квазиглавные напряжения — это наибольшее и наименьшее напряжения, действующие в данном сечении.

Примем следующую гипотезу: напряжения $\sigma_{z1}, \sigma_{y1}, \tau_{xy1}$ в датчике в плоскости измерения связаны с квазиглавными напряжениями (2.22) в массиве формулами (2.1), (2.3).

В соответствии с этой гипотезой можем записать:

$$q = \sigma'_1, \quad p = \sigma'_2. \quad (2.23)$$

Последние два соотношения позволяют распространить изложенную в предыдущих параграфах теорию взаимодействия фотоупругого датчика с породным массивом для плоского случая на объемное напряженное состояние породного массива.

Таким образом, фотоупругий датчик, установленный в породном массиве, находящемся в произвольном напряженном состоянии, реагирует на квазиглавные напряжения в породе, действующие в плоскости, перпендикулярной оси датчика.

§ 8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КВАЗИГЛАВНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОРОДНОМ МАССИВЕ ПО ПОКАЗАНИЯМ ФОТОУПРУГОГО ДАТЧИКА

Используя особенности оптической картины, с помощью фотоупругих датчиков можно определять:

а) направление квазиглавных напряжений в породе в плоскости измерения по ориентации осей симметрии оптической картины в датчике;

б) соответствие одного из указанных направлений наибольшему по абсолютной величине квазиглавному напряжению и другого — наименьшему. Направление первого из них совпадает с направлением главной оси симметрии, направление второго — с направлением неглавной оси симметрии оптической картины в датчике;

в) знак обоих квазиглавных напряжений в породе. При этом достаточно определить знак одного из них, знак второго находится по виду оптической картины в датчике. (Правило определения знака наибольшего квазиглавного напряжения будет изложено в гл. V);

г) величину отношения квазиглавных напряжений в породе в плоскости измерения, т. е. λ . Это можно сделать как по общему виду оптической картины в датчике, так и по точкам, положение которых зависит от величины λ ;

д) величину наибольшего квазиглавного напряжения в породе по отсчету в какой-либо одной точке оптической картины. В этом случае величина меньшего квазиглавного напряжения определяется путем умножения на λ величины большего квазиглавного напряжения;

е) величину обоих квазиглавных напряжений в породе в плоскости датчика путем одновременного отсчета порядка полосы в двух каких-либо определенных точках оптической картины в датчике.

Способы определения коэффициента λ

1. С помощью набора стандартных фотографий оптической картины в датчике.

В лабораторных условиях на специальном прессе, позволяющем проводить нагружение в двух взаимно перпендикулярных направлениях, производят нагружение породных кубиков с установленными в них фотоупругими датчиками и фотографируют оптическую картину в датчиках при разных соотношениях вертикальной и горизонтальной нагрузок. В результате получают набор оптических картин при разных значениях λ .

В процессе шахтных измерений, сравнивая оптическую картину в датчике с набором фотографий, определяют величину λ .

2. С помощью набора стандартных картин изолиний τ_{\max} в датчике при разных значениях λ . В качестве такого набора можно использовать картины изолиний τ_{\max} (см. рис. 5). В этом случае узор оптической картины в датчике сравнивают с набором картин изолиний τ_{\max} , подбирая наиболее подходящую.

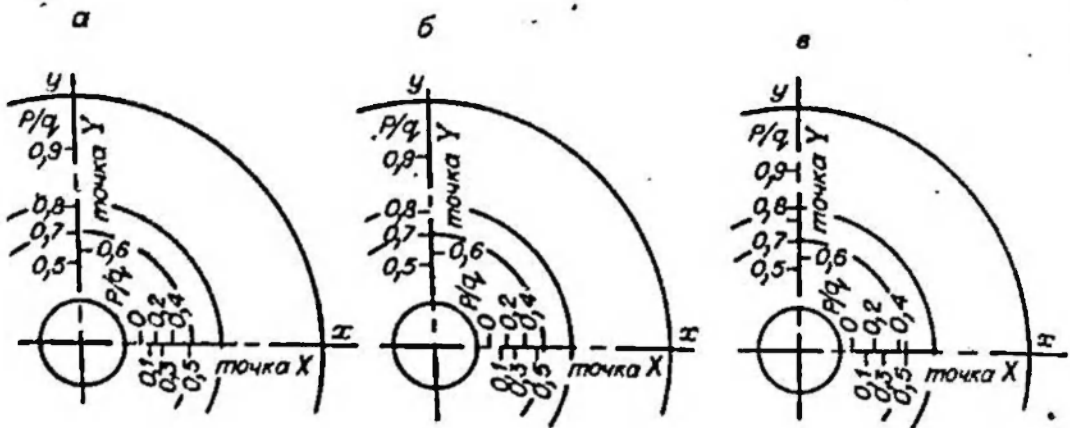


Рис. 10. Положение точек X и Y относительно делительных окружностей при $E=2 \cdot 10^5$ кгс/см² (а), $E=4 \cdot 10^5$ кгс/см² (б) и $E=6 \cdot 10^5$ кгс/см² (в).

3. По положению точек X на неглавной оси симметрии оптической картины. Этот способ применим при использовании датчиков с делительными окружностями на торцевой поверхности в случаях, когда $\lambda \leq 0,5$. X находится как точка на меньшей оси симметрии, лежащая на одной изохроме с точкой H . На рис. 10 изображено положение точки X относительно края внутреннего отверстия для датчика из стекла с модулем упругости $E_1 = 6,3 \cdot 10^5$ кгс/см² с параметром $m = \bar{k}_1 / \bar{k}_1 = 6$ и делительными окружностями радиусов $2,67 R_1$ и $3,5 R_1$ [6].

4. По положению точек Y на главной оси симметрии оптической картины. Способ применим при $0,5 \leq \lambda \leq 1$. Положение точки Y относительно внешнего края датчика с параметром $m=6$ показано на рис. 10 [6].

5. По положению точки O на внутреннем контуре датчика. Эта точка является точкой с нулевым порядком изохромы. Положение точки O при различных значениях λ для датчика с параметром $m=6$ изображено на рис. 11. Использование этой точки удобно, когда общий порядок полос в датчике мал и вблизи внутреннего отверстия наблюдается небольшое число изохром. Этот способ особенно приемлем для датчиков с параметром $m=2 \div 3$.

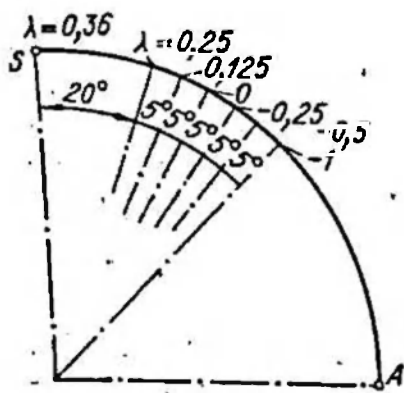


Рис. 11. Положение точки O при различных значениях λ .

6. По величине отношения отсчетов в двух точках оптической картины: $S/A, D/A, D/S, F/C$. Соответствующие графики приведены на рис. 12. Следует иметь в виду, что при использовании отсчетов в точке S результат может быть неоднозначным. В этом случае для однозначности ответа необходимо анализировать общий вид оптической картины.

7. При $\lambda \geq 0$ часто требуется установить, выполняется или нет точное равенство $\lambda = 0$. Критерием в этом случае являются точки N на неглавной оси симметрии. Отсутствие этих точек, т. е. точек схода полос, говорит о том, что выполняется условие $\lambda > 0$.

Точность изложенных способов определения величины λ неодинакова. Наиболее точны способы, основанные на использовании точек X и Y , но только при условии, если полярископ, с помощью которого ведется наблюдение, снабжен шкалой, проецирующей в процессе наблюдения на оптическую картину в датчике. При наличии шкалы точность этих методов может быть доведена до 5%, при отсутствии — не выше 20—25%.

Высокая точность может быть получена, если имеется отсчет в двух точках. При использовании полярископа с компенсатором точность этого способа не ниже 3—5%. Точность остальных способов колеблется от 15 до 25%.

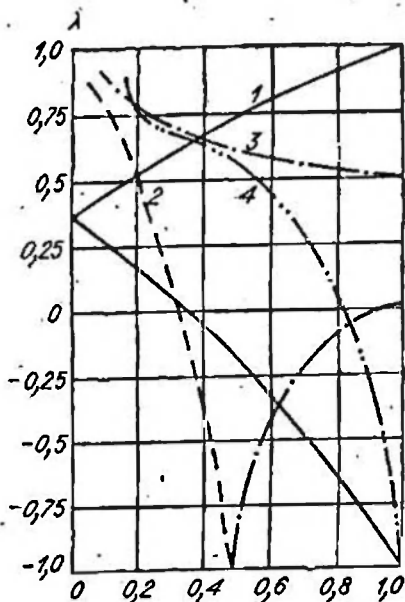


Рис. 12. Графики для определения коэффициента λ по отношению отсчетов в точках S/A (1), D/A (2), D/S (3), F/C (4).

Определение величины наибольшего квазиглавногo напряжения по отсчету в одной точке

Для определения величины наибольшего квазиглавногo напряжения в породном массиве достаточен отсчет по одной какой-либо точке оптической картины в датчике. Однако удобнее использовать вполне определенные точки, которые просто находить и фиксировать на оптической картине. Можно рекомендовать следующие: A , K , C , B , H , G , D .

На практике чаще используются точки, в которых отсчет не зависит от величины коэффициента λ . В этом смысле из названных точек удобна только A . Можно указать еще несколько точек, отсчет в которых не зависит от величины λ или данная зависимость незначительна. Это точки на неглавной оси симметрии вблизи осевого отверстия Q ($r = 1,29 R_1$, $\theta = 0^\circ$), R ($r = 1,32 R_1$, $\theta = 0^\circ$) и M ($r = 1,75 R_1$, $\theta = 0^\circ$).

Величину наибольшего квазиглавногo напряжения в породном массиве рекомендуется определять по следующей формуле:

$$q = \mu k_1 k_2 k_3 k_4 k_5 l q_0 \quad (2.24)$$

где k_1 — коэффициент, учитывающий влияние величины отношения главных напряжений λ ; k_2 — коэффициент, учитывающий влияние жесткости датчика $k = E_1/E$; k_3 — коэффициент, учитывающий влияние коэффициента Пуассона породного массива ν ; k_4 — коэффициент, учитывающий влияние коэффициента Пуассона материала датчика ν_1 ; k_5 — коэффициент, учитывающий влияние безразмерного параметра $m = R_1/R_2$; l — коэффициент, учитывающий влияние концентрации напряжений у торцов датчика; μ — коэффициент, учитывающий влияние слоя клея; q_0 — величина наибольшего квазиглавного напряжения, соответствующая тому же порядку полосы, что и величина q , но измеренная эталонным датчиком в эталонном материале при эталонных условиях, т. е. при $\mu = k_1 = k_2 = k_3 = k_4 = k_5 = 1$.

В настоящей работе приняты следующие параметры эталонного датчика и эталонного материала:

E_1 , кгс/см ²	ν_1	E , кгс/см ²	ν	$k = E_1/E$	R_1 , см	R_2 , см	m	C , мкм·см/кгс	l , см
$6,3 \cdot 10^5$	0,21	$1,575 \cdot 10^5$	0,25	4	1,8	0,3	6	2,65	3

Эталонные условия: а) толщина слоя клея равна нулю, т. е. $\mu = 1$; б) датчик и исследуемый материал находятся в условиях плоской деформации; в) внешнее поле, приложенное к исследуемому породному образцу, является одноосным, т. е. $\lambda = 0$; г) датчик работает в отраженном свете, т. е. $d = 2l$, где d — длина пути света в датчике, l — длина датчика.

Для эталонного датчика, эталонного материала и эталонных условий все коэффициенты в формуле (2.24), за исключением l , равны единице.

Таблица 7

Теоретическая цена полосы датчиков при $m = 6$

№ точки	$a = r/R_1$	θ , град	Буквенное обозначение точки	Теор. цена полосы эталонного датчика в эталонном материале при эталонных условиях α_0 , кгс/см ² /пол.	№ точки	$a = r/R_1$	θ , град	Буквенное обозначение точки	Теор. цена полосы эталонного датчика в эталонном материале при эталонных условиях α_1 , кгс/см ² /пол.
1	2,67	0	B	26,8	11	1,67	38	K	17,1
2	3,50	0	C	26,8	12	2,00	38	K'	17,6
3	2,67	40	G	18,6	13	1,00	40		17,6
4	3,50	40	H	20,4	14	1,29	40		17,0
5	2,67	90	E	40,5	15	1,32	40		17,0
6	3,50	90	F	32,0	16	1,75	40		17,0
7	1,00	0	A	8,0	17	1,00	90	S	21,6
8	1,29	0	Q	16,0	18	1,29	90		84,0
9	1,32	0	R	17,0	19	1,32	90		93,5
10	1,75	0	M	26,0	20	1,75	90		75,0

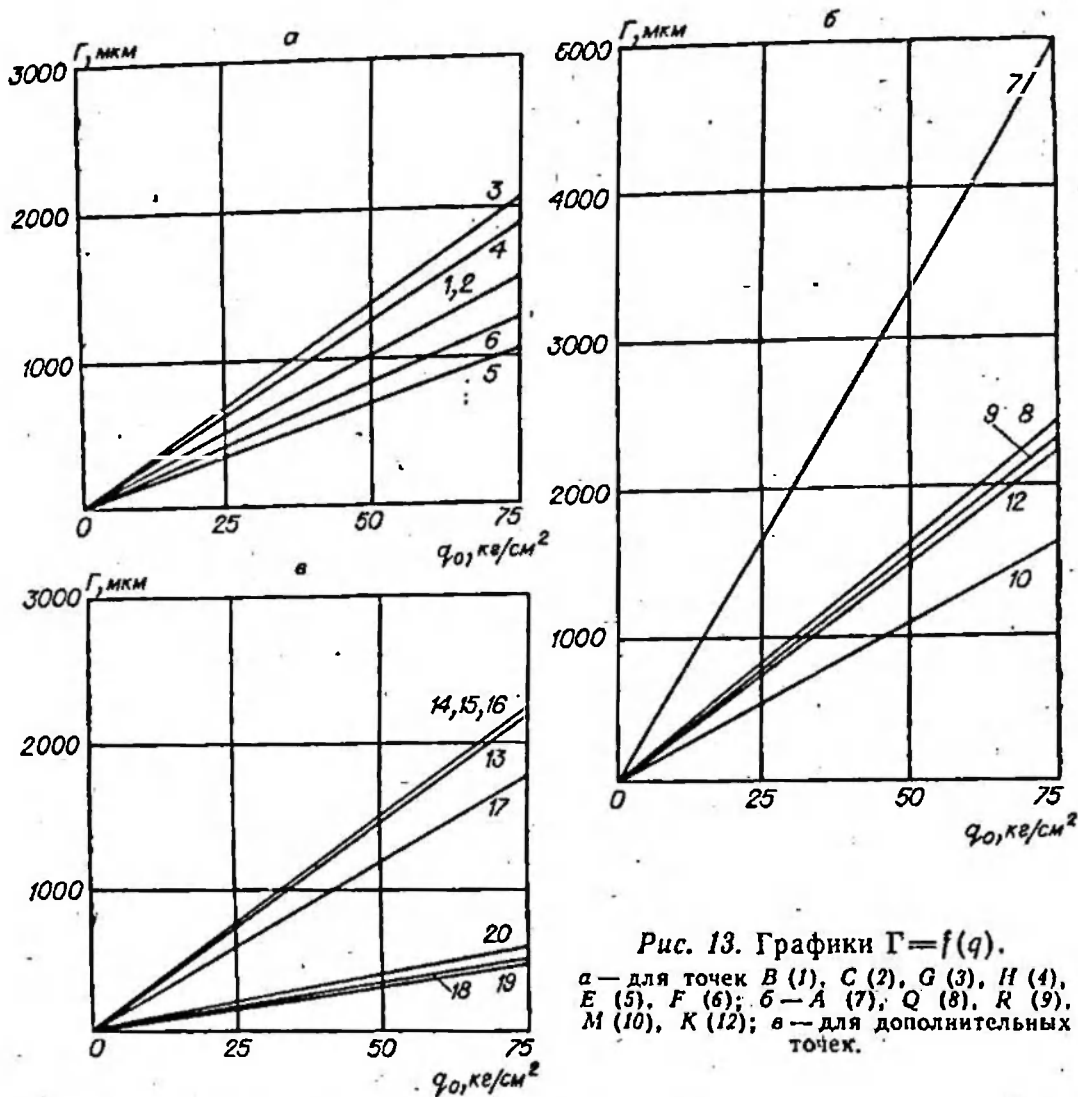


Рис. 13. Графики $\Gamma = f(q_0)$.

а — для точек В (1), С (2), G (3), H (4), Е (5), F (6); б — А (7), Q (8), R (9), М (10), К (12); в — для дополнительных точек.

В формулу (2.24) не введен коэффициент, учитывающий механическое состояние массива и датчика, так как соответствующая поправка не превышает 1,8%.

Величина q_0 может быть определена по одной из следующих формул:

$$q_0 = 2\tau_{\max}^0 / A_0, \quad (2.25)$$

$$q_0 = n\lambda / CdA_0, \quad (2.26)$$

$$q_0 = \Gamma / CdA_0, \quad (2.27)$$

где A_0 — некоторый коэффициент. Остальные величины соответствуют обозначениям § 1—3 гл. II.

Вычисленные по последней из этих формул графики для определения величины q_0 в зависимости от разности хода лучей Γ для ряда точек, приведенных в табл. 7, изображены на рис. 13. Это прямые, проходящие через начало координат. Обозначим

$$\alpha_0 = \lambda / CdA_0 \quad (2.28)$$

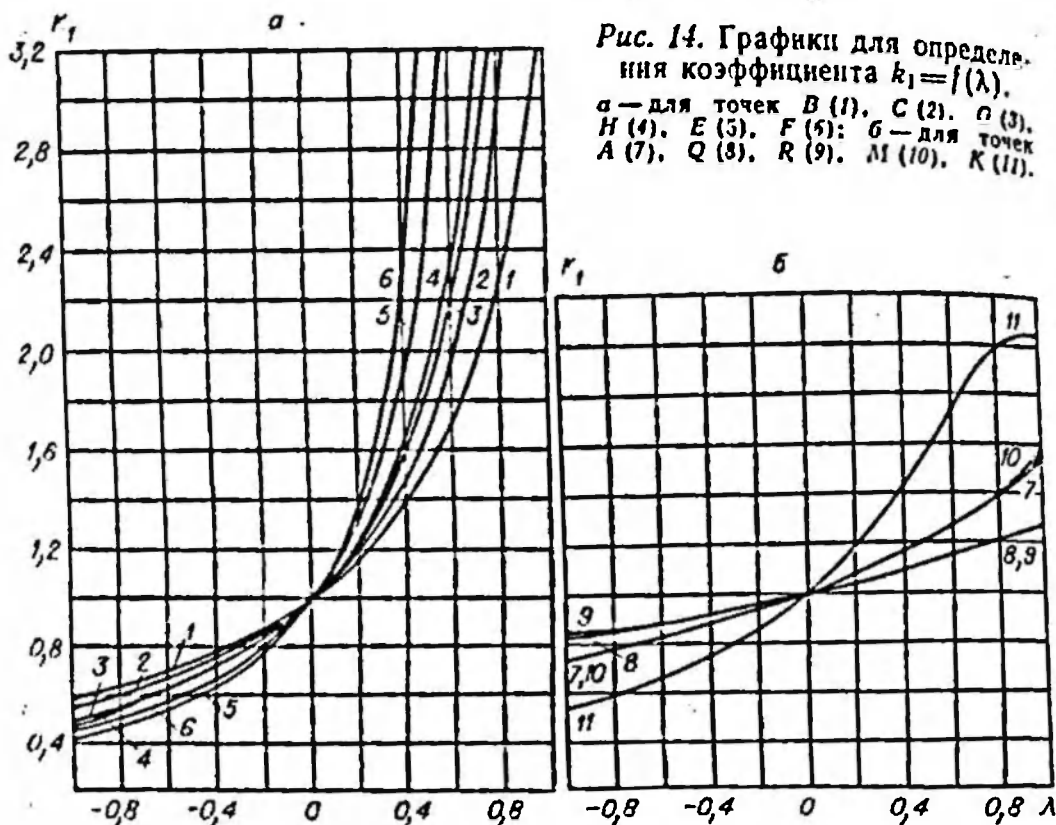


Рис. 14. Графики для определения коэффициента $k_1 = f(\lambda)$.
 а — для точек В (1), С (2), Г (3), Н (4), Е (5), F (6); б — для точек А (7), Q (8), R (9), М (10), К (11).

и формулу (2.26) перепишем в следующем виде:

$$q_0 = \alpha_0 n, \tag{2.29}$$

где n — порядок полосы в точке отсчета.

Последняя формула устанавливает связь между напряжениями в породе при эталонных условиях и порядком полосы в точке отсчета. Коэффициент пропорциональности α_0 будем называть теоретической ценой полосы для данной точки отсчета эталонного датчика в эталонном материале при эталонных условиях. Значения α_0 можно находить по графикам (см. рис. 13). Для некоторых точек значения α_0 приведены в табл. 7.

С учетом (2.27), (2.28) и (2.29) формулу (2.24) можно записать в виде

$$q = \mu k_1 k_2 k_3 k_4 k_5 \alpha_0 n. \tag{2.30}$$

Коэффициенты k_i , входящие в формулы (2.24) и (2.30), рассчитаны на ЭВМ М-20 Вычислительного центра СО АН СССР для ряда точек, приведенных в табл. 7. По результатам расчетов построены графики (рис. 14—16), где эталонные значения параметров следующие: $\lambda = 0, k = 4, \nu = 0,25, \nu_1 = 0,21, m = 6$. Они характеризуют отклонение коэффициентов k_i при изменении только одного из трех параметров при эталонных значениях остальных. При одновременном изменении и других

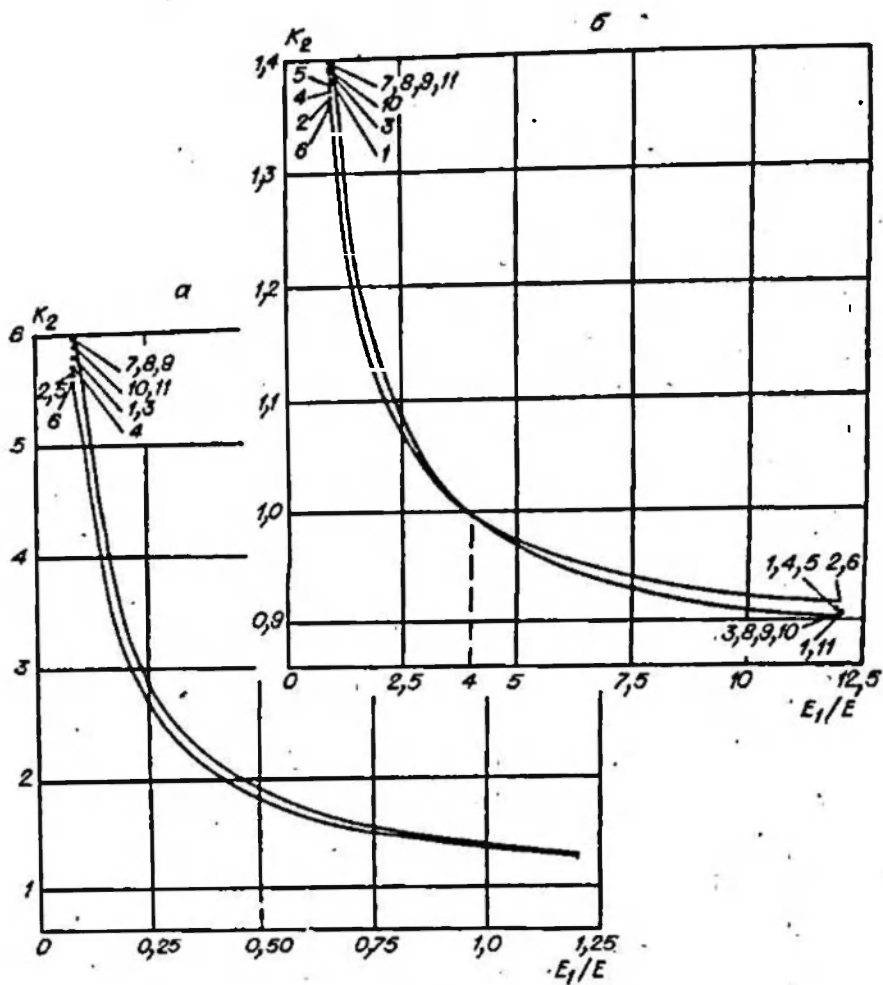


Рис. 15. Графики для определения коэффициента $k_2 = f(E_1/E)$.
 а — при $0.1 \leq E_1/E \leq 1.2$; б — при $1 \leq E_1/E < 12$.

параметров значения коэффициентов k_i будут несколько отличаться от тех значений, которые получаются по графикам. Однако эти отклонения незначительны (по крайней мере, при небольших отклонениях значений параметров от эталонных) и в дальнейшем не учитываются.

При $\lambda < 0$ величина коэффициента k_1 довольно медленно изменяется с изменением λ , при $\lambda > 0$, наоборот, для большинства рассмотренных точек k_1 быстро возрастает с увеличением λ (см. рис. 14). Наименьшая зависимость q от λ наблюдается в точках Q и R, несколько большая — в точках M и K.

Из графиков для коэффициента k_2 (см. рис. 15) видно, что при жесткости датчика $E_1/E > 4$ величина k_2 почти не изменяется, что согласуется с приведенным выше анализом влияния жесткости датчика на точность измерения. Зависимость коэффициента k_2 от координат точек отсчета незначительна.

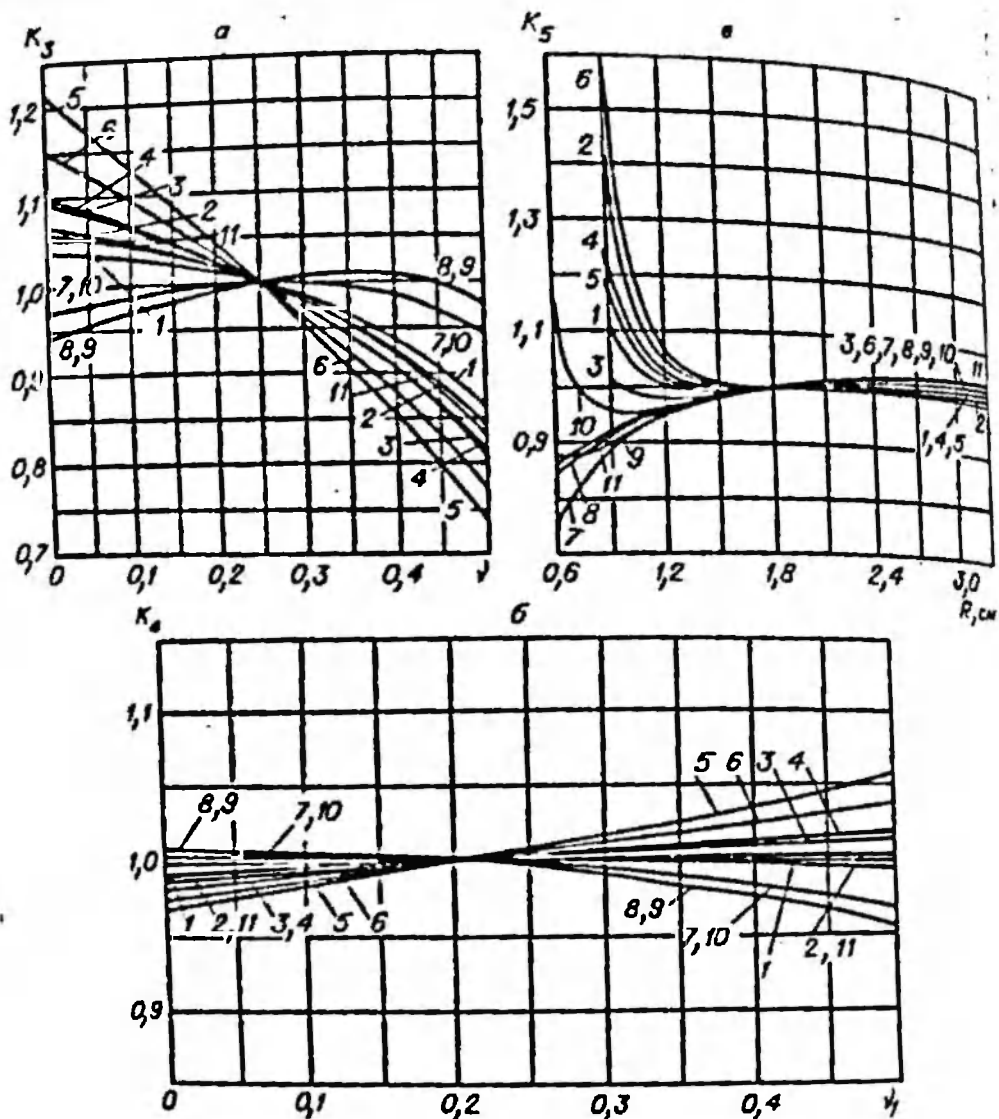


Рис. 16. Графики для определения коэффициентов $k_3=f(v)$ (а), $k_4=f(v)$ (б) и $k_5=f(m; R_1=0,3 \text{ см})$ (в).

Как следует из графиков для коэффициентов k_3 и k_4 (см. рис. 16, а, б), влияние коэффициента Пуассона массива несколько больше, чем влияние коэффициента Пуассона материала датчика. Заметим, что в диапазоне значений коэффициентов Пуассона, соответствующих реальным горным породам, $k_3 < 1,1$.

Влияние параметра m учитывается коэффициентом k_5 , графики для определения которого изображены на рис. 16, в. Надо только иметь в виду, что эти графики построены при постоянном значении радиуса внутреннего отверстия $R_1=0,3 \text{ см}$, следовательно, при разных значениях m точки, лежащие на графиках, соответствуют разным точкам на оптической карте, хотя и близко расположенным. При $m > 5$ величина коэффициента k_5 не превышает 1,05.

Одновременное определение обоих квазиглавных напряжений по отсчетам в двух точках

По отсчетам в точках A и S

$$p, q = \lambda [(n_A + n_S) \beta_1 \mp (n_A - n_S) \beta_2] / 2Cd. \quad (2.31)$$

По отсчетам в точках C и F :

если наибольшее главное напряжение в породе сжимающее, т. е. $q < 0$, то

$$p = -\lambda (n_C \alpha_1 + n_F \alpha_2) / 2Cd, \quad q = \lambda (n_C \alpha_2 + n_F \alpha_1) / 2Cd, \quad (2.32)$$

если наибольшее главное напряжение в породе растягивающее, т. е. $q > 0$, то

$$p = \lambda (n_C \alpha_1 + n_F \alpha_2) / 2Cd, \quad q = -\lambda (n_C \alpha_2 + n_F \alpha_1) / 2Cd. \quad (2.32a)$$

Здесь n_A, n_S, n_C, n_F — отсчеты соответственно в точках A, S, C, F ; $\beta_1, \beta_2, \alpha_1, \alpha_2$ — некоторые коэффициенты, графики для определения которых приведены на рис. 17; λ — длина волны света.

Сделаем несколько замечаний относительно использования отсчетов в точках A и S .

1. Формула (2.31) связывает величину напряжения в породе с отсчетом в точках A и S . Так как вблизи этих точек градиент изменения наиболее высокий, то надежные отсчеты по ним можно получить лишь при малых приростах напряжений, когда порядок изохромы не превышает нескольких единиц. При высоких порядках полос в точках A и S затруд-

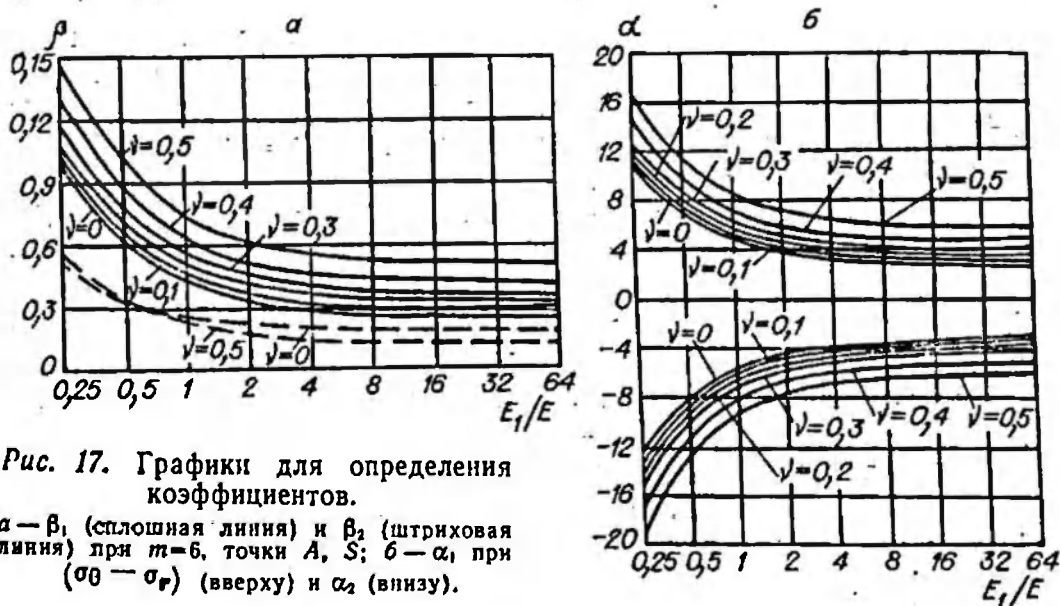


Рис. 17. Графики для определения коэффициентов.

a — β_1 (сплошная линия) и β_2 (штриховая линия) при $m=6$, точки A, S ; $б$ — α_1 при $(\sigma_0 - \sigma_T)$ (вверху) и α_2 (внизу).

нительно подсчитать целый порядок полос, а следовательно нет гарантии от грубых ошибок. Далее, так как точки A и B расположены на контуре внутреннего отверстия датчика, то на порядок полосы в них очень сильно влияют малейшие отклонения формы отверстия от круговой, а также различные шероховатости, что может вести к грубым ошибкам.

2. При использовании полярископов с компенсаторами типа Бабице, Берека, и др., т. е. в тех случаях, когда в точках отсчета измеряется полная разность хода лучей, а не порядок полосы, следует учитывать, что компенсатор рассчитан на конечное число полос — обычно 2,5 или 4. Порядок в точке A даже при умеренных приростах напряжений может значительно превосходить возможности компенсатора.

3. При использовании формулы (2.31) знаки величин n_A и n_B следует принимать такие же, как знаки напряжений σ_A и σ_B в точках A и B , т. е. знаки n_A и n_B совпадают со знаками σ_{0A} и σ_{0B} . Методы определения знаков последних будут рассмотрены в гл. IV.

Приведенные выше для формул (2.31), (2.32) и (2.33) правила знаков справедливы только в случае использования датчиков из положительного оптически чувствительного материала. Формулы вида (2.31) и (2.32) могут быть выписаны и для других точек.

§ 9. УЧЕТ ВЛИЯНИЯ СЛОЯ КЛЕЯ

В формулах (2.24) и (2.30) влияние слоя клея учитывается коэффициентом μ .

Кольцевой фотоупругий датчик и слой клея вокруг него будем рассматривать как двухслойное кольцо, вставленное в скважину. Для простоты можно считать, что материал слоя клея является упругим, однородным и изотропным, а на контакте между слоем клея и стенками скважины и слоем клея и датчиком выполняются условия полного сцепления.

Задача о многослойном кольцевом включении, частными случаями которой являются приведенная в § 1 настоящей главы задача об однослойном кольце и указанная выше задача о двухслойном кольцевом включении, рассмотрена Г. Н. Савиным [21]. Из решения задачи о двухслойном кольцевом включении следует, что напряжения в породе вокруг датчика и слоя клея задаются формулами (2.2), а напряжения в каждом из колец — формулами, аналогичными (2.1). Однако коэффициенты в этих выражениях находятся из системы 15 линейных алгебраических уравнений, вследствие чего выражения для них очень громоздки и здесь не приводятся.

На основе указанной выше задачи выведены формулы для вычисления коэффициента μ и произведен расчет его численных значений на ЭВМ БЭСМ-4М при следующих исходных данных:

для датчика — $m=6$, $\bar{R}=1,8$ см, $R_1=0,3$ см, $t=3$ см, $E_1=6,3 \cdot 10^5$ кгс/см², $\nu_1=0,21$;

для породы — $E=1,575 \cdot 10^5$ кгс/см², $\nu=0,25$;

для клея — $E_2=0,1 \cdot 10^5$; $0,5 \cdot 10^5$; $3,15 \cdot 10^5$; 10^6 кгс/см²; $\nu_2=0,2$ и $0,36$, $\Delta l=0,5$; $1,0$; $2,0$ и $4,5$ мм (здесь Δl — толщина слоя клея).

За эталонные значения при расчете приняты $E_2=1,575 \cdot 10^5$ кгс/см², $\nu_2=0,25$, $\lambda=0$.

По результатам расчетов построены графики для определения μ в ряде частных случаев (рис. 18).

Из численных расчетов и графиков можно сделать следующие выводы о влиянии слоя клея на показания фотоупругого датчика.

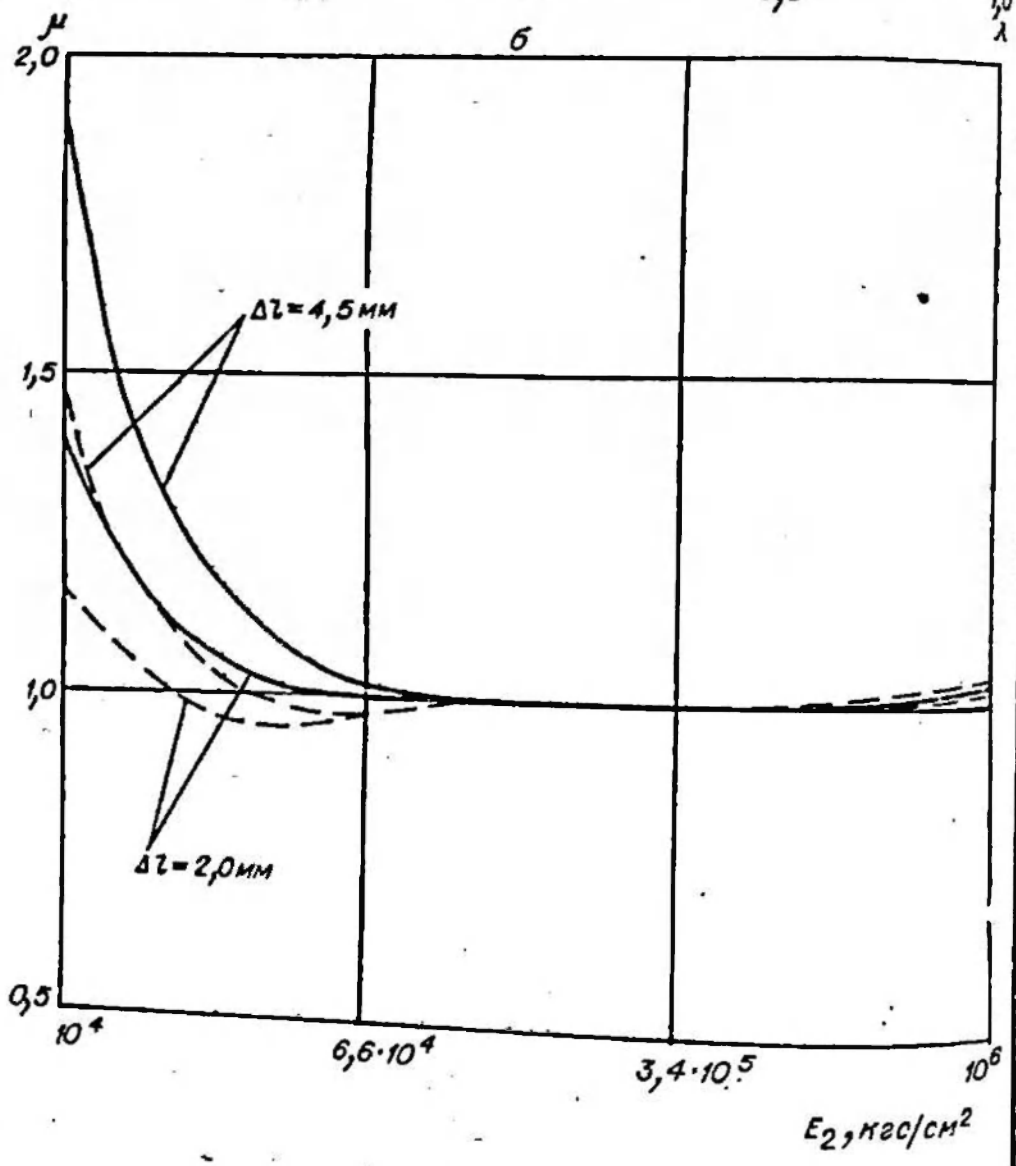
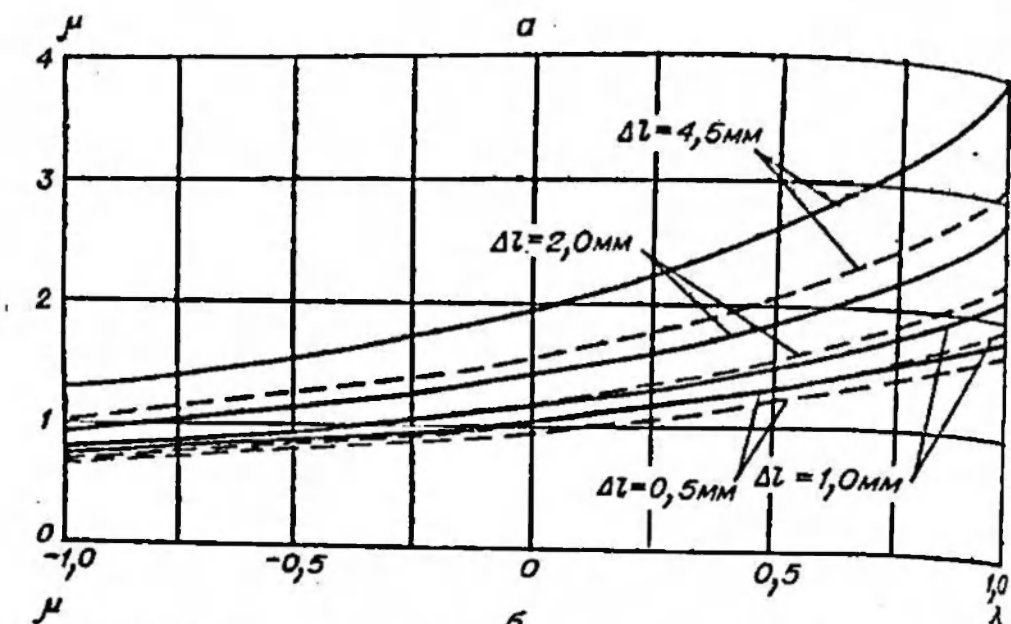
1. Толщина слоя клея существенно влияет на показания датчика, и это влияние необходимо учитывать. При толщине слоя, не превышающей нескольких миллиметров, характер оптической картины в датчике не изменяется, но вычисленные без учета влияния клея величины напряжений в породе в большинстве случаев оказываются заниженными. С увеличением толщины слоя клея ошибка при неучете его влияния увеличивается.

2. Величина μ зависит от координат точки отсчета. Чем ближе точка отсчета к внутреннему отверстию датчика, тем меньше влияние клея. Так, величина коэффициента μ ближе к единице для точек A и K , чем для точек H , C и F .

3. Наибольшее влияние на величину μ оказывает коэффициент λ , особенно в случае $\lambda > 0$. С увеличением $|\lambda|$ ошибка во всех случаях возрастает (по сравнению с одноосным напряженным состоянием, принятым за эталонное). При $\lambda=0$, $E_2=0,5 \cdot 10^5$ кгс/см² и толщине слоя клея 2 мм величина $\mu \approx 1$ и колеблется в пределах $1,144 \leq \mu \leq 0,956$. При $\lambda=-1$ и тех же значениях модуля упругости и толщины слоя клея для точек A $0,685 \leq \mu \leq 1,036$, для точек H $0,512 \leq \mu \leq 0,576$. При $\lambda=1$ и $E_2=10^4$ кгс/см² для точек A $1,710 \leq \mu \leq 3,956$. При $\lambda=i$ и $E_2=0,5 \cdot 10^5$ кгс/см² для точек A $1,428 \leq \mu \leq 1,806$, для точек H $5,739 \leq \mu \leq 7,258$.

Анализ расчетов и графиков показал, что влияние величины λ на коэффициенты μ и k_1 примерно одинаково. Иными словами, коэффициент k_1 автоматически учитывает влияние λ и на коэффициент μ . Поэтому в первом приближении можно пользоваться значениями коэффициента μ при $\lambda=0$.

4. С увеличением жесткости слоя клея ошибка измерения уменьшается (разумеется, если при этом модуль упругости клея не превосходит модуль упругости материала датчика).



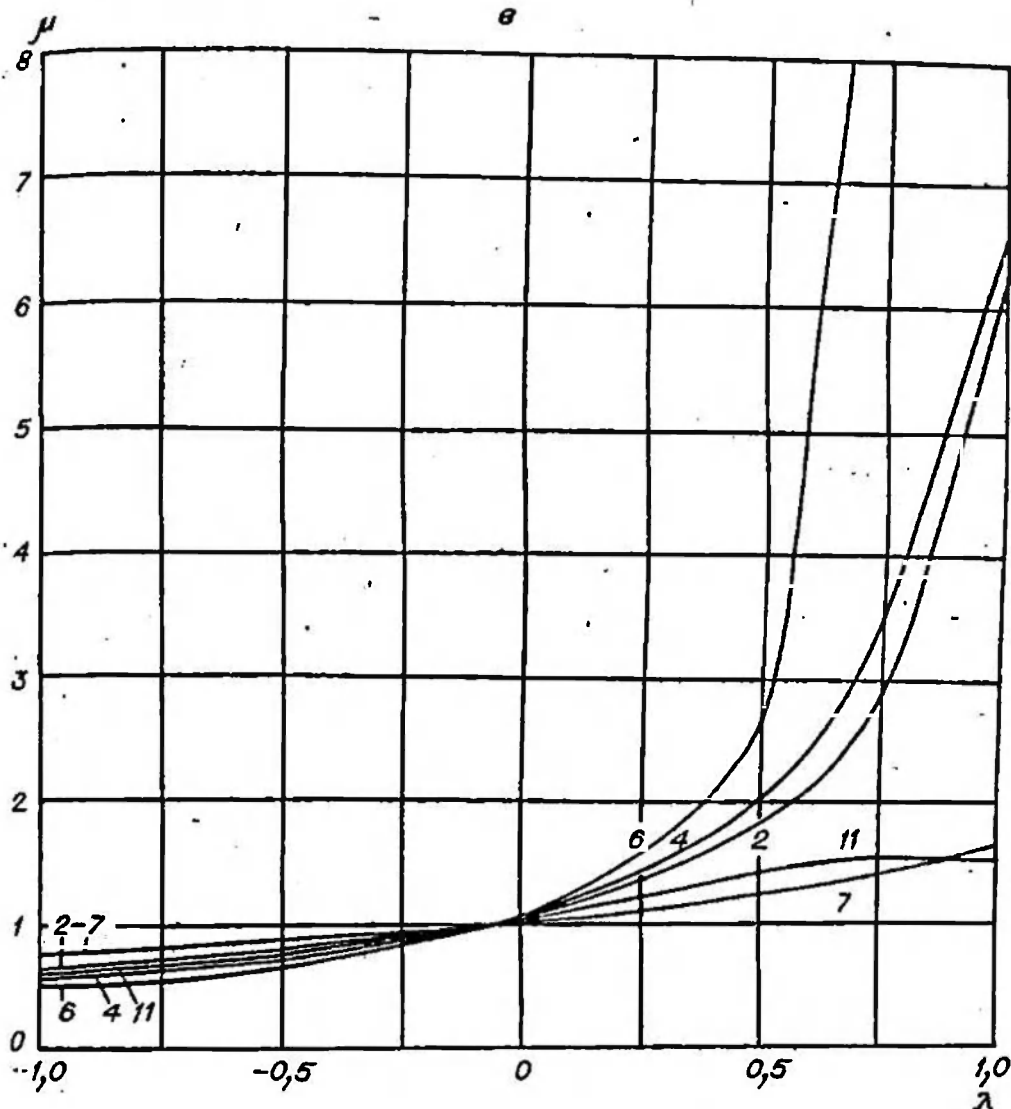


Рис. 18. Графики для определения коэффициента μ .

а — $\mu = f(\lambda, \nu_2, \Delta l)$ для точек А, $E_2 = 10^4$ кгс/см²; б — $\mu = f(E_2, \nu_2, \Delta l)$ для точек А, $\lambda = 0$; в — $\mu = f(\lambda)$ для точек С (2), Н (4), F (6), А (7), К (11), $E_2 = 5 \cdot 10^4$ кгс/см², $\Delta l = -2,0$ мм. Во всех случаях $\nu_2 = 0,2$ (сплошные линии) и $\nu_2 = 0,36$ (штриховые линии).

5. Увеличение коэффициента Пуассона клея уменьшает ошибку измерения при мягких клеях и почти не сказывается при жестких.

6. Влияние слоя клея на показания датчика незначительно, и им можно пренебречь, если модуль упругости слоя клея близок по величине к модулю упругости породы или к модулю упругости материала датчика.

ТАРИРОВАНИЕ ДАТЧИКОВ И РАСЧЕТНЫЕ ФОРМУЛЫ

§ 1. МЕТОДИКА СНЯТИЯ ПОКАЗАНИЙ ДАТЧИКА

При наблюдении нагруженного датчика в поляризованном свете в нем видна характерная оптическая картина. Следует помнить, что узор оптической картины зависит от того, является ли нагрузка одноосной или двухосной, причем в случае двухосной нагрузки узор зависит от величины отношения нагрузок в двух взаимно перпендикулярных направлениях, т. е. от коэффициента гидростатичности λ . При любом изменении нагрузки вид оптической картины в датчике изменяется.

При наблюдении в белом свете с помощью полярископа с круговой поляризацией и темным полем при одноосном нагружении по мере увеличения нагрузки темный фон датчика начинает светлеть, затем в направлениях, примерно под углом 45° к линии нагружения, вблизи внутреннего края датчика появляются четыре пятна, сначала светло-желтые, впоследствии постепенно переходящие в бурые. Это точки K . Одновременно на внутренней кромке датчика по линии, перпендикулярной линии нагружения, также появляется буроватая окраска, постепенно меняющаяся на красную. Это точки A . По мере увеличения нагрузки четыре бурых пятна (точки K) становятся красными, что соответствует первому порядку. Одновременно вокруг точек A появляются красные дужки, а сами точки A приобретают синюю окраску. При дальнейшем увеличении нагрузки внутри красных пятен в точках K появляется синяя окраска, а красные пятна превращаются в окружности, которые вблизи точек A соединяются между собой. Синий цвет в центре пятен постепенно переходит в желтый, затем в красный. Это второй порядок по точкам K . К этому времени число красных дужек вокруг точек A увеличивается. При дальнейшем нагружении оптическая картина формируется полностью и состоит из четырех лепестков, ориентированных под углом $38-40^\circ$ к линии нагружения, и из двух узких вытянутых лепестков, ориентированных вдоль линии нагружения. В тех случаях, когда оптическая картина сформировалась полностью, т. е. в точках K появилась полоса второго поряд-

ка, методика снятия отсчетов сравнительно проста. По направлению осей симметрии оптической картины устанавливается направление главных напряжений, действующих в исследуемой породе, а также — какое из двух направлений, совпадающих с направлениями осей симметрии, соответствует наибольшему по абсолютной величине напряжению в породе вдали от датчика и какое — наименьшему. Для наблюдателя, имеющего опыт работы с датчиками, это не представляет труда. В частности, при нагрузках, близких к одноосной, направление наибольшего напряжения (наибольшей внешней нагрузки на образец) совпадает с осью симметрии, проходящей через два узких лепестка. В общем случае можно рекомендовать следующее правило. Изохромы зарождаются на внутреннем краю датчика в точках, соответствующих наименьшей оси симметрии (направление наименьшего главного напряжения в породе или направление меньшей из двух взаимно перпендикулярных нагрузок на образец), т. е. в точках A , и двигаются к периферии датчика, постепенно стягиваясь к наибольшей оси симметрии.

Знак наибольшего главного напряжения в породе, как уже отмечалось, находится следующим образом. После определения большей оси симметрии оптическая ось полярископа совмещается с этим направлением. Вращение анализатора по часовой стрелке либо смещает полосы на меньшей оси к центру, т. е. порядок полосы уменьшается (наибольшее главное напряжение в породе сжимающее), либо смещает полосы на меньшей оси к периферии датчика, т. е. порядок полосы возрастает (наибольшее главное напряжение в породе будет растягивающим).

Знак наименьшего главного напряжения определяют по знаку наибольшего главного напряжения и по виду оптической картины (по знаку λ).

Когда порядок полосы в датчике по точкам K составляет 0,7—1,5, отличить главную ось симметрии от неглавной становится затруднительно. Обычно здесь помогает накопленный опыт расшифровки оптической картины. При лабораторных исследованиях в этом случае можно синхронно увеличить внешние нагрузки и определить оси симметрии при большем числе полос в датчике. Взятие же отсчетов по различным точкам датчика и в этом случае не вызывает затруднений.

Когда порядок полосы менее 0,7 и особенно менее 0,5, определение как положения осей симметрии, так и порядка полосы в точках по картине полос становится практически невозможным без полярископов с компенсаторами.

Изложенное выше относится к случаю применения полярископа с круговой поляризацией. При использовании полярископа с плоской поляризацией на цветную картину изохромы в датчике накладывается картина изоклин.

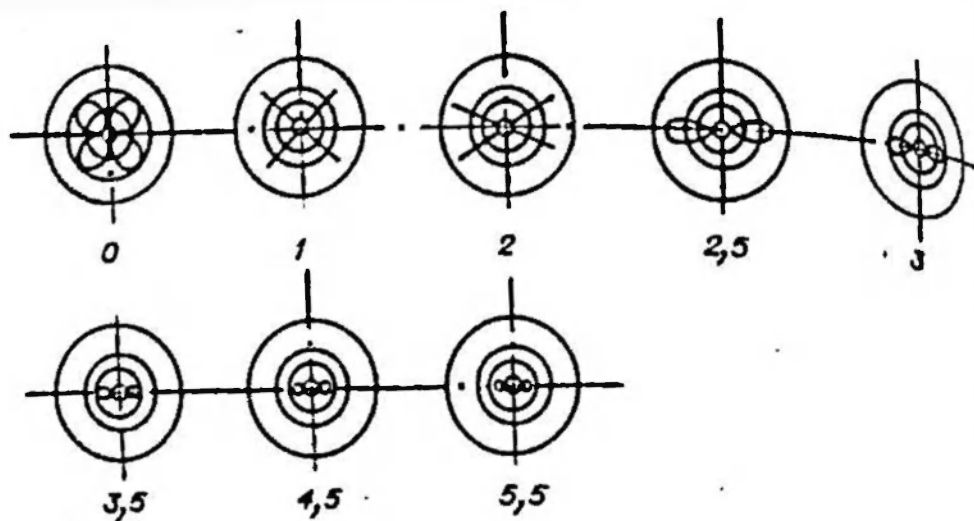


Рис. 19. Экспериментальная картина темных линий в датчике при одноосном нагружении (цифрами обозначено напряжение, кгс/см²).

При отсутствии нагрузки в фотоупругом датчике при наблюдении с помощью плоского поляризатора видны четыре темные линии вблизи осевого отверстия датчика, которые по мере удаления от краев отверстия закручиваются в четыре кольца. При нагрузке эти кольца разрываются, образуя своего рода крест, который при дальнейшем увеличении нагрузки стягивается в две петли, общая ось которых ориентирована перпендикулярно к линии действия наибольшей нагрузки. Остаточные пятна от этих петель наблюдаются при появлении в точках K полосы первого порядка. Четко указанные линии наблюдаются при положении оптической оси поляризатора под углом 45° к направлениям главных напряжений в породе (к направлениям осей симметрии оптической картины).

На рис. 19 приведены картины этих линий при одноосном нагружении образца с датчиком. Здесь же нанесены две кольцевые делительные окружности.

Строго симметричной оптическая картина в датчике наблюдается только при тщательной установке датчика в скважине. На практике же часто наблюдается асимметрия оптической картины. Виды асимметрии самые различные:

— порядок изохром по одну сторону от главной или неглавной осей симметрии больше на $0,1 \div 0,5$ полосы, чем порядок полосы в смежных точках по другую сторону от той же оси симметрии;

— порядок изохром в одном из четырех квадратов выше или ниже, чем в остальных трех, на $0,1 \div 0,5$ полосы;

— на одной половине картины относительно одной из осей симметрии наблюдается расположение изохром, соответствующее, например, строго одноосному полю напряжений в породе, а на другой — соответствующее двухосному полю напряжений, например $\lambda = 0,1$;

— половина или четверть картины совсем не наблюдается или порядок изохром в 2—3 раза ниже, чем на остальной части картины (на практике этот случай наблюдается очень редко);

— изохромы в одном из квадратов имеют значительно больший порядок, чем в трех других (случай также наблюдается редко);

— изохромы в одном или двух квадратах сильно вытянуты;

— другие виды асимметрии.

На симметричность оптической картины в датчике влияют отклонение геометрической формы пластины от идеального прямоугольного параллелепипеда, особенно выпуклость торцов; местные включения в породе или материале пластины — галька, крупный щебень в бетоне, сучки в дереве; качество приклеивания датчиков, особенно сплошность клеевого слоя и равномерность его толщины; наличие различных неровностей на стенках отверстия под датчик и др.

Заметим, что на форму лепестков оптической картины, а также в ряде случаев и на ее симметричность влияет анизотропность исследуемой породы и неоднородность поля напряжения вблизи датчика.

В связи с наличием асимметрии оптической картины возникает вопрос о порядке усреднения отсчетов по нескольким точкам. В подавляющем большинстве случаев точность отсчета, усредненного по многим точкам, выше, чем точность отсчета по одной точке. При усреднении отсчеты по отдельным точкам, резко отличающиеся от средних, следует отбрасывать.

Рассмотрим некоторые особенности порядка усреднения отсчетов по оптической картине в кольцевом фотоупругом датчике. Будем называть одноименными точки, обозначенные одной и той же буквой (см. рис. 6). Так, точек A, S, B, C, E, F, X, Y на оптической картине по две, точек K, H, G, D — по четыре. Каждая группа одноименных точек характеризуется своей собственной ценой полосы, отличной от цены полосы для любой другой группы одноименных точек. Теоретическая цена полосы для ряда точек приведена в табл. 7.

Усредненный отсчет по нескольким группам точек можно вычислить по следующей формуле:

$$q_1 = t^{-1} \sum_{j=1}^i \left[(\omega_a / l_a) \sum_{i=1}^{l_a} n_{a_i} \right], \quad (3.1)$$

где i — порядковый номер точки в одноименной группе точек. Для точек K, H, G, D $i=1, 2, 3, 4$, для остальных точек $i=1, 2$; a — буквенный индекс группы одноименных точек. Для точек A имеем $a=A$, для точек K аналогично $a=K$ и т. д. Соответственно для точек A_i имеем $a_i=A_i$, для точек H_i имеем $a_i=H_i$.

и т. д.; n_{a_i} — порядок полосы (отсчет) в i -й точке a -й группы; l_a — количество точек в a -й группе, принятых к учету; ω_a — цена полосы для точек a -й группы, кгс/см²; l — число групп одноименных точек, принятых к учету; j — порядковый номер группы, $j=1, 2, 3, \dots$

Пример. Отсчеты взяты по точкам A_1, A_2 и K_1, K_2, K_3, K_4 . Все отсчеты приняты к учету. Имеем $a=A, K$; $l_A=2, l_K=4$; $\omega_a=\omega_A, \omega_K$; $l=2$. Формула (3.1) принимает вид

$$q_1 = [\omega_A(n_{A_1} + n_{A_2})/2 + \omega_K(n_{K_1} + n_{K_2} + n_{K_3} + n_{K_4})/4]/2.$$

В случае, когда отсчет произведен по одной точке, формула (3.1) принимает вид

$$q_1 = \omega_a n_{a_i}. \quad (3.2)$$

В формулах (3.1) и (3.2) величина ω_a играет ту же роль, что и величина α_0 в формулах (2.29) и (2.30). В отличие от теоретической цены полосы α_0 величину ω_a будем называть тарировочной ценой полосы для данной точки отсчета.

Величина q_1 в формулах (3.1) и (3.2) численно равна величине наибольшего главного напряжения в массиве или в породном образце вдали от датчика при одноосном напряженном состоянии. При лабораторных исследованиях в условиях одноосного нагружения величина q_1 численно равна нагрузке Q , приложенной к образцу, поделенной на площадь основания образца F , т. е. $q_1 = Q/F$.

Не снимая нагрузки Q , нагрузим образец еще и в горизонтальном направлении усилием P . Оптическая картина в датчике при этом изменится, соответственно изменится и порядок полосы во всех точках отсчета. Чтобы снова воспользоваться формулами (3.1) и (3.2) для вычисления величины наибольшего главного напряжения q в породном образце вдали от датчика, нужно использовать другие значения величины ω_a , отличные от тех, которые использовались в случае чисто одноосной нагрузки. Иными словами, цена полосы зависит от соотношения нагрузок, действующих на пластину с датчиком в вертикальном и горизонтальном направлениях. Обозначим это отношение, как и ранее, через λ :

$$\lambda = P/Q = p/q.$$

Процедура определения цены полосы при разных значениях λ достаточно трудоемка, а использование для одной и той же точки отсчета разной цены полосы при разных значениях λ на практике создает много неудобств. Кроме того, эксперименты показывают, что при одной и той же нагрузке Q цена полосы также изменяется, если изменяется материал пластины или геометрические размеры и механические и оптические характеристики датчика.

§ 2. ЦЕНА ПОЛОСЫ ФОТОУПРУГОГО ДАТЧИКА И ЕЕ ФОРМЫ

Ценой полосы датчика в данной точке отсчета будем называть величину прироста напряжений в породе вдали от датчика при одноосной нагрузке, соответствующую изменению отсчета в этой точке на одну полосу (или, что то же, на один порядок). Следует различать теоретическую, тарифовочную и истинную цену полосы.

Под теоретической ценой полосы датчика в данной точке отсчета понимается цена полосы при одноосной нагрузке, вычисленная теоретически с использованием математического аппарата, описывающего взаимодействие фотоупругого датчика с породным массивом. Будем различать теоретическую цену полосы эталонного датчика в эталонном материале, конкретного датчика в эталонном материале и конкретного датчика в конкретном материале. Понятие эталонного датчика приведено в § 8 гл. II. Под конкретным датчиком понимается датчик, имеющийся в наличии.

В настоящей работе за основную принята теоретическая цена полосы $\alpha_0 = \alpha_a = \alpha_{1a}$ эталонного датчика в эталонном материале при эталонных условиях (см. табл. 7). При использовании этой цены полосы наибольшее главное напряжение в породе q следует вычислять по формуле (2.30), зная порядок полосы n_a :

$$q = \mu k_1 k_2 k_3 k_4 k_5 l \alpha_{1a}. \quad (3.3)$$

Если найдена теоретическая цена полосы конкретного датчика в эталонном материале α_{2a} , то вычисления следует вести по следующей формуле:

$$q = \mu k_1 k_2^{n/n} k_3 l \alpha_{2a} n_a / k_2^{n/a}, \quad (3.4)$$

где $k_2^{n/n}$ — коэффициент k_2 , найденный по отношению модуля упругости материала конкретного датчика к модулю упругости конкретной породы; $k_2^{n/a}$ — то же, но при модуле упругости эталонного образца; k_3 находится для конкретного датчика в конкретном материале.

В тех случаях, когда вычислена теоретическая цена полосы конкретного датчика в том материале, в котором предполагается проводить измерения (обозначим эту цену полосы α_{3a}), вычисления следует проводить по формуле

$$q = \mu k_1 \alpha_{3a} l n_a. \quad (3.5)$$

Под тарифовочной ценой полосы датчика в данной точке отсчета будем понимать цену полосы, полученную при тарифовке датчика в условиях одноосного нагружения. Как и в слу-

чае теоретической цены полосы, будем различать тарировочную цену полосы эталонного датчика в эталонном материале, конкретного датчика в эталонном материале и конкретного датчика в конкретном материале. Каждая из этих трех тарировочных величин, кроме того, может быть получена либо без учета влияния слоя клея, либо с учетом этого влияния.

Если тарировочная цена полосы получена без учета влияния слоя клея, то расчетные формулы аналогичны трем предыдущим. В них только следует теоретическую цену полосы α_a заменить на тарировочную цену полосы ω_a и считать $l=1$.

Если тарировочная цена полосы получена с учетом влияния слоя клея, то в указанных формулах дополнительно следует положить $\mu=1$.

Под истинной ценой полосы датчика в данной точке отсчета будем понимать цену полосы, соответствующую данным конкретным условиям работы датчика, т. е. при конкретных параметрах системы датчик — массив и заданной системе нагрузок, действующих в месте установки датчика (т. е. при истинном λ). Другими словами, под истинной ценой полосы для данной точки отсчета по данному датчику следует понимать цену полосы, определенную по формуле

$$\omega_{aa} = q/n_a,$$

где ω_{aa} — истинная цена полосы в точке a , кгс/см²/пол.; q — истинное наибольшее главное напряжение в породе вдали от датчика, кгс/см²; n_a — отсчет по данной точке a оптической картины в датчике, полос. Истинная цена полосы датчика в данной работе не используется.

Заметим, что между величиной теоретической и тарировочной цены полосы в одной и той же точке оптической картины датчика должно существовать отличие, обусловленное тем, что в развитой в гл. II теории датчика не учитывается влияние торцов датчика на концентрацию напряжений как в датчике, так и в породе. На практике, кроме того, на величину этого расхождения влияет неточность определения механических и оптических характеристик материала датчика при определении теоретической цены полосы, а в случае определения теоретической цены полосы конкретного датчика в конкретном материале также и неточность определения упругих постоянных породы.

Приведем формулы для определения теоретической цены полосы датчика в эталонном материале α_{2a} и в конкретном материале α_{3a} :

$$\alpha_{2a} = k_2^{k/a} k_4^{k/a} k_5^{k/a} \alpha_{1a}; \quad (3.6)$$

$$\alpha_{3a} = k_2^{k/k} k_3^{k/k} k_4^{k/a} k_5^{k/a} \alpha_{1a}. \quad (3.7)$$

Здесь $k_2^{k/a}$ — коэффициент k_2 , взятый по величине отношения модуля упругости материала конкретного датчика $E_{\text{Iкопир}}$ к модулю упругости эталонного материала $E_{\text{этал}}$, т. е. по величине отношения $E_{\text{Iкопир}}/E_{\text{этал}}$; $k_2^{x/l}$ — коэффициент k_2 , соответствующий величине отношения модуля упругости материала конкретного датчика $E_{\text{Iкопир}}$ к модулю упругости конкретной породы $E_{\text{копир}}$, т. е. величине отношения $E_{\text{Iкопир}}/E_{\text{копир}}$; $k_3^{k/k}$ — коэффициент k_3 , соответствующий коэффициенту Пуассона конкретного материала, для которого вычисляется цена полосы; $k_4^{x/l}$ — коэффициент k_4 , соответствующий коэффициенту Пуассона материала конкретного датчика; $k_5^{k/a}$ — коэффициент k_5 , соответствующий параметру m конкретного датчика.

Значения этих коэффициентов следует находить по графикам для коэффициентов k_2 , k_3 , k_4 , k_5 .

При прочих равных условиях между тарировочной и теоретической ценой полосы существует следующая связь:

$$\omega_{1a} = l\alpha_{1a}, \quad (3.8)$$

$$\omega_{2a} = l\alpha_{2a}, \quad (3.9)$$

$$\omega_{3a} = l\alpha_{3a}. \quad (3.10)$$

Величина коэффициента l может быть найдена при тарировании датчиков. Значения α_{1a} следует принимать по табл. 7.

§ 3. ПОРОДНЫЕ ОБРАЗЦЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ТАРИРОВАНИЯ ДАТЧИКОВ

При лабораторных исследованиях работы фотоупругих датчиков из исследуемого материала изготавливают образцы в виде кубиков или пластин прямоугольной формы, в середине которых просверливают отверстие для установки датчика. Образец с вклеенным датчиком устанавливают на прессе и нагружают.

Лабораторными исследованиями, выполненными в Шеффилдском университете [8], а также в процессе наших исследований установлено, что толщина образца практически не влияет на показания датчика, если только она не меньше длины датчика. Поэтому толщину образцов можно принимать либо равной длине датчика, либо несколько большей. Установлено также, что если высота и ширина образца более $(4 \div 5)d$, где d — диаметр датчика, то размеры образца не влияют на показания датчика, в противном случае их влияние становится заметным.

Сильно влияет на показания датчика, особенно на симметричность оптической картины в датчике, состояние торцов пла-

стин, к которым прикладывается нагрузка. Торцы должны быть ровными, плоскими и не иметь выпуклостей. Следует стремиться выдерживать также их параллельность. Удовлетворительное качество торцов можно получить при выпиливании пластин из породы, угля и других материалов на камнерезных машинах с использованием алмазных дисков пил. Отверстие для датчика можно просверлить на токарном станке.

Для изготовления образцов, главным образом в виде пластины, использовались самые разнообразные материалы: осадочные горные породы — песчаник, алевролит, аргиллит, уголь, различные породы дерева — сосна, бук, искусственные материалы — органическое стекло, отвержденные эпоксидные смолы. Исследовалась также работа фотоупругих датчиков в пластинах из стали и алюминия, в строительном кирпиче — красном и силикатном, а также в образцах из строительного гипса. Поставлена серия опытов по исследованию работы датчиков в бетоне.

Для приклеивания датчиков можно использовать клей холодного отверждения на основе эпоксидных смол ЭД5 и ЭД6, цементный раствор, синтетический клей холодного отверждения фирмы «Horsman» и др.

Для проведения комплекса лабораторных исследований при работе с фотоупругими датчиками необходимо следующее оборудование.

Прессы. При испытаниях образцов с фотоупругими датчиками нужны прессы с усилием до 50 т и более, позволяющие выдерживать заданную нагрузку в течение времени, достаточного для взятия отсчетов по датчику, — 2—5 мин при кратковременных нагружениях и до нескольких суток и даже месяцев при исследованиях на ползучесть. Этим требованиям удовлетворяют рычажные прессы. В первом случае возможно также применение гидравлических прессов. В наших исследованиях использовались гидравлический пресс типа ПГ=100А с усилием 50 т и рычажный пресс типа УМ-5 с усилием до 5 т.

Обычные прессы рассчитаны на одноосное нагружение. Однако при исследованиях работы фотоупругих датчиков возникает необходимость и в двухосном нагружении. В этом случае совместно с обычным прессом можно использовать какой-либо пресс-приставку, позволяющий нагружать образцы в горизонтальной плоскости. Такой пресс был разработан в КБ ИГД СО АН СССР под руководством Д. П. Сенук и изготовлен на опытно-механическом заводе СО АН СССР. Это гидравлический пресс с усилием до 50 т весом не более 250 кг. Для подачи масла использован ручной поршневой гидронасос от простейшего школьного гидропресса.

Приборы для измерения модуля упругости. При расшифровке показаний датчика в процессе лабораторных исследований возникает необходимость в определении модуля упругости

материала нагружаемого образца. Для этого нами использовался прибор УМГП-3, позволяющий проводить измерения непосредственно на готовой пластине с датчиком, не разрушая ее.

Измерение деформаций образца. Для измерения деформаций образца в процессе нагружения удобно использовать индикаторы часового типа.

§ 4. ТАРИРОВАНИЕ ДАТЧИКОВ

Трудность теоретического учета влияния торцов датчика на его показания (или, что то же, учет конечности длины датчика), невозможность точно определить механические характеристики исследуемой породы и свойства клея, приближенность данных о механических и оптических свойствах материала датчика и ряд других причины вызывают необходимость тарировать датчики.

На практике наиболее просто и удобно проводить тарирование при одноосной нагрузке. Тарирование при двухосном нагружении требует специального пресса. В лабораториях же обычно таких прессов нет. Поэтому нами рекомендуется ограничиваться тарированием при одноосном нагружении. Необходимость в двухосном нагружении возникает только при специальных лабораторных исследованиях работы фотоупругих датчиков.

Подготавливая тарирование датчиков, необходимо решить вопрос о том, как будет учитываться влияние слоя клея при обработке шахтных наблюдений. Здесь возможны два случая:

влияние слоя клея учитывается при тарировании датчиков в цене полосы;

влияние слоя клея учитывается с помощью поправочного коэффициента при пересчете показаний датчика в напряжения в породе (μ в формулах (2.24), (2.30), (3.4) и др.).

В первом случае диаметр отверстия под датчик в породных пластинках, предназначенных для тарирования датчиков, должен быть равен диаметру скважины, а для приклеивания датчиков должен употребляться тот клей, который использовался или будет использован при шахтных экспериментах. Полученная в результате тарирования цена полосы датчика автоматически учитывает влияние слоя клея.

Во втором случае диаметр отверстия в пластинке должен по возможности точно соответствовать диаметру датчика, при этом толщина слоя клея не должна превышать 0,1—0,2 мм.

Цена полосы ω_a при тарировании вычисляется по следующей формуле:

$$\omega_a = Q/Fn_{a1}$$

где Q — нагрузка на образец при условии одноосного нагружения, кгс/см²; F — площадь оснoзання пластины, см²; n_{oi} — отсчет в той точке оптической картины, для которой определяется цена полосы, полос; a — буквенный индекс однойменной группы точек, к которой принадлежит данная точка отсчета; i — порядковый номер точки отсчета в однойменной группе.

В процессе нагружения и разгрузки породной пластины с датчиком отсчеты по одной и той же точке оптической картины в датчике при одной и той же величине нагрузки несколько меняются от цикла к циклу, постепенно увеличиваясь по мере увеличения числа циклов нагружения. Для крепких пород при малой толщине слоя клея или при высокой его прочности величина этого изменения незначительна и ею можно пренебречь. При слабых породах, обладающих заметной остаточной деформацией, а также при использовании клеев с остаточной деформацией величина такого изменения становится заметной уже при нескольких циклах нагружения.

Рекомендуется определять цену полосы как среднюю по 3—5 циклам нагружения и разгрузки. Однако при измерениях с повышенной точностью цену полосы для первого цикла нагружения следует определять отдельно.

Тарирование проводится либо в пластинках из эталонного материала (см. § 8 гл. II), в качестве которого можно использовать песчаник или алевролит с модулем упругости, близким к эталонному, либо в пластинках, изготовленных из образцов пород, отобранных в месте измерения (конкретный материал). При отсутствии таких можно использовать и другие подходящие материалы.

Для проведения тарирования необходимо заготовить несколько пластинок и установить в них датчики. Для каждого типоразмера датчиков следует проводить самостоятельную тарировку. В процессе тарирования нужно определить цену полосы для всех точек датчика, по которым возможно проведение отсчетов, независимо от того, все или не все из них будут использованы впоследствии при полевых наблюдениях. Дело в том, что в процессе шахтных экспериментов зеркальный ходится брать по тем точкам, которые остались на картине. Кроме определения цены полосы и построения тарировочного графика по каждой из точек отсчета в процессе тарирования полезно построить экспериментальный график для определения величины коэффициента k_2 , характеризующий влияние на цену полосы модуля упругости материала пластины. Последнее возможно в том случае, если тарироваться пластины из различных материалов.

Если известно место предполагаемых исследований, то тарирование лучше проводить в образцах, изготовленных из

породы, отобранной в этом месте. Число образцов зависит от однородности породы в зоне измерения и режима работы датчика.

Рассмотрим тарирование датчика, работающего в режиме датчика напряжений, т. е. в III, IV или V классах жесткости по табл. 5. В этом случае обычно достаточно изготовить и испытать 2—4 образца из различных разновидностей породы, отобранной в районе измерений. В процессе тарирования для каждого образца определяется цена полосы и модуль упругости. По модулю упругости устанавливается, в каком классе жесткости работает датчик в каждом из образцов. Если класс жесткости для всех образцов совпадает, то определяют среднюю цену полосы по всем образцам и эту величину принимают за тарировочную цену полосы датчика. Если образцы принадлежат к разным классам жесткости, то следует вначале выбрать класс, в котором будут вестись все расчеты в дальнейшем. Обычно в этом случае выбирается низший класс. После этого для всех образцов, попавших в выбранный и более высокие классы, определяется одна общая цена полосы.

Рассмотрим вопрос о тарировании датчиков, работающих в режиме деформометров (I класс жесткости). В этом случае показания датчика сильно зависят от величины модуля упругости в месте измерения. Для тарирования датчиков нужны образцы породы достаточно больших размеров. При массовых же замерах брать большие образцы в месте установки каждого датчика затруднительно. Поэтому предлагается следующая методика. Цена полосы датчика устанавливается на образце из эталонного материала, а в расчетах учитывается коэффициент k_2 . Чтобы точно определить величину этого коэффициента, в месте установки каждого датчика берется образец породы или керн размером, достаточным для определения модуля упругости в лабораторных условиях. Возможно, конечно, определение модуля упругости и непосредственно на месте измерения, однако в настоящее время не разработано достаточно простых методов такого определения.

Можно рекомендовать и несколько иной способ. В месте измерения отбирается несколько одинаковых по составу и строению образцов наиболее характерной породы, таких, чтобы их модули упругости были одинаковы, и по ним определяется средняя цена полосы для каждой точки конкретного датчика. Затем теоретически рассчитывается график для поправочного коэффициента k_2 ; аналогичного коэффициенту k_2 , но вычисленного при базовом значении модуля упругости породы, равного модулю упругости образцов, в которых велось тарирование датчиков.

Заметим, что на рис. 15 значение $k_2 = 1$ соответствует отношению модулей упругости материала датчика и породы $E_1/E = 4$. На графиках же для коэффициента k_2 значение $k_2 = 1$

будет иметь место при E_1 , равном модулю упругости конкретного датчика, и при E , равном модулю упругости породы, в которой проводилось тарирование указанного датчика.

При использовании величины коэффициента k_2' в каждом конкретном случае также необходимо определять с достаточно высокой степенью точности модуль упругости породы в месте измерения, однако на практике второй способ более удобен, так как тарировочная цена полосы датчика получается достаточно близкой к истинной, а величины поправочного коэффициента k_2' достаточно близки к единице.

Тарирование датчиков, работающих во II классе жесткости, определяется допустимой точностью измерений. Если точность определения напряжений в породе 25—30% приемлема, то тарирование ведется как для датчиков напряжений, если нужна более высокая точность, то тарирование ведется как для деформометров.

В процессе тарирования по каждому образцу или группе образцов из одного и того же материала строятся тарировочные графики. Приведем несколько примеров таких графиков для пяти различных образцов (табл. 8). В этих образцах были установлены датчики внешним диаметром 36 мм, внутрен-

Результаты

№ образца	Пластина					Датчик	
	Материал	Модуль упругости $E \cdot 10^{-4}$, кгс/см ²	Кэф. Пуассона ν	Диаметр отверстия, мм	Толщина слоя клея, мм	Материал	Модуль упругости $E \cdot 10^{-4}$, кгс/см ²
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Массивный тонкозернистый сильнометаморфизованный песчаник	6,20	0,10	38,0	1,0	Стекло	6,30
2	Песчаник тонкозернистый	5,20	0,20	37,0	0,5	Стекло К8	8,23
3	Алевролит тонкозернистый	2,15	0,20	36,5	0,25	»	8,23
4	Уголь сажистый средней крепости	0,20	0,35	36,4	0,2	»	8,23
5	Уголь полуматовый средней крепости	0,15	0,35	36,4	0,2	»	8,23

ним — 6 и длиной 30 мм. Для приклеивания датчиков использовался клей холодного отверждения на основе эпоксидной смолы ЭД6.

Тарировочные графики для всех образцов (рис. 20, а) построены в координатах $\sigma - n$, где n — средний порядок полосы по точкам K ; σ — напряжение в образце, кгс/см², вычисленное по формуле

$$\sigma = Q/F,$$

где Q — одноосная нагрузка на образец, кгс; F — площадь основания образца, см².

Графики представляют прямые линии, проходящие через начало координат, что вполне согласуется с выводами, полученными в гл. II (см. рис. 13). С увеличением модуля упругости материала пластины угол наклона прямых увеличивается и соответственно увеличивается цена полосы датчика. Однако для двух угольных образцов, т. е. для материалов с низким модулем упругости, тарировочные графики почти совпадают, хотя модули упругости обоих образцов различаются на 40%.

Из тарировочных графиков для точек K , H , C и F (рис. 20, б) видно, что каждая из указанных точек отсчета ха-

Таблица 8

тарирования

Датчик		Тар. цена полосы α_a , кгс/см ² /пол.	Тарировочная цена полосы ω_{3K} , кгс/см ² /пол.	Поправочные коэффициенты							Цена полосы датчика α_{3K} , кгс/см ² /пол.
Коэффициент Пуассона ν_1	Оптическая постоянная по напряжениям C , мкм·см/кгс			μ	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	l	
9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0,20	2,60	17,6	19,0	1,01	1	1,40	1,05	1	1	0,72	26,2
0,21	2,65	17,0	11,5	1,01	1	1,20	1,01	1	1	0,55	20,8
0,21	2,65	17,0	10,0	1,03	1	1,02	1,01	1	1	0,55	18,0
0,21	2,65	17,0	7,2	1,0	1	0,9	0,95	1	1	0,50	14,5
0,21	2,65	17,0	7,0	1,0	1	0,88	0,95	1	1	0,50	14,2

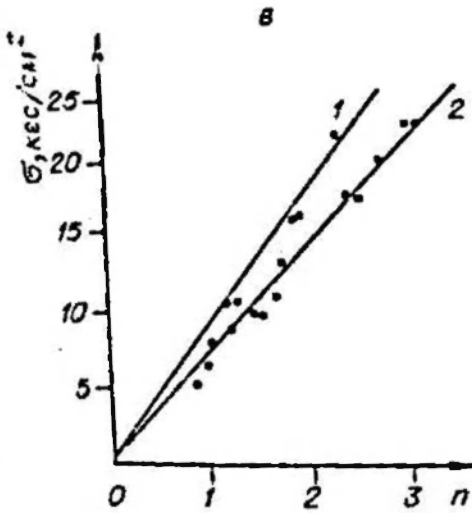
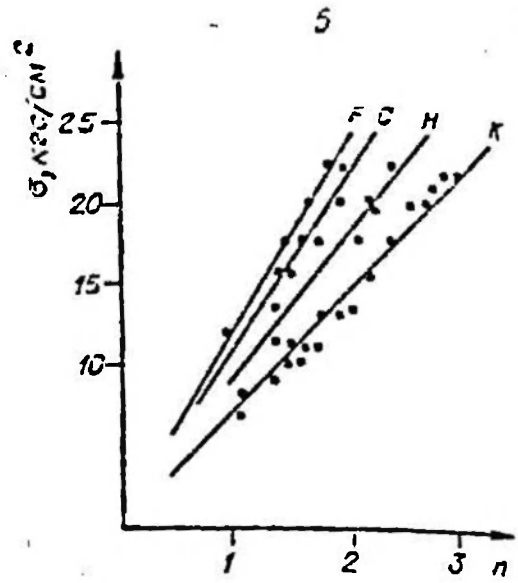
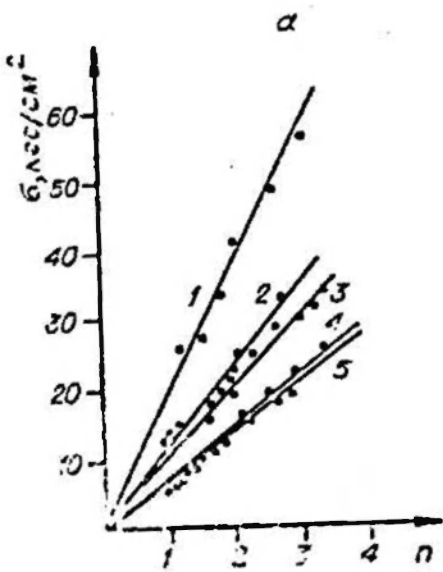


Рис. 20. Тарифовочные графики.
 а — для точек К обр. 1—5 (см. табл. 8); б — для точек К, Н, С, П обр. 4; в — для угольных образцов с датчиками из стекла К8 (обр. 4, см. табл. 8) (1) и из стекла ТК23 (2).

рактически характеризуется своим тарифовочным графиком и соответственно своей ценой полосы. Так, для рассматриваемого угольного образца $\omega_k = 7,2$ кгс/см²/пол., $\omega_n = 9$ кгс/см²/пол., $\omega_c = 12$ кгс/см²/пол., $\omega_p = 15$ кгс/см²/пол., что довольно близко совпадает с теоретической ценой полосы для этих точек при $l = 0,5$ (см. табл. 7).

На тарифовочных графиках для двух угольных образцов (рис. 20, в), изготовленных из одного и того же куска угля, но с датчиками из разных материалов, экспериментальные точки также хорошо аппроксимируются прямой линией. Поскольку оптические постоянные стекол К8 и ТК23 различны, цена полосы датчиков различная. Так, для первого датчика $\omega_k = 7,2$ кгс/см²/пол., для второго $\omega_k = 9,0$ кгс/см²/пол.

Методы вычисления напряжений в массиве по показаниям влияния толщины и свойств слоя клея между стенками скважины и датчиком. Полученные результаты не противоречат теоретическим выводам (см. § 9 гл. II).

Для сравнения в табл. 8 приведены теоретическая и тарифовочная цена полосы в точке K для всех пяти образцов. Первая цифра в графе 11 является теоретической ценой полосы эталонного датчика в эталонном материале, остальные четыре — теоретической ценой полосы конкретных датчиков в эталонном материале. В графе 12 все пять цифр соответствуют тарифовочной цене полосы конкретного датчика в конкретном материале. Значения теоретической цены полосы конкретного датчика в конкретном материале α_{3k} (графа 20) вычислены по формуле (3.7). В графе 19 приведены значения коэффициента l по формуле (3.10). Таким образом, при длине датчика 3,0 см коэффициент l равен 0,5 в случае установки датчика в достаточно слабых породах типа углей и несколько увеличивается при крепких породах.

§ 5. ВЫБОР РАСЧЕТНЫХ ФОРМУЛ

Методы вычисления напряжений в массиве по показаниям фотоупругих датчиков можно разделить на следующие группы (см. § 8 гл. II):

1) с использованием отсчетов по одной точке оптической картины в датчике;

2) с использованием отсчетов по двум точкам оптической картины в датчике.

В первом случае отсчеты приведены к одной точке, тогда как во втором обязательно наличие отсчетов по двум точкам, принадлежащим двум различным группам одноименных точек.

Заметим, что во всех случаях под главными напряжениями в породе будем понимать квазиглавные напряжения в породе, действующие в плоскости, нормальной к оси датчика. Во избежание путаницы еще раз напоминаем, что через q_1 обозначен некоторый условный отсчет по датчику. Истинное же наибольшее главное напряжение в породе обозначено буквой q без индекса.

Формулы с использованием отсчетов по одной точке

Под отсчетом в одной точке при использовании тарифовочной цены полосы будем понимать:

а) отсчет в одной точке. В этом случае в соответствии с (3.2) можем записать

$$q_1 = \omega_a n_{a1}; \quad (3.11)$$

б) усредненный отсчет по группе одноименных точек, тогда

$$q_1 = l_a^{-1} \sum_{i=1}^{l_a} \omega_a n_{a1}; \quad (3.12)$$

в) усредненный отсчет по нескольким группам одноименных точек, тогда в соответствии с (3.1) имеем

$$q_1 = l^{-1} \sum_{j=1}^l \left[(\omega_a / l_a) \sum_{i=1}^{l_a} n_{a1} \right]. \quad (3.13)$$

Эти же формулы будут справедливы и в случае приведения отсчетов к одной точке с использованием теоретической цены полосы. Достаточно тарифовочную цену полосы ω_a в них заменить на теоретическую цену полосы α_a .

Рассмотрим формулы для вычисления напряжений в породе при использовании фотоупругих датчиков в режиме датчиков напряжений.

При вычислении напряжений в породе по показаниям датчика с использованием тарифовочной цены полосы, полученной без учета влияния слоя клея, возможны три случая.

1. Цена полосы эталонного датчика ω_{1a} получена при тарифировании его в эталонном материале. В этом случае наибольшее главное напряжение в породе определяется по формуле (2.24).

$$q = \mu k_1 k_2 k_3 k_4 k_5 q_1, \quad (3.14)$$

где q_1 определяется по одной из формул — (3.11), (3.12) или (3.13) при $\omega_a = \omega_{1a}$.

2. Цена полосы конкретного датчика ω_{2a} получена при тарифировании его в эталонном материале. В этом случае наибольшее главное напряжение в породе определяется по формуле, аналогичной (3.4):

$$q = \mu k_1 k_2^{n/n} k_3^{n/n} q_1 / k_2^{n/a}, \quad (3.15)$$

где q_1 определяется, как и ранее, по формулам (3.11) — (3.13), но при $\omega_a = \omega_{2a}$.

3. Цена полосы конкретного датчика ω_{3a} получена при тарифировании его в пластинах, изготовленных из образцов пород, взятых из наиболее характерных участков в районе установки датчиков. Тогда

$$q = \mu k_1 q_1, \quad (3.16)$$

где q_1 определяется из формул (3.11) — (3.13) при $\omega_a = \omega_{3a}$. Если тарифовочная цена полосы получена с учетом влияния слоя клея, то возможны также три аналогичных случая.

При этом величину наибольшего главного напряжения в породе следует вычислять по одной из трех последних формул (3.14) — (3.16), положив в них $\mu = 1$.

При использовании теоретической цены полосы датчика также могут иметь место три подобных случая. В этих случаях наибольшее главное напряжение в породе можно определять по формулам (3.14) — (3.16), при этом усредненный отсчет приведенный к одной точке, — по формулам (3.11) — (3.13), подставляя в них вместо тарифовочной цены полосы ω_a теоретическую цену полосы α_a , умноженную на коэффициент l .

Отметим, что при использовании фотоупругих датчиков в режиме датчиков напряжений для вычисления коэффициента k_2 дающего поправку на отклонение величины истинного модуля упругости исследуемой породы от модуля упругости образцов, на которых была определена цена полосы, достаточно примерно оценить величину модуля упругости исследуемой породы, например, исходя из петрографического состава породы или просто по типу породы. Тогда можно принимать среднее значение модуля упругости для данного типа пород.

В тех случаях, когда фотоупругий датчик используется в режиме деформометра, также можно применять формулы (3.14) и (3.15). Формула (3.16) для вычисления напряжений в породе может использоваться, если датчик, которым проводились измерения, протарифован непосредственно в породе, отобранной в месте измерения. Для точного определения величины коэффициента k_2 , входящего в формулы (3.14) и (3.15), необходимо знать модуль упругости породы в месте установки датчика, что практически возможно только при определении его в лабораторных условиях на образцах, изготовленных из кернов, отобранных в месте установки датчиков. Однако даже тогда точность вычисления напряжений будет невысокой.

В случае, когда используется теоретическая цена полосы для конкретного датчика α_{3a} , вычисленная для наиболее характерной породы в месте установки датчиков, или тарифовочная цена полосы для конкретного датчика ω_{3a} , полученная при тарифовании датчика в образцах наиболее характерной породы, отобранной в месте установки датчиков, напряжения в породе вычисляются по формуле

$$q = \mu k_1 k_2 k_3 q_1, \quad (3.17)$$

где k_2 — коэффициент, учитывающий отличие модуля упругости породы в месте установки датчика от модуля упругости породы, для которой определена цена полосы.

Как уже отмечалось, графики для определения коэффициента k_2 для каждого типоразмера датчиков следует строить

отдельно, принимая за базовое значение модуля упругости породы то его значение, которое использовалось при определении цены полосы.

Формулы с использованием отсчетов по двум разноименным точкам

В этом случае под отсчетом в одной точке будем понимать:

а) отсчет по одной точке в каждой из двух выбранных групп одноименных точек:

$$\begin{aligned} n_a &= n_{a_i} \\ n_b &= n_{b_i} \end{aligned} \quad (3.18)$$

где a, b — индексы разноименных групп точек; n_{a_i}, n_{b_i} — отсчеты; i — порядковый номер точки в одноименной группе;

б) усредненные отсчеты по каждой из двух выбранных групп точек:

$$\begin{aligned} n_a &= l_a^{-1} \sum_{i=1}^{l_a} n_{a_i} \\ n_b &= l_b^{-1} \sum_{i=1}^{l_b} n_{b_i} \end{aligned} \quad (3.19)$$

где l_a, l_b — число точек соответственно в группах с индексами a и b .

Приведем формулы для вычисления напряжений в породе p и q по отсчетам в точках A и S и в точках C и F . В случае отсчетов по точкам A и S величины главных напряжений в породе при эталонных условиях в соответствии с (2.31) определяются по формулам

$$\begin{aligned} p_1 &= \lambda [(n_A + n_S) \beta_1 - (n_A - n_S) \beta_2] / 2Cd, \\ q_1 &= \lambda [(n_A + n_S) \beta_1 + (n_A - n_S) \beta_2] / 2Cd, \end{aligned} \quad (3.20)$$

где p, q — наименьшее и наибольшее главные напряжения в породе для эталонных условий, кгс/см²; β_1, β_2 — некоторые коэффициенты, определяемые по графикам на рис. 17, а; n_A, n_S — отсчеты в точках A и S , определяемые по формулам (3.18) или (3.19), полос; λ — длина волны света, мкм; C — оптическая постоянная материала датчика по напряжениям, мкм·см/кгс; d — длина пути света в датчике, см.

В случае отсчетов по точкам C и F величины главных напряжений в породе при эталонных условиях в соответствии с (2.32) и (2.32а) определяются по формулам:

$$\begin{aligned} p_1 &= -(\lambda/2Cd) (n_C \alpha_1 + n_F \alpha_2); \\ q_1 &= (\lambda/2Cd) (n_C \alpha_2 + n_F \alpha_1), \end{aligned} \quad (3.21)$$

если наибольшее главное напряжение в породе сжимающее, т. е. $q < 0$,

$$\begin{aligned} p_1 &= (\lambda/2Cd) (n_C \alpha_1 + n_F \alpha_2); \\ q_1 &= -(\lambda/2Cd) (n_C \alpha_2 + n_F \alpha_1), \end{aligned} \quad (3.22)$$

если наибольшее главное напряжение в породе растягивающее, т. е. $q > 0$. Здесь α_1, α_2 — коэффициенты, которые определяются по графикам на рис. 17, б; n_C, n_F — отсчеты в точках C и F .

Графики для коэффициентов β_1 и β_2 (см. рис. 17, а) и α_1 и α_2 (см. рис. 17, б) рассчитаны для эталонного датчика, установленного в пластине из эталонного материала при толщине слоя клея, равной нулю. Для определения действительных главных напряжений в породе необходимо ввести, как и ранее, поправки, учитывающие действительные условия работы датчика. В соответствии с формулой (3.14) действительные главные напряжения в массиве определяются из следующих выражений:

$$\begin{aligned} p &= \mu l k_4 k_5 p_1; \\ q &= \mu l k_4 k_5 q_1. \end{aligned} \quad (3.23)$$

Здесь p_1 и q_1 находятся из формулы (3.20) или (3.21) и (3.22).

Значения коэффициентов μ, k_4 и k_5 следует определять по графикам (см. рис. 16, б; в; 18). Коэффициенты l для датчиков длиной 3 см можно находить по табл. 8, а при другой длине датчика — путем тарирования.

§ 6. УПРОЩЕННАЯ МЕТОДИКА

Вследствие большого числа факторов, влияющих на оптическую картину в датчике, в общем случае изложенная выше методика оказывается относительно сложной.

На практике при исследовании напряженного состояния горных пород иногда можно ограничиться значительно меньшей точностью измерений, если при этом может быть существенно упрощена методика. Последнее возможно при исполь-

зовании жестких фотоупругих датчиков из высокомодульного стекла для измерения напряжений в достаточно слабых горных породах, таких как уголь, слабые аргиллиты, алевролиты и др. Сущность такой упрощенной методики измерения напряжений состоит в том, чтобы в максимальной степени уменьшить воздействие возможно большего числа побочных факторов, влияющих на показания датчика, а также упростить процесс снятия отсчетов. Исходя из накопленного опыта измерений, для этого можно рекомендовать следующее:

- уменьшение толщины слоя клея до 0,5—1,0 мм и менее, что возможно при надлежащем подборе коронок для бурения скважины в месте установки датчиков;

- использование для приклеивания датчиков цемента высоких марок;

- исключение или сведение до минимума влияния ползучести исследуемых горных пород;

- использование простейших полярископов для наблюдения картины в датчике;

- взятие отсчетов по точкам K оптической картины.

Наибольшее главное напряжение в массиве в этом случае можно определять по формуле

$$q = k_1 \omega_K n_K, \quad (3.24)$$

где k_1 — коэффициент, учитывающий влияние отношения главных напряжений λ . Величину коэффициента k_1 можно принимать по кривой II на рис. 14, б; n_K — усредненный отсчет по точкам K , полос; ω_K — цена полосы для точек K , кгс/см²/пол., которую для датчиков отражательного типа диаметром 3,6 см и длиной 3,0 см из стекла К8 можно принимать равной 7,5 кгс/см²/пол.

Величина наименьшего главного напряжения в массиве может быть определена по формуле $p = \lambda q$, где λ — коэффициент гидростатичности, равный отношению p/q , определяется по общему виду оптической картины в датчике одним из способов, описанных в § 8 гл. II.

Точность измерения напряжений по упрощенной методике не превышает 20—30%. Пользоваться этой методикой рекомендуется при массовых замерах с целью приближенной оценки величины и направления главных (квазиглавных) напряжений в массиве вокруг горных выработок в зоне влияния очистных работ, а также когда экспериментатор впервые начинает работать с фотоупругими датчиками и, следовательно, еще не имеет достаточного опыта и навыков снятия отсчетов и расшифровки показаний датчиков.

ТЕОРИЯ РАБОТЫ ФОТОУПРУГОГО ДАТЧИКА В УПРУГО-НАСЛЕДСТВЕННОЙ СРЕДЕ

§ 1. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Под ползучестью горных пород понимают их свойство деформироваться во времени. Обычно различают собственно ползучесть и релаксацию напряжений. В качестве примера собственно ползучести можно указать на деформирование во времени породного или угольного образца, находящегося под постоянной нагрузкой. Если тот же образец нагрузить в условиях постоянной деформации, то напряжения в нем с течением времени будут уменьшаться, или, как принято говорить, релаксировать.

Среди различных реологических моделей, описывающих деформирование горных пород во времени, наибольшее распространение получила теория ползучести горных пород, разработанная Ж. С. Ержановым [27]. Горная порода по этой теории рассматривается как упруго-наследственная среда. При решении задач теории ползучести пользуются принципом Вольтерра и методом временных операторов Ю. Н. Работнова.

Зависимость от времени деформаций материала, обладающего свойством наследственности, записывается в виде следующего интегрального уравнения:

$$\varepsilon(t) = E^{-1} \left[\sigma(t) + \int_0^t L(t-\tau) \sigma(\tau) d\tau \right], \quad (4.1)$$

где $\varepsilon(t)$ и $\sigma(t)$ — деформация и напряжение, соответствующие рассматриваемому моменту времени t , отсчитываемому от момента нагружения; E — модуль упругости породы; $L(t-\tau)$ — ядро интегрального уравнения, получившее название ядра наследственности, или ядра ползучести.

Уравнение (4.1) можно записать и в другом виде:

$$\sigma(t) = E \left[\varepsilon(t) - \int_0^t M(t-\tau) \varepsilon(\tau) d\tau \right]. \quad (4.2)$$

Таблица 9
 Параметры ползучести некоторых осадочных пород

Горная порода	Прямая ползучесть		Обратная ползучесть		Источник
	α	$\delta^{\alpha-1}$	α	$\delta^{\alpha-1}$	
Алевролит	0,726	0,0091			По данным Ж. С. Ер- жапова для пород Донбас- са [27]
	0,715	0,0105			
Аргиллит	0,710	0,0080			
	0,721	0,0044			
Песчаник	0,670	0,0021			По данным Г. Н. Гу- менюка для пород и углей Караган- динского бассейна [28]
Известняк	0,717	0,0013			
	0,701	0,0018			
	0,729	0,0021	0,753	0,0017	
Песчаник мелкозерни- стый	0,768	0,0063	0,787	0,0044	По данным Г. Ф. Боб- рова для пород и углей Проконь- евско-Кв- селевско- го района [29]
Песчаник среднезер- нистый	0,742	0,0050	0,768	0,0042	
Алевролит	0,682	0,0033	0,748	0,0033	
Аргиллит алевроли- тистый	0,675	0,0036	0,740	0,0042	
Уголь	0,793	0,0037	0,879	0,0043	По данным Г. Ф. Боб- рова для пород и углей Проконь- евско-Кв- селевско- го района [29]
Песчаник почвы пл. Характерного	0,802	0,0106	0,760	0,00227	
Алевролит почвы пл. Горелого	0,793	0,0073	0,828	0,0039	
Аргиллит тошкзерпи- стый	0,801	0,0110	0,838	0,0081	
Уголь пл. Мощного: || слоистости	0,764	0,0073	—	—	По данным А. А. Жу- равель для пород Кузбасса при шахт- ных изме- рениях [30]
⊥ слоистости	0,783	0,0058	0,857	0,0020	
Уголь пл. Прокопьев- ского: || слоистости	0,787	0,0057	0,783	0,0035	
⊥ слоистости	0,759	0,0068	0,745	0,0027	
Песчаник	0,691	0,1242			По данным Ю. А. Век- слера при объемном сжатии [31]
Углистый аргиллит	0,691	0,0199			
Песчаник-алевролит	0,693	0,1490			
	0,693	0,1137			
	0,693	0,1764			
	0,693	0,2064			
Песчаник	0,76	0,0034			По данным Ю. А. Век- слера при объемном сжатии [31]
Алевролит	0,79	0,0044			

Здесь $M(t-\tau)$ — ядро релаксации. Тогда $\bar{L}(i-\tau)$ можно рассматривать как резольвенту ядра релаксации.
 Экспериментальным путем Ж. С. Ержанов установил, что свойства горных пород Донбасса с достаточной степенью точности описываются степенным ядром ползучести вида.

$$L(t-\tau) = \delta(t-\tau)^{-\alpha}, \quad (4.3)$$

где α, δ — параметры ползучести, причем $0 < \alpha < 1$. Параметр α — величина безразмерная, параметр δ имеет размерность «время в степени $\alpha-1$ ».

Исследованиями установлено, что зависимость (4.3) справедлива также для пород и углей Карагадинского [28] и Кузнецкого бассейнов [29, 30]. Значения параметров ползучести для ядра вида (4.3) для некоторых пород, полученные различными исследователями лабораторным путем, приведены в табл. 9.

При измерениях напряжений и деформаций горных пород с помощью различных датчиков, в том числе и фотоупругих, возникает необходимость учитывать влияние ползучести пород [19].

§ 2. НАПРЯЖЕНИЯ В ФОТОУПРУГОМ ДАТЧИКЕ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ ПОЛЗУЧЕСТЬЮ ГОРНОЙ ПОРОДЫ

Пусть в упруго-наследственном изотропном и однородном горном массиве пробурена скважина радиусом R , в которой установлен и склеен с ее стенками фотоупругий датчик. Будем считать, что материал датчика является упругим; однородным и изотропным и датчик сцеплен (спаян) со стенками скважины непрерывно по всему контуру. Внутренний радиус датчика, представляющего собой цилиндр с осевым отверстием, равен R_1 , внешний — R и совпадает с радиусом скважины. Упругие постоянные материала датчика — E_1, G_1, ν_1 . Физические постоянные горной породы — $E, G, \nu, \alpha, \delta$.

Пусть исследуемый массив до бурения скважины находился под действием системы сил p и q , причем процессы ползучести, обусловленные этими силами, к моменту бурения скважины полностью закончились. Положим, что скважина пробуривается мгновенно и сразу же в нее на некотором уда-

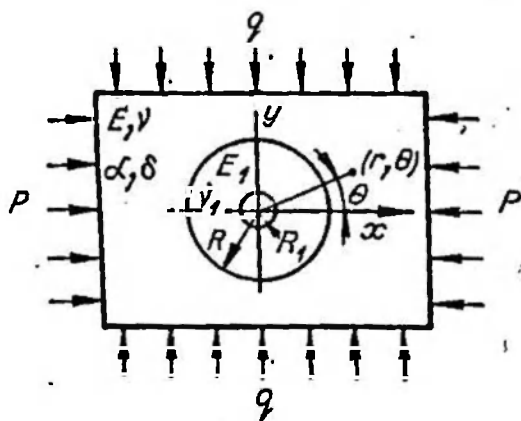


Рис. 21. Расчетная схема к упруго-наследственной задаче.

лении от торца устанавливается датчик, причем будем считать, что упругие деформации, вызванные в массиве бурением скважины, полностью заканчиваются до установки датчика, клей затвердевает мгновенно, а толщина слоя клея равна нулю.

При сформулированных условиях и в предположении, что длина датчика много больше диаметра скважины, решение соответствующей плоской задачи дает следующие выражения для напряжений, связанных с ползучестью породы (рис. 21).

Напряжения в датчике ($R \leq r \leq R_1$):

$$\begin{aligned} \sigma_{r1}(t) &= (a_1 - b_{-1}R^2/2r^2)(p+q)/2 + (b_1/2 - \\ &\quad - 2a_{-1}R^2/r^2 - 3b_{-3}R^4/2r^4)(\cos 2\theta)(p-q)/2, \\ \sigma_{\theta 1}(t) &= (a_1 + b_{-1}R^2/2r^2)(p+q)/2 - (b_1/2 - \\ &\quad - 6a_3r^2/R^2 - 3b_{-3}R^4/2r^4)(\cos 2\theta)(p-q)/2, \end{aligned} \quad (4.4)$$

$$\tau_{r\theta 1}(t) = (3a_3r^2/R^2 - b_1/2 - a_{-1}R^2/r^2 - 3b_{-3}R^4/2r^4)(\sin 2\theta)(p-q)/2.$$

Прирост напряжений в породе вблизи датчика ($r > R$):

$$\begin{aligned} \sigma_r^n &= (1 - \beta_{-1}/2)(p+q)R^2/2r^2 + [4 - 2\alpha_{-1} - \\ &\quad - 3R^2(1 + \beta_{-3}/2)/r^2](\cos 2\theta)(p-q)R^2/2r^2, \\ \sigma_\theta^n &= [(1 - \beta_{-1}/2 - 1)(p+q)R^2/2r^2 + 3(1 + \beta_{-3}/2) \times \\ &\quad \times (\cos 2\theta)(p-q)R^2/2r^2, \\ \tau_{r\theta}^n &= [\alpha_{-1} - 2 + 3(1 + \beta_{-3}/2)R^2/r^2](\sin 2\theta) \times \\ &\quad \times (p-q)R^2/2r^2. \end{aligned} \quad (4.5)$$

В формулах (4.4)–(4.5) коэффициенты задаются следующими выражениями:

$$a_1 = m^2(1-A)/(m^2-1), \quad b_{-1} = 2(1-A)/(m^2-1), \quad \beta_{-1} = 2A,$$

где

$$\begin{aligned} A &= \bar{G}(1-A_1G)/G(1-A_1\bar{G}), \\ A_1 &= [1 + m^2(\alpha_1 - 1)/2]/G_1(1-m^2), \\ a_{-1} &= -D_1G_1/D\bar{G}, \\ b_1 &= -3m^2[(m^2-1 + D_1/3)G_1/\bar{G} - m^2 + 1]/D, \\ a_3 &= -m^4(m^2-1)(G_1/\bar{G} - 1)/D, \\ b_{-3} &= [m^4(\alpha_1 + G_1/\bar{G}) + (1 - G_1/G)]/D, \\ \alpha_{-1} &= 2 + (m^2-1)[D_1G_1/\bar{G} + 3m^2(m^2-1)(1 - G_1/\bar{G})]/D, \end{aligned} \quad (4.6)$$

$$\beta_{-3} = -2 + [-m^2 D_1 \bar{G}_1 / \bar{G} + m^2 (G_1 / \bar{G} - 1) (m^2 - 1) (4m^4 - 3) + \\ + m^4 (\kappa_1 + G_1 / \bar{G}) + (1 - G_1 / \bar{G})] / D,$$

где

$$D = [(\kappa \bar{G} / G - \bar{\kappa}) / 2]^{-1} \{ [\kappa_1 + m^6 \kappa_1 (\kappa_1 + m^2) + \\ + m^2 (3m^4 - 6m^2 + 4)] \bar{G} / G_1 + \bar{\kappa} (m^2 - 1)^4 G_1 / \bar{G} + \\ + [\bar{\kappa} (m^8 \kappa_1 - m^6 \kappa_1 + 3m^6 - 6m^4 + 4m^2 - 1) + \\ + \kappa_1 (m^6 - 1) + m^2 (m^6 - 3m^4 + 6m^2 - 4)] \}, \\ D_1 = (1 + m^6 \kappa_1) \bar{G} / G_1 + m^6 - 1.$$

Здесь \bar{G} , $\bar{\kappa}$ — временные операторы.

В формулах (4.6) κ , κ_1 , G и G_1 задаются выражениями (2.4), (2.5), (2.6), а $m = R/R_1$.

Оператор \bar{G} для ядра ползучести вида (4.3) с учетом аппроксимации Н. И. Розовского (в области, где она справедлива) расшифровывается в следующем виде [27]:

$$\bar{G} = G \exp[-3\omega\delta\Gamma(1-\alpha) \cdot t^{1-\alpha}/2(1+\nu)], \quad (4.7)$$

где $\omega = (1-\alpha)^{1-\alpha}$, Γ — гамма-функция.

Оператор $\bar{\kappa}$ в случае плоской деформации

$$\bar{\kappa} = 3 - 4\bar{\nu}, \quad (4.8)$$

где $\bar{\nu} = 1/2 - (1-2\nu) \{ \exp[-\omega\delta\Gamma(1-\alpha) t^{1-\alpha}] \} / 2$;
в случае плоского напряженного состояния

$$\bar{\kappa} = (3 - \bar{\nu}) / (1 + \bar{\nu}) = 5/3 - 4(1-2\nu) \{ \exp[-3\omega\beta t^{1-\alpha} : \\ : 2(1+\nu)] \} / 3(1+\nu), \quad (4.9)$$

где $\beta = \delta\Gamma(1-\alpha)$.

В частном случае, когда датчик сплошной, т. е. $R_1 = 0$, выражения (4.6) принимают вид:

$$b_1 = -2(\kappa_1 + G_1 / \bar{G}) (\kappa \bar{G} / G - \bar{\kappa}) / [\bar{\kappa} (1 + G_1 / \bar{G}) + \kappa_1 \bar{G} / G + 1], \\ \beta_{-1} = 2\bar{G} [2 + G(\kappa_1 - 1) / G_1] / \bar{G} [2 + \bar{G}(\kappa_1 - 1) / G_1], \\ \alpha_{-1} = 2 + 2(\kappa_1 + G_1 / \bar{G}) (\kappa \bar{G} / G - \bar{\kappa}) : [\bar{\kappa} (1 + G_1 / \bar{G}) + \kappa_1 \bar{G} / G_1 + 1], \quad (4.10)$$

$$\beta_{-3} = -2 - 2(3G_1 / \bar{G} - \kappa_1 - 4) (\bar{G} \kappa / G - \bar{\kappa}) : \\ : [\bar{\kappa} (1 + G_1 / \bar{G}) + \kappa_1 \bar{G} / G_1 + 1],$$

$$a_1 = a_{-1} = a_3 = b_{-1} = b_{-3} = 0.$$

В этом случае выражения (4.4) для напряжений в датчике принимают вид:

$$\begin{aligned}\sigma_{r1}(t) &= (\rho - q) b_1 (\cos 2\theta) / 4, \\ \sigma_{\theta 1}(t) &= -(\rho - q) b_1 (\cos 2\theta) / 4, \\ \tau_{r\theta 1}(t) &= (\rho - q) b_1 (\sin 2\theta) / 4.\end{aligned}\quad (4.11)$$

§ 3. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СПЛОШНОГО ФОТОУПРУГОГО ДАТЧИКА С ПОРОДОЙ, ОБЛАДАЮЩЕЙ СВОЙСТВОМ ПОЛЗУЧЕСТИ

В соответствии с формулами (4.11) главные напряжения в сплошном датчике, обусловленные ползучестью породы, можно записать в следующем виде:

$$\sigma_{1,2} = \pm (\rho + q) b_1 / 4, \quad (4.12)$$

т. е. они для всех точек датчика постоянны.

Величина максимального касательного напряжения в датчике

$$\tau_{\max} = (\rho - q) b_1 / 4 \quad (4.13)$$

также не зависит от координат точек. Следовательно, как и в упругом случае, при деформации ползучести в сплошном фотоупругом датчике будет наблюдаться во всех точках датчика изохрома одного порядка.

Положим $q = 0$ и рассмотрим величину отношения главных напряжений в датчике к напряжению p в массиве:

$$\begin{aligned}\sigma_{1,2}/p &= \pm b_1/4 = \pm (\kappa_1 + G_1/G) (\bar{\kappa} - \kappa \bar{G}/G): \\ &: 2[\bar{\kappa}(1 + G_1/\bar{G}) + \kappa_1 \bar{G}/G_1 + 1].\end{aligned}\quad (4.14)$$

При $G_1 \rightarrow \infty$ это выражение стремится к некоторому пределу

$$\sigma_{1,2}/p |_{G_1 \rightarrow \infty} = \pm (1 - \kappa \bar{G}/\bar{\kappa} G) / 2. \quad (4.15)$$

На первый взгляд, этот предел зависит от модуля упругости породы. Однако это не так. Подставляя значения временных операторов \bar{G} и $\bar{\kappa}$ из формул (4.7) и (4.8), в случае плоской деформации получим

$$\begin{aligned}\sigma_{1,2}/p |_{G_1 \rightarrow \infty} &= \pm \{ 7 - 4(1 + \nu) \exp[-\omega \beta t^{1-\alpha} / (\bar{3} - 4\nu)] + \\ &+ (3 - 4\nu) \exp[-3\omega \beta t^{1-\alpha} / 2(1 + \nu)] \} / 14.\end{aligned}\quad (4.16)$$

Эта формула не зависит от модуля упругости породы. Аналогичное выражение получается и в случае плоского напряженного состояния.

Из выражения (4.13) следует, что максимальные касательные напряжения в фотоупругом датчике, а значит, и оптическая картина в нем зависят непосредственно от разности главных напряжений в породе. Это обстоятельство можно использовать для определения напряжений нетронутого массива, для чего достаточно знать упругие характеристики материала датчика и массива и параметры ползучести массива. При этом скважина, в которой установлен датчик, должна быть достаточно длинной, чтобы датчик находился вне зоны влияния выработки, из которой пробурена скважина.

Полагая в формуле (4.13) $p=0$, выразим напряжения в массиве горных пород через максимальное касательное напряжение в датчике:

$$q = -4\tau_{\max}/b_1. \quad (4.17)$$

Полученное выражение можно использовать для определения напряжения нетронутого массива, если его напряженное состояние близко к одноосному.

Используя зависимость, аналогичную (2.13), запишем выражение для величины относительной ошибки в определении напряжения в массиве, если допущена ошибка в определении величины модуля упругости массива:

$$\delta = (q' - q)/q = b_1/b'_1 - 1. \quad (4.18)$$

Здесь b_1 задается первой из формул (4.10) при истинном значении модуля упругости массива E , а b'_1 задается той же формулой, но при приближенном значении модуля упругости массива E' .

Если датчик абсолютно жесткий, т. е. $G_1 \rightarrow \infty$, то

$$b_1|_{G_1 \rightarrow \infty} = b'_1|_{G_1 \rightarrow \infty} = (1 - \kappa\bar{G}/\kappa G)/2, \quad (4.19)$$

т. е. b_1 и b'_1 равны между собой и не зависят от E , и тогда $\delta=0$.

Таким образом, с увеличением жесткости датчика относительная ошибка в определении напряжений в массиве при неточном знании величины модуля упругости массива стремится к нулю. Этот вывод совпадает с изложенной выше теорией о классификации датчиков по жесткости. Отсюда следует, что эта классификация остается справедливой и при измерении напряжений нетронутого массива с помощью фотоупругих датчиков, если массив обладает свойством ползучести, описываемым линейной теорией наследственности.

**§ 4. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ
КОЛЬЦЕВОГО ФОТОУПРУГОГО ДАТЧИКА
С ПОРОДОЙ,
ОБЛАДАЮЩЕЙ СВОЙСТВОМ ПОЛЗУЧЕСТИ**

Деформации ползучести породы вызывают в датчике появление напряжений, величина которых задается формулами (4.4) и которые сопровождаются возникновением оптической картины. Как уже отмечалось, оптическую картину в датчике удобно изучать по картинам изолиний максимальных касательных напряжений. На рис. 22 изображен набор картин изолиний τ_{\max} в датчике, рассчитанных на ЭВМ М-20 для следующих данных: $E_1 = 6,3 \cdot 10^7$ кгс/см²; $E = 1,575 \cdot 10^5$ кгс/см²; $\nu_1 = 0,21$, $\nu = 0,25$, $q = 1$ кгс/см², $m = 6$; $\alpha = 0,726$, $\beta = 0,0094$ с^{-0,274}, $t = 60$ и 600 ч и ряда значений λ при условии — датчик и массив находятся в состоянии плоской деформации.

Таблица 10

Влияние ползучести на показания датчиков

Точка	λ	$t=60$ ч		$t=600$ ч		Упругие τ_{\max} кгс/см ²
		τ_{\max} кгс/см ²	% от упругих	τ_{\max} кгс/см ²	% от упругих	
A	0,75	0,542	35,6	0,822	53,8	1,527
	0,5	0,576	33,6	0,834	52,2	1,714
	0,25	0,610	32,1	0,965	50,8	1,901
	0	0,648	31,1	1,036	49,6	2,088
	-0,5	0,711	28,8	—	—	2,462
	-0,75	0,745	28,2	—	—	2,649
	-1	0,779	27,6	—	—	2,836
S	0,75	0,347	42,4	0,493	60,1	0,818
	0,5	0,187	63,0	0,234	79,0	0,296
	0,25	0,023	10,2	0,025	11,2	0,226
	0	0,135	18,2	0,284	38,2	0,742
	-0,5	0,457	25,5	—	—	1,792
	-0,75	0,618	26,6	—	—	2,314
	-1	0,770	27,6	—	—	2,836
H	0,5	0,117	28,4	0,194	47,0	0,412
	0,25	0,116	27,5	0,278	46,0	0,603
	0	0,217	27,2	0,364	45,6	0,796
	-0,5	0,325	27,4	—	—	1,184
	-0,75	0,380	27,6	—	—	1,380
	-1	0,425	27,0	—	—	1,576
C	0,75	0,076	31,2	0,121	49,7	0,243
	0,5	0,111	29,5	0,180	47,6	0,377
	0,35	0,146	28,5	0,240	47,0	0,510
	0	0,180	27,9	0,299	46,4	0,644
	-0,5	0,250	27,4	—	—	0,912
	-0,75	0,280	26,7	—	—	1,045
	-1	0,316	26,8	—	—	1,179

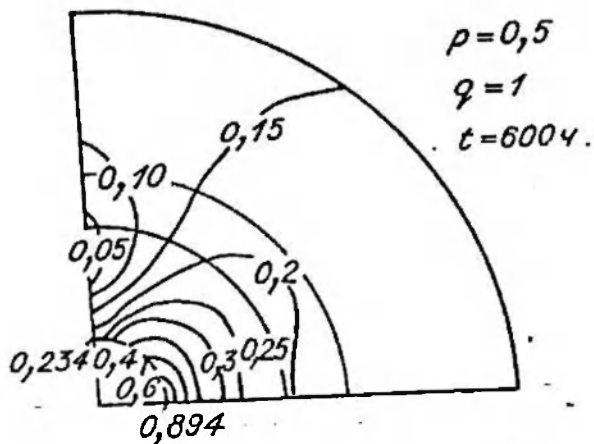
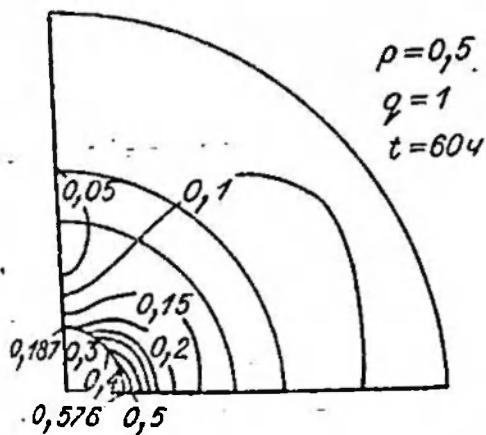
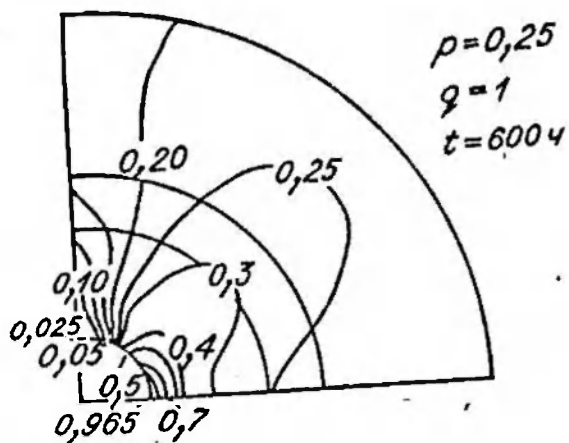
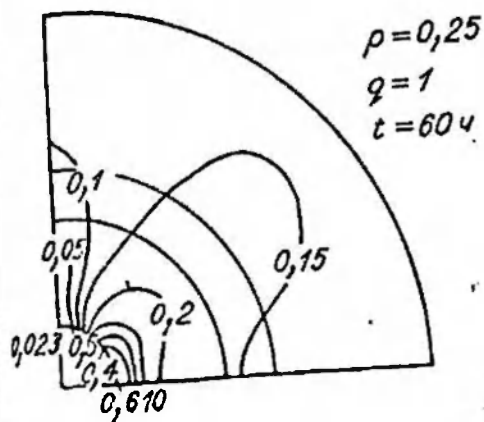
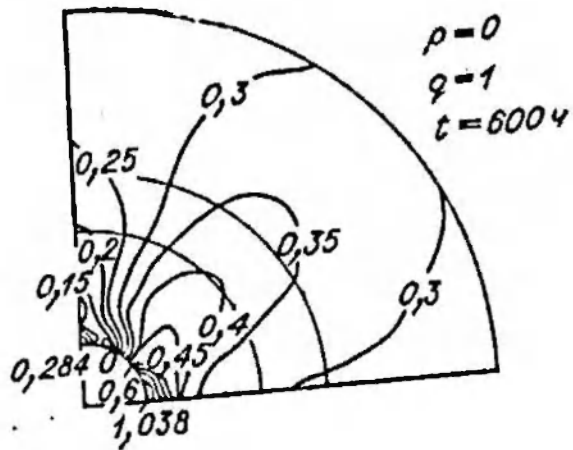
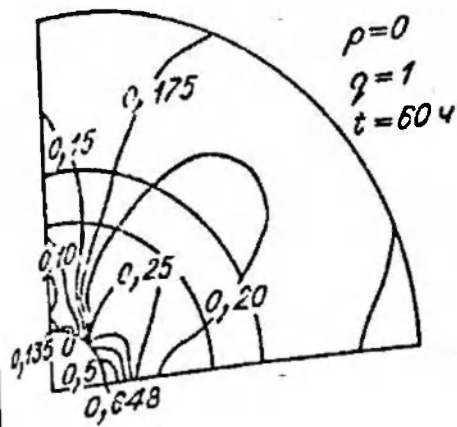


Рис. 22. Изолинии максимальных касательных напряжений в фотоупругом датчике, обусловленных ползучестью горных пород.

Из анализа этих картин и теоретического решения можно сделать следующие выводы.

1. При $t=0$ напряжения в датчике равны нулю и оптическая картина наблюдаться не будет.

2. При $t>0$ в датчике появляются напряжения, вызываемые процессом ползучести исследуемого массива, что должно сопровождаться возникновением в датчике оптической картины. С течением времени эти напряжения увеличиваются. Так, для $\lambda=0$ при $t=60$ ч в точке А $\tau_{\max}=0,648$ кгс/см², а при $t=600$ ч $\tau_{\max}=1,036$ кгс/см².

3. При постоянном $\lambda \neq 1$ характер узора оптической картины изменяется с течением времени, хотя и незначительно. Это изменение в какой-то мере повторяет изменение узора изолиний τ_{\max} , наблюдающееся при постепенном увеличении λ в случае чисто упругих деформаций.

4. С изменением величины λ узор оптической картины в датчике изменяется в той же последовательности, что и в упругом случае.

Картина имеет две оси симметрии, совпадающие с направлениями главных напряжений в массиве (точнее, квазиглавных). При $\lambda=1$ изолиний τ_{\max} принимают вид concentрических окружностей.

Сравним величину напряжений в датчике, обусловленную деформациями ползучести породы, при $q=1$ кгс/см² и величину напряжений в датчике от чисто упругих деформаций породы при приложении усилия $q=1$ кгс/см² (табл. 10). Как видно из таблицы, напряжения в датчике вследствие ползучести массива через $t=60$ ч достигают в среднем 30% от напряжений, вызываемых соответствующими упругими деформациями.

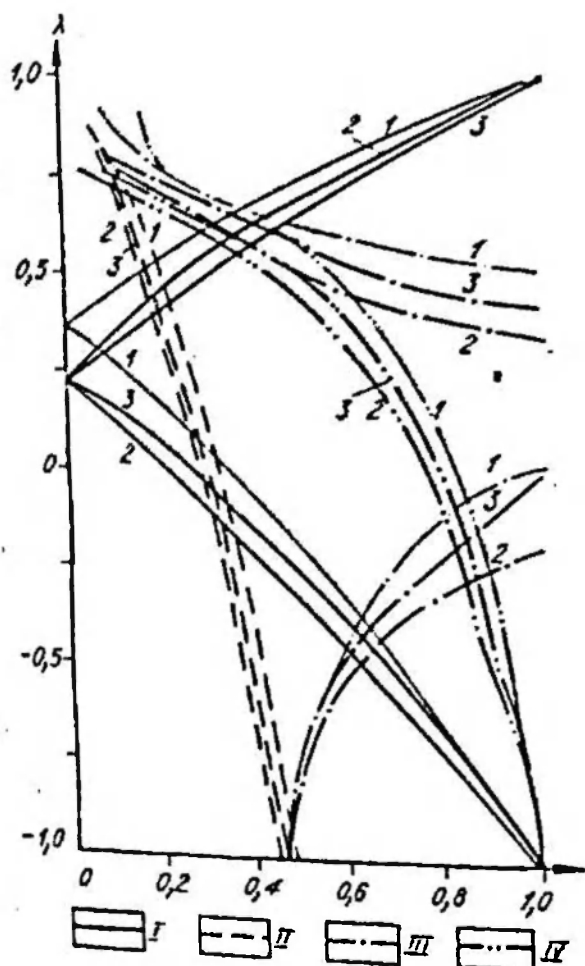


Рис. 23. Графики для определения коэффициента λ по отношению отсчетов в точках S/A (I), D/A (II), D/S (III), F/C (IV) при деформациях ползучести, когда значения времени равны нулю (1), 60 ч (2) и 600 ч (3).

ми, а через $t=600$ ч составляют 50% от упругих. При практических измерениях данные табл. 10 можно использовать для оценки влияния ползучести массива на общие показания датчика.

Графики для оценки величины коэффициента λ в нетронутом массиве горных пород (рис. 23) можно использовать для оценки коэффициента λ также в случае, когда датчик находится под действием только деформаций ползучести, обусловленных изменением напряжений в массиве. Графики в случае ползучести несколько отличаются от аналогичных графиков для упругих деформаций массива. Все кривые, за исключением S/A при $\lambda > 0,25$, с течением времени действия ползучести смещаются к кривым, соответствующим случаю упругих деформаций.

§ 5. МЕТОДИКА И НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД И ДРУГИХ МАТЕРИАЛОВ С ПОМОЩЬЮ ФОТОУПРУГИХ ДАТЧИКОВ

Для проверки изложенных выше теоретических выводов и исследования работы датчиков в реологической среде были проведены лабораторные эксперименты с образцами из различных горных пород (песчаник, алевролит, уголь), а также из искусственных материалов (красный строительный кирпич, силикатный кирпич, образцы из гипса и бетона) [19]. Образцы из пород были изготовлены в виде пластины размером $120 \times 120 \times 40$ мм, из угля размером $150 \times 150 \times 60$ мм. Строительный кирпич использовался стандартный, выпускаемый промышленностью. Образцы из алебаstra готовились в виде пластины размером $240 \times 120 \times 50$ мм и из бетона размером $150 \times 150 \times 80$ мм. В центре каждой пластины сверлилось отверстие диаметром 36,5 мм, в которое вклеивался фотоупругий датчик. Для приклеивания датчиков использовался клей холодного отверждения на основе эпоксидной смолы ЭД6.

Нагружение пластин с вклеенными датчиками производилось на рычажном прессе типа УМ-5 с максимальным усилием до 5 т при одноосном нагружении. Нагрузка прикладывалась плавно со скоростью 10—15 кгс/с. Величина нагрузок принималась в пределах 10—50% от разрушающей. Часть образцов доведена до разрушения. Испытания проводились как в условиях постоянной нагрузки, так и в условиях постоянной деформации.

Условие постоянной деформации обеспечивалось следующим образом. Пластина с датчиком нагружалась до заданной нагрузки, после чего рычаг пресса закреплялся в непод-

движном положении с помощью специального приспособле-
ния (предложено Г. Ф. Бобровым).

Условие постоянной нагрузки на рычажном прессе обес-
печить труднее, поскольку нагруженный образец с течением
времени в результате деформаций ползучести несколько
уменьшается по высоте, что приводит к перемещению рычажной
системы пресса и, следовательно, к некоторому умень-
шению нагрузки на образец. В опытах был использован неко-
торый метод регулирования нагрузки, состоящий в следующем: на
каждом отсчете по датчику нагрузка на образец доводилась
до первоначальной, а отсчет брался до и после такого регу-
лирования. При этом величина отклонения нагрузки от за-
данной колебалась от 5 до 20 кгс в сторону уменьшения при
исходной нагрузке 2 т, т. е. условие постоянства нагрузки вы-
держивалось с точностью не менее 1%.

На точность опытов определенное влияние оказывала так-
же точность отсчетов по оптической картинке в датчике. Ис-
пользованный в опытах полярископ не позволял уверенно
проводить отсчеты с точностью выше 0,1—0,2 полосы, наблю-
даемой в датчике, что соответствует изменению напряжений
в образце примерно на 0,8—1,6 кгс/см².

Отсчеты проводились: первый сразу после нагружения,
затем в первые 1—2 ч через 10—15 мин, в течение следую-
щих 4—5 ч через 1—2 ч, затем 1—2 раза в сутки и, наконец,
1 раз в 2—3 сут.

Во всех случаях при нагружении образца постоянной по
величине нагрузкой, т. е. при условии постоянства напряже-
ний в образце, деформации ползучести материала образца
приводили к росту показаний фотоупругого датчика. Эти ре-
зультаты подтверждают теоретические выводы. В условиях

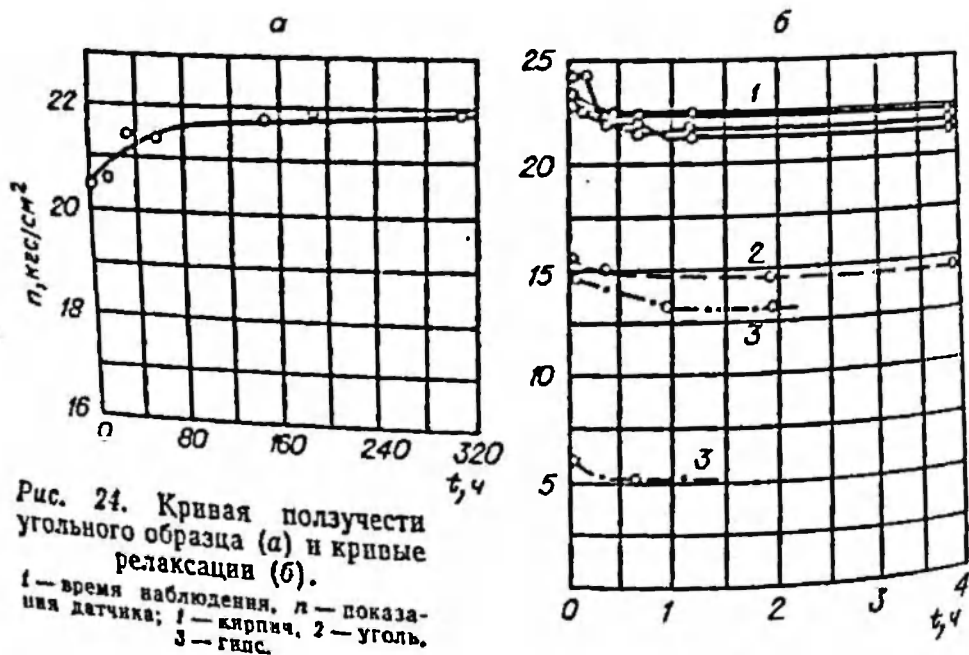


Рис. 24. Кривая ползучести
угольного образца (а) и кривые
релаксации (б).

л — время наблюдения, л — показани-
я датчика; 1 — кирпич, 2 — уголь,
3 — гипс.

постоянной деформации релаксация напряжений в пластине во всех опытах, за исключением опытов с бетонными кубиками, приводила к снижению показаний датчика, что также не противоречит полученным выше выводам.

В качестве примера приведем график результатов испытания одного из угольных образцов при условии постоянной нагрузки (рис. 24.а). Длительность наблюдений составила около 320 ч. Экспериментальные точки оказалось возможным аппроксимировать степенной функцией вида

$$n = n_0 + n_0 \delta (1 - \alpha)^{-1} t^{1-\alpha} \quad (4.20)$$

где n — показания датчика в любой момент времени, кгс/см²; n_0 — показания датчика в момент приложения нагрузки, кгс/см²; t — время, α и δ — параметры кривой, причем $\alpha = 0,836$, $\delta = 0,00175 \text{ с}^{-0,174}$.

Сделаем некоторые пояснения. Величина n_0 соответствует приросту напряжений в пластине от упругих деформаций в момент приложения нагрузки. Величина n соответствует сумме напряжения n_0 и некоторого фиктивного прироста напряжений $n_0 \delta (1 - \alpha)^{-1} t^{1-\alpha}$, фиктивного в том смысле, что оно вычислено путем формального пересчета показаний датчика в напряжения в материале образца.

Вид уравнения (4.20) принят из следующих соображений. Если для материала пластины принять абелево ядро ползучести (4.3) и вычислить интеграл в выражении (4.2), соответствующем одноосному нагружению, полагая $\sigma(t) = \text{const}$, что имеет место в условиях описываемого опыта для точек образца, расположенных вдали от датчика, то получим выражение

$$\epsilon(t) = \sigma/E + (\sigma/E) \delta (1 - \alpha)^{-1} t^{1-\alpha} \quad (4.21)$$

Структура выражения (4.20) принята аналогичной структуре выражения (4.21). В действительности эта аналогия имеет глубокий смысл.

Можно показать, что если свойства ползучести материала образца описываются абелевым ядром наследственности, то параметры α и δ в уравнении (4.20), аппроксимирующем кривую нагружения образца, построенную по показаниям фотоупругого датчика, являются параметрами этого ядра.

Сравнение значений α и δ с данными, полученными при испытании на ползучесть образцов в виде балочек [29], показывает, что параметр α согласуется достаточно хорошо с результатами испытания балочек на изгиб, значение же параметра δ несколько меньше. Впрочем, объем опытов совершенно недостаточен для окончательных выводов.

В качестве примера испытаний при постоянной деформации приведем результаты опытов по нагружению образцов

КОНСТРУКЦИИ ДАТЧИКОВ И ПОЛЯРИСКОПОВ

§ 1. ДАТЧИКИ

В настоящей работе, как уже отмечалось, под фотоупругими датчиками понимаются только скважинные приборы, предназначенные для измерения деформаций и напряжений, имеющие в качестве основной части элемент цилиндрической формы с осевым отверстием или без такового, изготовленный из оптически чувствительного материала. Предполагается, что датчик взаимодействует со стенками скважины только по своей боковой цилиндрической поверхности.

Все известные фотоупругие датчики можно разделить на два типа: работающие в отраженном свете (обозначим их ФДО — фотоупругие датчики отражательного типа) и работающие в проходящем свете (ФДП — фотоупругие датчики проходящего света). В датчиках проходящего света луч проходит только один раз через фотоупругий чувствительный элемент, а в датчиках отражательного типа — 2 раза. Поэтому при прочих равных условиях чувствительность датчиков отражательного типа в 2 раза выше.

Тип датчиков в значительной степени определяет требования к методике их установки, к применяемым при этом приспособлениям, а также к полярископам, используемым для наблюдения.

По конструкции чувствительного элемента различают сплошные датчики и датчики с осевым отверстием.

Фотоупругий датчик в зависимости от соотношения модулей упругости материала датчика и исследуемой среды может работать в режиме либо датчика напряжений, либо деформометра (см. выше о классификации фотоупругих датчиков по жесткости).

В качестве оптически чувствительных материалов для изготовления датчиков используются различные оптические стекла, органическое стекло, материал типа СД, отвержденные эпоксидные смолы и др. (табл. 11).

Рассмотрим конструктивные разновидности фотоупругих датчиков.

Характеристика оптически чувствительных материалов

Материал	Оптический коэф. напряжения (при $\lambda=550$ мкм), мкм·см/кгс	Модуль упругости $E \cdot 10^{-5}$, кгс/см ²	Кэф. Пуассона ν	Цена пологсы материала σ_0 (1,0), кгс/см ²	Примечание
Стекло марки:					ГОСТ 13659-68
ЛК4	3,60	6,940	0,205	153	
K1	3,45	6,320	0,226	160	
K8	2,65	8,230	0,209	208	
TK23	2,25	8,430	0,260	228	
СТК10	2,35	11,140	0,310	234	
Отвержденная эпоксидная смола ЭД6М	50,00	0,35	0,36	11	
Органическое стекло	2,70	0,34	0,35	200	Один из сортов [33]
Материал типа СД	4,5+7,0	0,30	0,35	35÷55	

Датчик отражательного типа в виде цилиндра с осевым отверстием впервые предложен в Киотском университете (Япония) [6]. Этот датчик изготовлялся из боросиликатного стекла и имел длину 30 мм, внешний диаметр 36 мм, внутренний 6 мм. Один из торцов датчика покрывался зеркальным слоем. На втором торце были нанесены две делительные окружности.

Используемый в ИГД МЧМ (г. Свердловск) датчик отражательного типа [14] изготовлялся из оптического стекла марки К8. Длина датчика 10 мм, внешний диаметр 35 мм, внутренний 5 мм. На заднюю торцевую поверхность для защиты зеркального слоя дополнительно наносился слой отвержденной эпоксидной смолы. Делительные окружности на лицевой стороне этого датчика отсутствуют. Отсчеты производятся только по точкам А и S. Для защиты лицевой поверхности датчика от затеков клея с лицевой стороны устанавливается кольцо из латуни.

Данные о датчиках отражательного типа, используемых в лабораторных и шахтных исследованиях Лабораторией горного давления ИГД СО АН СССР, приведены в табл. 12. Зеркальный слой во всех датчиках защищен слоями лака и эпоксидной смолы холодного отверждения. Защитное кольцо из жести или латуни обычно изготавливается шириной 10—15 мм и диаметром на 0,05—0,1 мм больше наружного диаметра датчика. Кольцо приклеивается к датчику с помощью клея холодного отверждения на основе эпоксидной смолы. Конструкции описанных датчиков изображены на рис. 25, а. На лицевой стороне датчиков диаметром 36 и 48 мм наносятся две делительные окружности диаметром 16 и 21 мм.

Таблица 12

Характеристика датчиков, работающих в отраженном свете

Материал	Размеры, мм			Объемный вес, г/см ³	Опич. по- стоянная по напряжен- ям, мкс·см/ кгс	Модуль уп- ругости ЕХ ×10 ⁻⁵ , кгс/см ²	Кэфф. Пуассона ν	Изготовитель
	наружный диаметр	внутрен- ный диа- метр	длина					
Боросиликатное стекло	30	6	30	2,51	2,65	6,30	0,20	Фирма «Sokki- sha» (Япо- ния)
Стекло марки: К8	30	6	30	2,50	2,65	8,23	0,21	
TK23	30	6	30	3,21	2,25	8,43	0,26	ИГД СО АН СССР ГОИ им. С. В. Вавилова
К8	40	7	30	2,55	2,65	8,23	0,21	
К8	40	0	66	2,50	2,65	8,23	0,21	ИГД СО АН СССР > >
К8	48	8	30	2,50	2,65	8,23	0,21	
СД-5	30	6	100	1,18	5,75	0,30	0,35	
СД-5	30	6	60	1,18	5,75	0,30	0,35	
СД-5	30	5	30	1,18	5,75	0,30	0,35	
СД-8	18	3	10	1,20	5,50	0,30	0,35	
Отвержденная эпоксидная смола	30	6	60	1,24	50,0	0,30	0,36	

Для выделения точек Q, R, M, K , расположенных вблизи внутреннего отверстия датчика, вместо делительных окружностей удобнее устанавливать втулку из непрозрачного материала, укрепляемую в осевом отверстии датчика (рис. 25, б). Диаметр буртика втулки должен соответствовать положению точки, выбранной для отсчетов.

Для защиты зеркального слоя иногда удобно использо- вать специальные деревянные пробки (рис. 25, в).

Фотоупругий датчик, работающий в проходящем свете, впервые разработан в Шеффилдском университете (Великобритания) [8]. Этот датчик (рис. 26) состоит из чувстви- тельного элемента 1 в виде цилиндра длиной 38 мм и диаметром 32 мм с осевым отверстием диаметром 6 мм. Позади чувствительного элемента расположена капсула 2, изготовленная из прозрачного материала, обычно оргстекла. Задняя стенка капсулы выполнена в форме параболоида, в фокусе которого расположено гнездо с электролампочкой 3. Параболическая поверхность покрыта зеркальным слоем и служит для создания пучка параллельных лучей света, направляемых в чувствительный элемент. Между кап- сулой 2 и чувствительным элементом 1 расположен поляри- зационный фильтр 4, состоящий из поляроида и четверть- волновой пластинки. Капсула 2 и поляризационный фильтр 4 заключены в защитный чехол 5 из органической пленки.

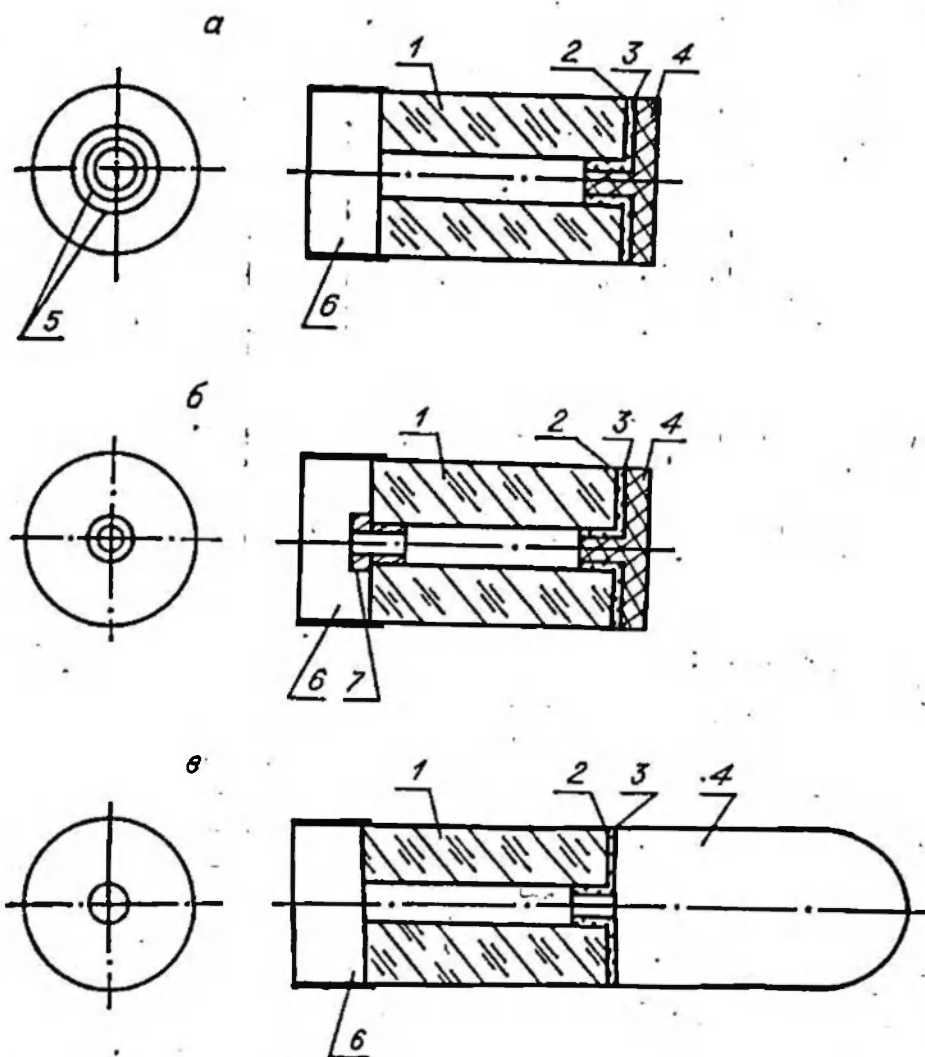


Рис. 25. Схемы датчиков отражательного типа.

а — с делительными окружностями; б — с втулкой; в — с защитной пробкой.
 1 — чувствительный элемент; 2 — зеркальный слой; 3 — защитное покрытие;
 4 — защитная пробка; 5 — делительные окружности; 6 — защитное кольцо; 7 — втулка.

Через осевое отверстие в стеклянном цилиндре и поляризационном фильтре пропущен провод 6 от электролампочки. С внешней стороны датчика провод крепится в осевом отверстии с помощью пластмассовой втулки 7, буртик которой одновременно служит для фиксации точек отсчета К.

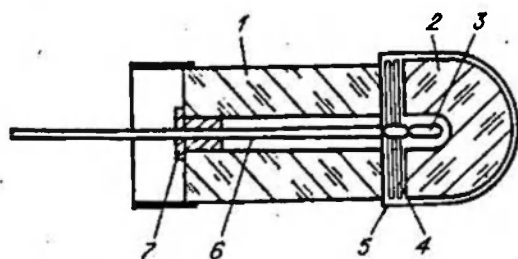


Рис. 26. Схема датчика, работающего в проходящем свете.

Таблица 13

Характеристика датчиков, работающих в проходящем свете

Материал	Размеры датчика, мм		Размеры чувствительного элемента, мм			Оптич. постоянная по направлению, $\text{мкм}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{кгс}$	Модуль упругости $E \cdot 10^{-5}$, $\text{кгс}/\text{см}^2$	Кэф. Пуассона ν	Напряжение питания, В	Изготовитель
	длина	диаметр	наружный диаметр	внутренний диаметр	длина					
Стекло	80	33	32	6	32	2,7	7,00	0,204	6	Фирма «Hoptman» (Англия)
Стекло КВ	76	48	45	8	30	2,65	8,23	0,207	6	

На базе этого датчика в Шеффилдском университете разработан датчик с переносным источником света. Он представляет собой миниатюрную электролампочку диаметром 4 мм, укрепленную на конце тонкого стержня, внутри которого пропущены провода. Диаметр лампочки и стержня меньше диаметра осевого отверстия датчика. С помощью стержня лампочка через осевое отверстие в датчике вводится в гнездо капсулы с параболическим зеркалом.

Разработанный Д. П. Сенук в ИГД СО АН СССР датчик проходящего света имеет внешний диаметр чувствительного элемента 45 мм, длину 30 мм. Диаметр осевого отверстия этого датчика 8 мм.

Датчики, работающие в проходящем свете (табл. 13), используются в Лаборатории горного давления ИГД СО АН СССР в основном при измерениях в глубоких скважинах.

§ 2. ПОЛЯРИСКОПЫ

Для наблюдения оптической картины в фотоупругих датчиках разработано несколько различных конструкций полярископов.

Портативный шахтный полярископ фирмы «Sokkisha Co Ltd» разработан в 50-х годах в Киотском университете (Япония) и предназначен для наблюдения оптической картины в датчиках отражательного типа [6, 7]. Это прибор одностороннего действия с полупрозрачным зеркалом (см. рис. 1, в).

Конструкция полярископа изображена на рис. 27. Свет от источника света S через конденсор L_1 , собранный из двух линз, поляризатор P и компенсатор C попадает на полупрозрачное зеркало G , расположенное под углом 45° к оси прибора. Отражаясь от полупрозрачного зеркала, свет проходит через конденсор L_2 , дающий параллельный пучок

света, и поступает в датчик M . Отразившись от зеркального слоя T датчика, луч света снова поступает в полярископ, проходит через конденсор L_2 , полупрозрачное зеркало G , анализатор A и через окуляр E попадает к наблюдателю. В поле зрения при этом видна оптическая картина в датчике. В описанном варианте наблюдения ведутся в плоскополяризованном свете.

В этом полярископе возможна и круговая поляризация по схеме, приведенной на рис. 1, г. Для этого совместно с поляризатором P и анализатором A устанавливаются четвертьволновые пластинки Q_1 и Q_2 .

Для измерения разности хода лучей полярископ снабжен съемным компенсатором C типа Бабиня, который устанавливается в фокусе конденсора L_1 и рассчитан на компенсацию пяти порядков.

Для защиты от попадания загрязнений имеются два стекла E и F , на последнем нанесено перекрестие, служащее для удобства наблюдения. В комплект прибора входит батарея из двух элементов типа «Марс». Описанный полярископ позволяет наблюдать оптическую картину на расстоянии от полярископа до датчика 5—8 см.

В последующие годы полярископы, аналогичные описанному, разработаны в Институте горного дела им. А. А. Скочинского [2], в Институте горного дела МЧМ СССР (г. Свердловск) [14], в Шеффилдском университете [34]. В последнем в качестве источника света применен головной шахтный аккумуляторный светильник.

Позднее в ИГД МЧМ СССР (г. Свердловск) был разработан полярископ одностороннего действия с полупрозрачным зеркалом, позволяющий наблюдать оптическую картину в датчике на расстоянии 10—12 м (при использовании объектива типа «Таир» [35]).

В настоящее время на базе модели шахтного полярископа одностороннего действия, разработанной в Государственном оптическом институте им. С. В. Вавилова (г. Ленинград), освоен выпуск полярископов типа ПШП на Загорском оптико-механическом заводе. Полярископ разработан в двух вариантах: в нормальном исполнении и во взрывобезопасном и предназначен для наблюдения фотоупругих датчиков на расстоянии до 10 м.

Для наблюдения датчиков, работающих в проходящем свете, в Шеффилдском университете использовался простейший полярископ, состоящий из анализатора и четвертьволновой пластинки. Этот полярископ работает по схеме, приведенной на рис. 1, б. Поляризатор и вторая четвертьволновая пластинка расположены между источником света и датчиком (с другой стороны от датчика, нежели наблюдатель) и конструктивно входят в датчик. В полярис-

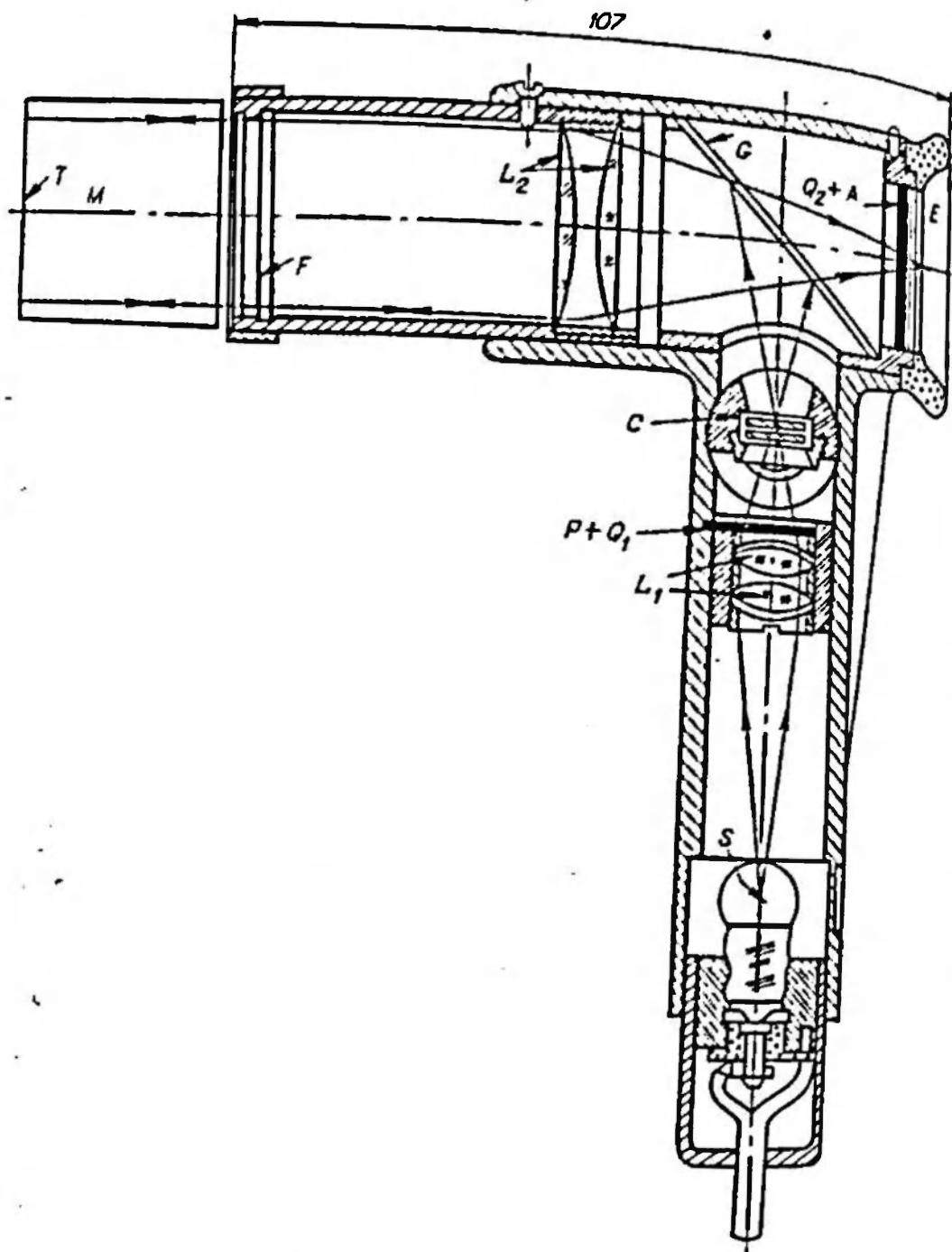
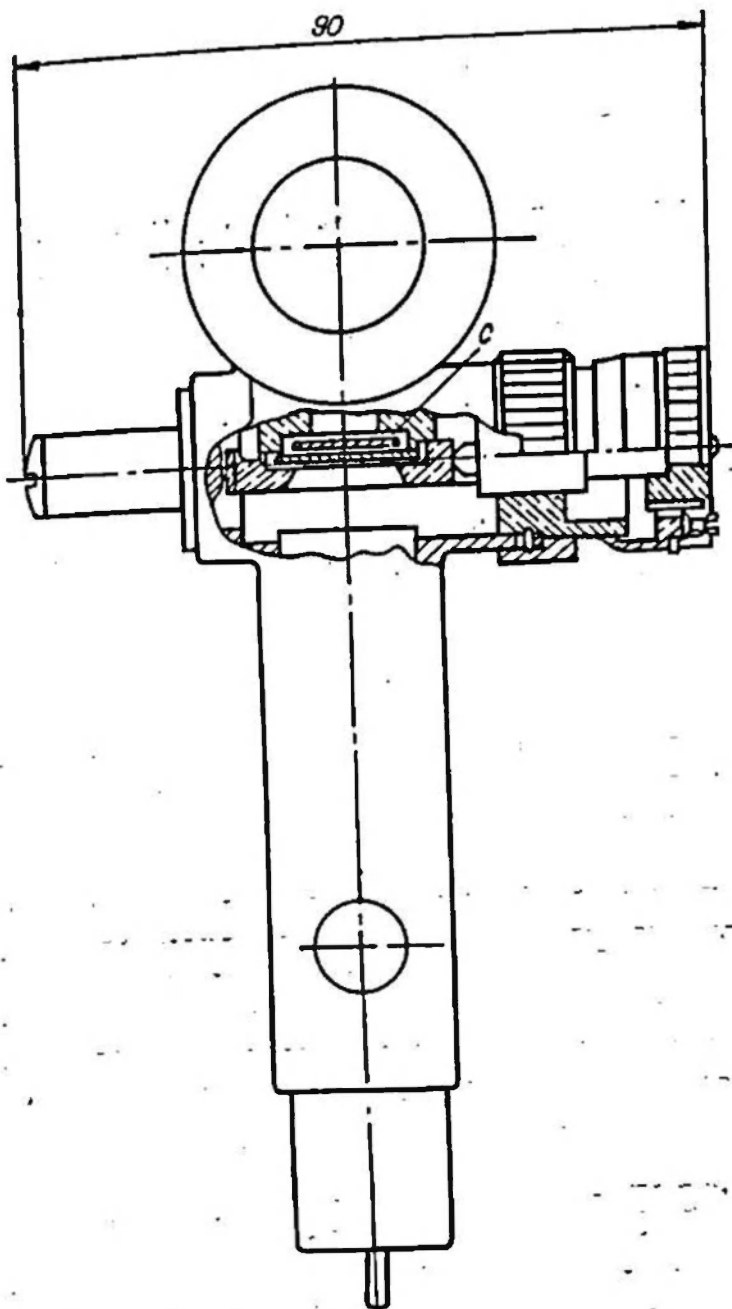


Рис. 27. Принципиальная схема шахтного полярника

копе предусмотрена возможность поворота анализатора относительно четвертьволновой пластинки, т.е. полярископ позволяет проводить компенсацию по методу Тарди. На внешней стороне корпуса прибора нанесена шкала на 100 делений.

При наблюдении полярископ устанавливается на нуль и его оптическая ось совмещается с большей осью симметрии оптической картины в датчике. После этого диск с анализатором поворачивается до тех пор, пока в точке отсчета не появится полоса целого порядка, после чего по



скопа фирмы «Sokkisha Co Ltd» (Япония). Разрез.

шкале отсчитывается дробный порядок. Целое число полос отсчитывается непосредственно по оптической картине.

С помощью описанного полярископа можно также определять знак наибольшего главного напряжения в породе. Если при вращении диска с анализатором по часовой стрелке порядок полосы в какой-либо точке датчика увеличивается, то наибольшее главное напряжение в породе растягивающее, если же при повороте анализатора по часовой стрелке порядок полосы уменьшается, то наибольшее по абсолютной величине главное напряжение в породе сжи-

мающее. Это относится к случаю, когда датчик изготовлен из материала с положительной оптической активностью.

В ИГД СО АН СССР для наблюдения оптической картины в фотоупругих датчиках отражательного типа применяется полярископ V-образного типа, состоящий из одного поляроида и четвертьволновой пластинки (см. рис. 1, к). В качестве источника света в этом случае при лабораторных исследованиях можно использовать обычный карманный фонарик, а при шахтных наблюдениях — шахтный головной аккумуляторный светильник.

Полярископ помещается между глазом наблюдателя и датчиком, при этом поляроид обращен в сторону наблюдателя, а четвертьволновая пластинка — в сторону датчика. Источник света располагается так, чтобы часть поляроида оставалась открытой для наблюдения.

При повороте поляроида относительно четвертьволновой пластинки картина меняется, что можно использовать для определения знака наибольшего главного напряжения в породе.

Если полярископ повернуть так, чтобы четвертьволновая пластинка была обращена к наблюдателю, а поляроид — к датчику, то отсчет в тех же точках оптической картины изменится точно на половину полосы в сторону уменьшения (при сжимающем наибольшем главном напряжении в породе) или в сторону увеличения (в противном случае). Однако четкая оптическая картина при таком положении полярископа наблюдается только при ориентации оптической оси прибора под углом 45° к осям симметрии картины. Первую из этих особенностей можно использовать для контроля отсчетов, вторую — для измерения угла наклона большей оси симметрии оптической картины в датчике.

В ИГД СО АН СССР также разработан и используется для наблюдения оптической картины в фотоупругих датчиках полярископ V-образного типа, работающий по схеме, приведенной на рис. 1, з. Этот полярископ состоит из двух поляризационных фильтров, установленных в общем корпусе (рис. 28). В качестве источника света используется шахтный головной аккумуляторный светильник. Для обеспечения компенсации по методу Тарди поляризатор помещен в диск, который снабжен шкалой на 100 делений и может поворачиваться относительно корпуса прибора на 360° .

Прибор позволяет также измерять углы наклона осей симметрии оптической картины, для чего в корпусе прибора укреплен подвижная стрелка-отвес, а на крышке имеется дополнительная шкала в градусах.

Описанный полярископ позволяет наблюдать оптическую картину в датчиках, установленных в скважинах на

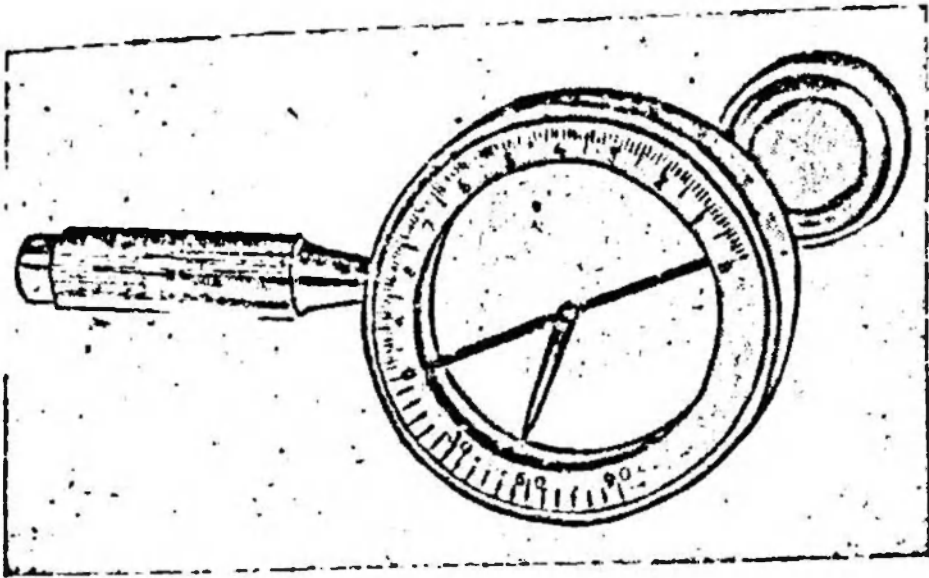


Рис. 28. Шахтный полярископ V-образного типа.

глубине 1—2 м. Вес прибора при условии, что корпус изготовлен из алюминия, составляет 200 г.

Полярископы с компенсаторами могут использоваться для определения знака кольцевых напряжений σ_θ в точках A и S на внутреннем свободном контуре датчика. Из общей теории поляризационно-оптического метода известно, что одним из условий компенсации является совпадение оси компенсатора с направлением алгебраически наименьшего главного напряжения. Поэтому если компенсация в точках A или S будет достигнута при положении оси компенсатора перпендикулярно к контуру, то напряжение на контуре растягивающее. Для определения знака напряжений в точках A и S можно воспользоваться и компенсаторами растяжения (сжатия). В этом случае используется растянутый (сжатый) образец из оптически чувствительного материала. Если компенсация достигается, когда растянутая полоска нормальна к контуру, то контурное кольцевое напряжение σ_θ является растягивающим. Если компенсация достигается, когда растянутая полоска направлена вдоль контура, то контурное кольцевое напряжение σ_θ является сжимающим.

ВОПРОСЫ ШАХТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Фотоупругие датчики, главным образом из оптического стекла, нашли применение для измерения напряжений в осадочных горных породах [18—20], в скальных породах [4, 14], в бетонной крепи стволов и капитальных горных выработок [34], в деревянной крепи горных выработок [37], а также для решения ряда других задач горной механики, в том числе в комплексе с замерами смещений для определения модуля упругости и параметров ползучести горных пород [38].

§ 1. МЕТОДИКА УСТАНОВКИ ДАТЧИКОВ

Фотоупругий датчик — это оптический прибор, устанавливаемый в скважине и приклеиваемый к ее боковым стенкам. В результате приклеивания обеспечивается совместная работа (совместное деформирование) датчика с исследуемым материалом.

Для бурения скважины можно использовать любое имеющееся в наличии буровое оборудование. При выборе диаметра скважины следует стремиться к минимально возможной толщине слоя клея, чтобы уменьшить или вообще исключить влияние клея на показания датчика. Для обеспечения толщины слоя клея не более 1 мм диаметр буровой коронки следует принимать либо равным диаметру датчика — при установке датчика в относительно слабых породах, либо на 0,2—0,5 мм больше диаметра датчика — при измерениях в крепких породах. При установке датчика с использованном эжекторе (см. ниже) диаметр буровой коронки следует принимать с учетом диаметра эжектора.

В настоящее время на угольных шахтах нашей страны используется в основном буровое оборудование, рассчитанное на бурение буровзрывных скважин диаметром 41—43 мм. Скважины другого диаметра используются значительно

реже — для увлажнения угля, дегазации, геологоразведки и др. В связи с этим наиболее удобно использовать датчики диаметром 40 мм. В тех случаях, когда диаметр имеющихся в наличии датчиков меньше размера используемого на данной шахте бурового оборудования, толщину слоя клея при установке датчиков можно увеличить. Однако, чтобы избежать осложнений с учетом влияния толщины слоя клея, лучше использовать специальные буровые штанги и корки, диаметр которых соответствует диаметру датчиков.

При мокром бурении с использованием круглой или шестигранной буровой стали обычно достаточно применять коронку нужного диаметра. При сухом бурении с использованием витой буровой стали необходимо изготавливать специальные буровые штанги. Для установки датчиков на глубину до 1—1,5 м можно изготовить одну буровую штангу и несколько коронок. Диаметр буровой штанги во всех случаях следует принимать на 2—3 мм меньше диаметра датчика, чтобы не разбивало шпур в процессе бурения. При установке датчиков на большую глубину бурение обычно производят составными штангами. В связи с этим для бурения скважин под датчики небольшого диаметра удобно использовать обычные буровые штанги и коронки и только последнюю часть скважины добуривать с использованием специальной штанги переменного диаметра длиной 1,0 м. На половине длины со стороны хвостовика ее диаметр равен диаметру стандартной буровой штанги, а вторая половина со стороны коронки обтачивается до диаметра, соответствующего диаметру датчика (на 1—2 мм меньше диаметра датчика). Утолщенная часть служит для центрирования штанги в скважине в процессе бурения. В результате последняя часть скважины, где устанавливается датчик, на участке длиной 0,5 м имеет меньший диаметр. Следует заметить, что увеличенный диаметр скважины перед датчиком улучшает условия наблюдения датчика.

Если диаметр датчика больше, чем диаметр стандартного бурового оборудования, необходимо изготовить специальную коронку при мокром бурении и коронку и буровые штанги при сухом бурении. Заметим, что для бурения скважин диаметром 48—50 мм не удастся использовать стандартные штанги диаметром 36—38 мм, так как стенки скважины оказываются сильно искривленными, а сечение шпура получается не круглым, а эллиптическим.

При установке датчиков необходимо соблюдать следующие условия.

1. Ось датчика должна совпадать с осью скважины. При смещении оси датчика параллельно оси скважины толщина слоя клея вокруг датчика будет неравномерной,

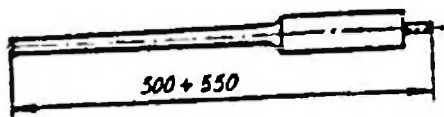


Рис. 29. Схема установочной штанги.

что искажает оптическую картину в датчике. Особенно недопустим перекося датчика в скважине. Например, при отклонении оси датчика от оси скважины на $1,5^\circ$ уже при

установке датчика на глубине 30—40 см оптическая картина в нем не будет видна (такое отклонение возможно при зазоре между датчиком и стенками скважины 0,5 мм). Чтобы обеспечить соосность датчика и скважины, при установке датчика необходимо пользоваться специальной установочной штангой (рис. 29). Приведенная штанга предназначена для установки датчиков на глубину до 0,5 м и состоит из ручки, центрирующего утолщения и шипа для крепления датчика. Имея набор из нескольких штанг с разными центрирующими утолщениями, можно обеспечить требуемую соосность датчика и скважины.

2. Датчик должен устанавливаться на некотором расстоянии от торца скважины, исключая влияние последнего на показания датчика. Практически достаточно, чтобы расстояние от датчика до торца скважины было равно пяти диаметрам скважины. Это требование связано с тем, что приведенные в настоящей работе методы расшифровки оптической картины в датчике получены на основе плоской задачи о взаимодействии фотоупругого датчика с горной породой. На практике между датчиком и торцом скважины обычно устанавливается деревянная пробка длиной 12—20 см, диаметр которой несколько меньше диаметра скважины.

3. Слой клея между датчиком и стенками скважины должен быть равномерным и сплошным, без воздушных пузырей и зазоров. Только в этом случае можно гарантировать достаточно высокую степень симметричности оптической картины в датчике. Для обеспечения равномерности слоя клея при установке датчика рекомендуется использовать специальное эжекторное приспособление для нагнетания клея в зазор между датчиком и скважиной.

4. На качество оптической картины в датчике определенное влияние оказывают неровности стенок скважины, образующиеся при бурении обычными двухперыми коронками. Эти неровности следует убрать кольцевой коронкой, а при ее отсутствии несколько раз «проработать» скважину обычной коронкой, медленно продвигая сверло взад и вперед.

5. Лицевая поверхность датчика должна быть защищена от затеков клея в процессе установки датчика. Такая защита надежно обеспечивается с помощью кольца из жести или латуни шириной 1—2 см, приклеенного с лицевой стороны к датчику (см. рис. 25).

6. Зеркальный слой датчика отражательного типа должен быть надежно защищен от механических повреждений при хранении и установке датчика, от коробления в процессе деформирования датчика при работе его в шпуре и от агрессивного действия шахтных вод и клея.

7. Необходимо защищать осевое отверстие датчика от попадания в него клея, так как в этом случае показания датчика искажаются.

Клей. При установке датчиков можно использовать любые самотвердеющие клеи. Лучше всего, если механические свойства клея близки к таковым для породы, в которой устанавливается датчик.

Клей холодного отверждения на основе эпоксидных смол ЭД6 или ЭД5 с добавлением в качестве отвердителя полиэтиленполиамина. Следует иметь в виду, что при температуре 9—12°C (температура воздуха в шахте) смола ЭД6 является очень густой и вязкой жидкостью, поэтому ее необходимо предварительно на поверхности разводить ацетоном. В качестве наполнителя для придания нужных механических свойств клею в смолу можно добавлять промытый и просушенный песок, угольный штыб и другие материалы. Такие наполнители — хорошее средство против «закипания» композиции в процессе приготовления клея. Можно рекомендовать следующий состав клея: смолы 70% по весу, отвердителя 10%, ацетона 20%. В полученную смесь добавляется наполнитель в количестве 10—80% от исходного объема. Время схватывания клея на основе смолы ЭД6 составляет 10—15 мин.

Цементный раствор является наиболее простым и удобным клеем при установке фотоупругих датчиков. Основной его недостаток — длительный период твердения. Можно использовать для приклеивания датчиков и песчано-цементный раствор.

При применении цементного раствора следует иметь в виду, что в некоторых случаях в нем возможны значительные деформации в результате набухания цемента. Это вызывает появление оптической картины в датчике в виде колец или эллипсов вблизи осевого отверстия. Такая оптическая картина не связана с изменением напряжений в породе, поэтому при расшифровке показаний датчика это обстоятельство необходимо учитывать. Описанное явление можно использовать для создания предварительных сжимающих напряжений в датчике — при измерениях растягивающих напряжений в породе. Для этих же целей можно использовать расширяющийся цемент.

Специальный двухкомпонентный синтетический клей холодного отверждения, предназначенный для приклеивания фотоупругих датчиков к стенкам скважин, выпускается

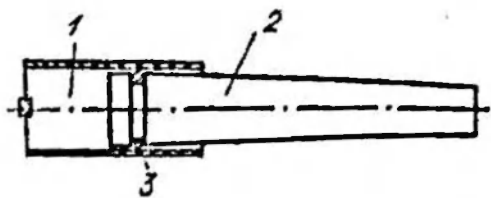


Рис. 30. Схема эжектора для приклеивания датчиков.

английской фирмой «Horstman». Время схватывания этого клея в шахтных условиях 20—30 мин.

Способы установки датчиков отражательного типа следующие.

Способ 1. Особенность его заключается в использовании эжектора. Конструкция эжектора предложена сотрудниками Шеффилдского университета. Эжектор (рис. 30) состоит из металлической трубки 1, диаметр которой на 0,05—0,1 мм больше диаметра датчика. Металлическая трубка с одного конца снабжена поперечной планкой-упором, выступающей над краем трубки на 2—3 мм, что обеспечивает зазор между концом трубки и дном датчика, через который клей выдавливается из трубки. В трубке устанавливается деревянный поршень 2 с уплотнительным кольцом 3. Поршень одновременно служит и пробкой в торце шпура. Перед установкой поршень выводится из трубки на расстояние, обеспечивающее помещение в трубке необходимого количества клея. Свободная часть трубки заполняется клеем. Эжектор с клеем устанавливается в скважину и следом — датчик. Вся система с помощью установочной штанги досылается до конца скважины. При нажатии на штангу поршень, достигнув дна скважины, будет вдвигаться в трубку и выдавит клей в зазор между датчиком и стенками скважины. Часть клея при этом попадает в зазор между трубкой эжектора и стенками скважины, но если диаметр трубки больше диаметра датчика, то этот зазор мал и в него поступает небольшое количество клея.

Способ 2. Здесь для подачи клея в скважину используется стаканчик из бумаги, тонкой ткани или полиэтиленовой пленки. Суть способа состоит в следующем (рис. 31). После бурения скважина очищается от буровой мелочи и подбирается установочная штанга, соответствующая диаметру скважины. В торец скважины устанавливается деревянная пробка 1 и бумажный пыж 2. Назначение последнего — предотвратить утечку клея в зазор между пробкой и стенками скважины. Затем готовится клей. Приготовленная композиция заливается в стаканчик 3. Диаметр стаканчика равняется диаметру датчика 7, а высота выбирается в зависимости от необходимого количества клея — обычно 2—3 см. Клей наливается так, чтобы 2—3 мм стаканчика остались свободными. Затем датчик надевается на установочную штангу, с другой стороны на датчик надевается стаканчик с клеем. Вся система досылается в скважину, и легким нажатием на штангу клей выдавливается

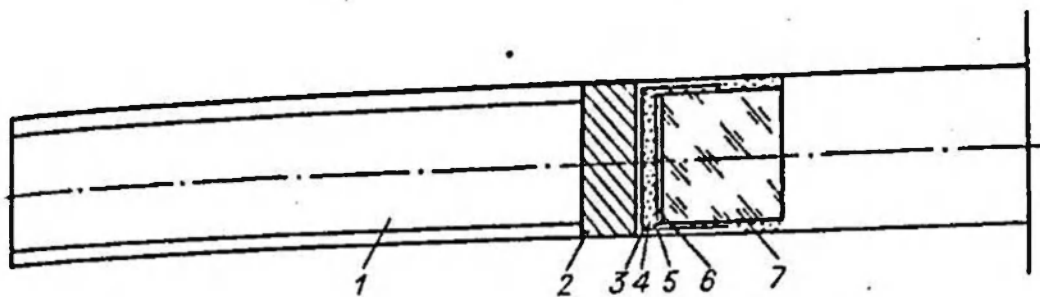


Рис. 31. Схема установки датчика в скважине по способу 2.

1 — деревянная пробка; 2 — бумажный пыж; 3 — бумажный стаканчик; 4 — клей;
5 — прокладка; 6 — слой воска; 7 — датчик.

в зазор между датчиком и стенками скважины. Чтобы обеспечить смятие стенок стаканчика для исключения их попадания в зазор между датчиком и скважиной, стенки стаканчика в верхней части можно прошивать ниткой в виде креста.

Способ 3. При использовании в качестве клея цементно-песчаного раствора эжектор обычно не обеспечивает выдавливания композиции из трубки. В этом случае можно использовать следующую методику. Как в способе 2 в торец скважины устанавливается деревянная пробка и бумажный пыж. После этого специальным лотком приготовленный песчано-цементный раствор укладывается в скважину вплотную к бумажному пыжу, затем с помощью установочной штанги досылается датчик. При надавливании на датчик раствор выдавливается в зазор между датчиком и стенками скважины.

При любом из описанных способов после установки датчика необходимо сразу же проверить, вышел ли клей по всему периметру датчика и обеспечена ли параллельность осей датчика и скважины. Если клей вышел не по всему периметру предохранительного кольца, необходимо установочную штангу ввести снова в скважину и надавить на датчик.

Для проверки параллельности осей датчика и скважины датчик освещают головным светильником. Если в зеркале датчика видна электрическая лампочка светильника, то датчик не перекошен в шнуре. Если лампочки не видно, то необходимо сразу же, пока не схватился клей, принять меры по устранению перекоса датчика. Для этого необходимо установочную штангу снова ввести в скважину вплотную до датчика и, слегка надавив на него, подождать, пока клей схватится.

Причины перекоса датчика в шнуре следующие:

— диаметр скважины значительно больше диаметра датчика (на 2—3 мм и более); в этом случае датчик может

перекосятся под действием собственного веса, пока клей еще не схватился;

— шип центрирующей штанги не перпендикулярен ее торцевой поверхности или торцевая поверхность не перпендикулярна оси штанги;

— торцевая поверхность центрирующей штанги не плоская, а имеет перекосы, или на нее попали затеки клея.

Чтобы исключить перекосы датчика в скважине, необходимо перед началом работы тщательно осмотреть центрирующую штангу, убрать с нее все затеки клея и грязь, попавшие на ее боковую или торцевую поверхности.

При установке датчиков в восстающих шпурах, для исключения сползания датчика в процессе схватывания клея, необходимо досылочную штангу оставлять в скважине, закрепляя ее от сползания. Чтобы предупредить вытекание клея из зазора между датчиком и стенками скважины, следует использовать защитное кольцо с буртиком или по внешнему краю кольца приклеивать уплотнительный манжет. В обоих случаях вдоль образующей кольца необходимо сделать несколько разрезов длиной 3—4 мм, чтобы кольцо могло пружинить.

При установке датчиков в скважинах, пробуренных вниз от горизонтали, необходимо устье скважины обсаживать трубкой с крышкой, чтобы исключить попадание в скважину загрязнений и воды.

Глубина установки датчиков отражательного типа определяется, с одной стороны, задачами исследования и может колебаться от нескольких сантиметров до многих метров, а с другой стороны — техническими возможностями полярископа.

При установке датчиков на глубину от 3—5 до 40—50 см затруднений обычно не возникает. Сложнее с установкой датчиков в скважинах длиной 2—5 м и более. В качестве досылочного устройства при установке датчиков в глубоких скважинах можно использовать набор составных штанг, например легких алюминиевых трубок с муфтовым или любым другим соединением. Головная штанга в этом случае должна быть специальной конструкции и иметь центрирующее утолщение, длину которого следует принимать не менее 0,5 м. Перед установкой датчика в глубокой скважине необходимо предварительно через нее пропустить трубку эжектора, укрепленную на конце досылочного устройства, чтобы убедиться, что трубка проходит до конца скважины и нигде не застревает. Если трубка эжектора застревает, то скважину необходимо дополнительно проработать, лучше кольцевой коронкой. Если датчик устанавливают без эжектора, то следует иметь специальную трубку для проверки диаметра скважины.

Глубокие скважины необходимо также проверять на их прямолинейность. Для такой проверки можно использовать датчик проходящего света со встроенной электролампой и проводом достаточной длины.

Способ установки датчиков, работающих в проходящем свете. Эти датчики устанавливаются только на значительную глубину — 5—10 м и более, на малой глубине удобнее работать с датчиками отражательного типа.

При установке датчиков проходящего света со встроенным источником света необходимо соблюдать те же правила, что и при установке датчиков отражательного типа. Некоторое отличие только в конструкции досылочного устройства. Так как от источника света, встроенного в датчик, необходимо вывести провода, в досылочном устройстве предусматривают либо осевое отверстие, либо продольный паз в боковой поверхности центрирующего утолщения. В последнем случае провода пропускаются сбоку досылочных штанг.

Установка датчиков проходящего света в сквозных скважинах имеет некоторые особенности. Приведем один из возможных способов установки (рис. 32). Используется два досылочных устройства: с центрирующей штангой специальной конструкции — 1 и обычное — 2, как для датчиков отражательного типа. На передней торцевой поверхности первой из них укреплен тонкий стержень 3, на который свободно надета втулка 5, удерживаемая на стержне 3 с помощью гайки 7. На стержень 3 надевается наполненный клеем баллон 4 из полиэтилена или бумаги, который

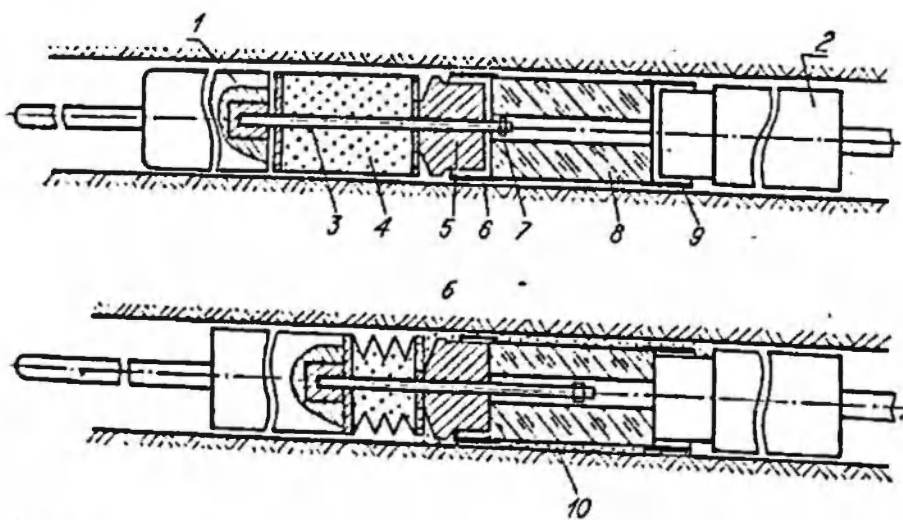


Рис. 32. Схема установки в скважине датчика проходящего света.

а — положение до выдавливания клея из баллона; б — после выдавливания клея в зазор между стенками скважины и датчиком.

располагается между торцом центрирующего досылочного устройства 1 и втулкой 5. утолщения

Датчик устанавливают в такой последовательности. Проверяют диаметр скважины. Затем готовят клей и заливают его в баллон 4 через отверстия, имеющиеся в его переднем торце. Эти отверстия расположены вдоль края торца и предназначены для обеспечения свободного выдавливания клея из баллона. На стержень 3 надевают баллон с клеем, затем втулку 5 и устанавливают гайку 7. Диаметр гайки должен быть меньше диаметра осевого отверстия в датчике, чтобы она могла свободно перемещаться по нему. Затем на втулку 5 надевают датчик 8. Высота втулки 5 должна быть равна свободной части защитного кольца 6, а диаметр втулки равен внутреннему диаметру этого кольца. Собранный таким образом систему досылают в скважину на заданную глубину, после чего досылочное устройство 1 надежно закрепляют в устье скважины. С другого конца скважины вводят досылочное устройство 2 вплотную до датчика, так, чтобы торец центрирующей штанги плотно вошел в защитное кольцо 9 датчика. Затем, нажимая на это досылочное устройство, выдавливают клей из баллона 4 в зазор 10 между датчиком и стенками скважины. По мере того, как клей из цилиндра выдавливается и его стенки сминаются в гармошку, стержень 3 свободно проходит в осевое отверстие датчика. После того, как клей выдавлен, обе установочные штанги извлекают из скважины. При этом в процессе выдвижения штанги 1 стержень 3 идет назад, гайка, 7, укрепленная на конце стержня, захватывает втулку 5, которая выходит из защитного кольца 6 датчика, увлекая сжатый баллон 4 с остатками клея.

Датчики проходящего света для сквозных скважин можно использовать при замерах напряжений в узких целниках, а также вблизи углов пересекающихся выработок. При наблюдении оптической картины в этих датчиках с одного конца скважины устанавливают источник света и поляризатор, а с другого ведут наблюдение через анализатор (см. рис. 1, а). Оптическая схема превращений света для данного случая приведена на рис. 3. Возможна также и круговая поляризация (см. рис. 1, б). Следует отметить, что датчики, работающие в проходящем свете, малочувствительны к перекосу. Перекос в этом случае только вносит некоторую погрешность в отсчете.

В заключение заметим, что начальный отсчет после установки датчика следует брать после полного схватывания клея, но не ранее чем через сутки при клеях на основе эпоксидных смол и через несколько дней при установке датчиков на цементном или песчано-цементном растворе.

§ 2. СПОСОБЫ ИЗМЕРЕНИЯ КОМПОНЕНТ ТЕНЗОРА НАПРЯЖЕНИЙ ПОЛЯ, НА КОТОРОЕ РЕАГИРУЕТ ФОТОУПРУГИЙ ДАТЧИК

Полные напряжения в какой-либо точке породного массива складываются из напряжений нетронутого массива; напряжений, обусловленных проведением подготовительной выработки, из которой установлен датчик; из прироста напряжений от проведения других подготовительных выработок вблизи места наблюдения; прироста напряжений, вызванного влиянием очистных работ, а также вследствие перераспределения напряжений в результате ползучести, пластических деформаций и процессов разрушения отдельных участков массива. Следовательно, компоненты полного тензора напряжений в любой точке массива в зоне влияния горных работ постоянно изменяются как по величине, так и по направлению.

Как уже было отмечено, фотоупругий датчик реагирует не на полные напряжения в массиве, а только на прирост (изменение) напряжений или деформаций, действующих в плоскости, перпендикулярной оси датчика, и происшедших за время после установки датчика и затвердевания клея.

Поясним это на примере фотоупругого датчика, работающего в режиме датчика напряжений. Предположим вначале, что для горной породы в месте измерения можно пренебречь влиянием деформаций ползучести, и будем считать, что датчик установлен в стенке одиночной выработки после ее проведения. Если никаких других горных работ на участке после установки датчика проводиться не будет, то показания датчика в течение неопределенно долгого времени останутся неизменными и равными нулю (либо величине предварительного распора). Иначе говоря, датчик никак не будет реагировать на сумму напряжений нетронутого массива и дополнительных, обусловленных проведением одиночной выработки, из которой ведется наблюдение. В то же время он будет реагировать на любые изменения напряжений в породе вблизи места его установки, в том числе на изменения, вызванные проведением соседних подготовительных выработок и работой очистных забоев, если эти изменения произошли после установки датчика.

Пусть к моменту подхода к месту измерений очистного забоя будет установлен второй такой же датчик. В начальный момент показания второго датчика будут равны нулю, а показания первого к этому времени будут равны сумме прироста напряжений после его установки. С момента вступления в работу второго датчика оба они будут одинаково реагировать на все последующие изменения напряжений (предполагается, что механические свойства пород вблизи обоих датчиков одинаковы). Но показания второго датчика уже не будут за-

висеть ни от суммы напряжений исходного поля и дополнительных напряжений вследствие проведения выработки, ни от суммы (на эту сумму не реагирует и первый датчик), ни от всех изменений напряжений, происшедших за время между установкой первого и второго датчиков.

Несколько иная картина будет наблюдаться, если влияние деформаций ползучести породы заметно. В этом случае показания обоих датчиков будут зависеть также и от напряжений, существовавших в породе до момента их установки. Это влияние ранее существовавших напряжений на показания датчика осуществляется через механизм процесса деформаций ползучести и релаксации напряжений и значительно зависит от времени, прошедшего с момента изменения напряжений до момента установки датчика. Кроме того, показания датчика будут осложняться в результате деформаций ползучести, вызванных изменениями напряжений, происходящих и после установки прибора.

Пренебрегая влиянием процессов ползучести, рассмотрим отдельно ту часть поля напряжений, на которую реагирует фотоупругий датчик. Приведем все компоненты тензора напряжений этого поля, действующие на элементарный объем породы вокруг датчика, в предположении, что размеры датчика настолько малы, что его можно считать точкой (рис. 33, а). Через σ_1 , σ_2 и σ_3 обозначим главные напряжения поля, на которое реагирует датчик, через σ_x , σ_y , σ_z — нормальные на-

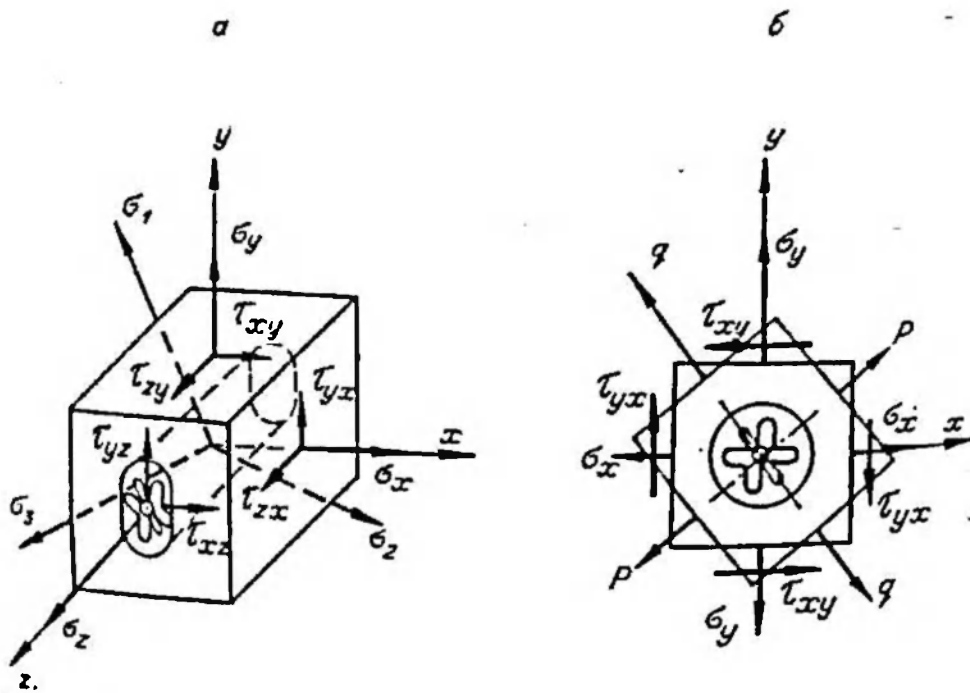


Рис. 33. Компоненты тензора напряжений в элементарном объеме породы вокруг датчика (а) и в сечении, нормальном к оси датчика (б).

пряжения, действующие на площадках, параллельных координатным плоскостям прямоугольной системы координат, ось z которой совпадает с осью датчика, ось x направлена горизонтально, ось y — вертикально. Через τ_{ij} ($i, j = x, y, z$) обозначим касательные напряжения на тех же площадях. Чтобы понять, на какие составляющие этого тензора реагирует датчик, рассмотрим сечение элементарного куба с датчиком координатной плоскостью xoy (рис. 33, б), в которой действуют нормальные напряжения σ_x и σ_y и касательные напряжения τ_{xy} и τ_{yx} . Только эти составляющие ответственны за появление оптической картины в датчике. Квазиглавные напряжения в плоскости xoy , совпадающие с осями симметрии оптической картины в датчике, как и ранее, обозначим — большее по абсолютной величине через q , меньшее — через p .

Компоненты напряжений изображенного на рис. 33, а поля можно записать в виде следующего тензора:

$$\begin{vmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{vmatrix}, \quad (6.1)$$

или в главных осях

$$\begin{vmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{vmatrix}, \quad (6.2)$$

фотоупругий же датчик дает информацию только о величине и направлении квазиглавных напряжений p и q , действующих в плоскости, нормальной к оси датчика. Квазиглавные напряжения p и q образуют плоский тензор напряжений вида

$$\begin{vmatrix} q & 0 \\ 0 & p \end{vmatrix}, \quad (6.3)$$

от которого можно перейти к плоскому тензору напряжений, связанному с любой плоской системой координат, лежащей в плоскости, нормальной к оси датчика. В частности, в системе координат xoy тензор (6.3) будет иметь вид

$$\begin{vmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} \\ \tau_{yx} & \sigma_y \end{vmatrix}, \quad (6.4)$$

в полярной системе координат с полярной осью, совпадающей с осью x , тот же тензор будет иметь вид

$$\begin{vmatrix} \sigma_r & \tau_{r\theta} \\ \tau_{\theta r} & \sigma_\theta \end{vmatrix}. \quad (6.5)$$

Отметим, что касательные напряжения всегда попарно равны, так что всегда имеет место соотношение $\tau_{ij} = \tau_{ji}$.

Рассмотрим ряд случаев построения тензора напряжений измеряемого поля прироста напряжений по замерам, выполненным с помощью фотоупругих датчиков.

Построение полного тензора напряжений при использовании одного датчика. Этот случай возможен, если известны величина и направление одного из трех главных напряжений исследуемого поля. Устанавливая датчик так, чтобы его ось совпала с направлением известного главного напряжения, можно измерить величину и направление двух других главных напряжений, которые будут действовать как раз в плоскости измерения датчика.

На практике величина и направление одного из главных напряжений иногда бывают известны из общих соображений или предварительно измерены. В частности, важнейший практический интерес представляет измерение напряжений на свободных поверхностях горных выработок или в непосредственной близости от них. Известно, что на любой свободной поверхности, т. е. на поверхности, не имеющей внешних нормальных и касательных нагрузок, одно из трех главных напряжений направлено нормально к свободной поверхности и равно нулю, а два других лежат в касательной плоскости. Не внося заметной ошибки, можно считать, что это условие сохраняется и в непосредственной близости от свободной поверхности, по крайней мере на глубину нескольких сантиметров. Следовательно, если скважина пробурена нормально к свободной поверхности выработки и датчик установлен на глубину 3—5 см, то он будет измерять величину и направление двух не равных нулю главных напряжений. В этом случае тензор напряжений измеряемого поля имеет вид

$$\begin{vmatrix} q & 0 & 0 \\ 0 & p & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

Использование замеров по двум датчикам. При построении тензора напряжений с использованием замеров по нескольким датчикам необходимо соблюдать следующие условия: 1) скважины, из которых установлены датчики, должны быть пробурены под некоторым углом друг к другу (для упрощения расчетов этот угол следует принимать равным 90°); 2) расстояние между датчиками должно быть по возможности минимальным, но при этом необходимо полностью исключать влияние каждой из скважин на показания датчиков в соседних скважинах. Поэтому расстояние от каждого из датчиков до любой из соседних скважин должно быть не ме-

нее 6—10 диаметров скважины; 3) все датчики должны быть установлены в одной и той же пачке породы.

Рассмотрим три частных случая использования отсчетов по двум датчикам.

Известно направление одного из главных напряжений исследуемого поля, например σ_3 . Совместим ось датчика 1 с известным направлением, а ось датчика 2 направим под любым углом к оси датчика 1 (вообще говоря, можно под любым углом, не равным 0 или 180°). В этом случае датчик 1 покажет направление и величину главных напряжений σ_1 и σ_2 , а датчик 2 — величину напряжений σ_3 . Вторая компонента, замеренная по этому датчику, будет равна геометрической сумме напряжений σ_1 и σ_2 . По показаниям этих датчиков можно построить тензор вида (6.2), от которого всегда можно перейти и к тензору вида (6.1)

Случай плоской деформации имеет важное практическое значение, поскольку породный массив вокруг протяженных горных выработок вдали от их торцов и мест пересечения с другими выработками находится в условиях плоской деформации. Известно, что в этом случае направление одного из трех главных напряжений совпадает с направлением, в котором выполняется это условие. Так, для протяженной горной выработки рассматриваемое направление совпадает с направлением ее оси.

Установим датчик 1 так, чтобы его ось была перпендикулярна к продольной оси выработки, а ось датчика 2 совместим с направлением, в котором выполняется условие плоской деформации, т. е. установим его параллельно оси выработки. Скважину для датчика 1 следует бурить нормально к боковой поверхности выработки, а скважину для датчика 2 можно пробурить из выработки, пересекающей первую, или из специально пройденной в этом направлении выработки. Датчик 2 будет замерять величину и направление двух главных напряжений σ_1 и σ_2 , действующих в плоскости, для которой выполняются условия плоской деформации, а датчик 1 замерит третье главное напряжение. По показаниям обоих датчиков можно построить тензор вида (6.2), от которого нетрудно перейти к тензору в координатных осях, одна из которых совпадает с продольной осью выработки:

$$\begin{vmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & 0 \\ \tau_{xy} & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z \end{vmatrix}.$$

В общем случае датчик 1 установим так, чтобы его ось была нормальна свободной вертикальной поверхности, а ось датчика 2 направим горизонтально и параллельно свободной

поверхности. Совместим ось z прямоугольной системы координат с осью датчика 1, ось y — с осью датчика 2, ось x направим вертикально вверх, тогда первый датчик будет реагировать на квазиглавные напряжения p' и q' , действующие в плоскости $хоу$, а второй — на квазиглавные напряжения p'' и q'' в плоскости $зоу$.

От квазиглавных напряжений p' и q' можно перейти к напряжениям $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}, \tau_{yx}$ по формулам:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= [(q' + p') + (q' - p') \cos 2\theta_1] / 2, \\ \sigma_y &= [(q' + p') - (q' - p') \cos 2\theta_1] / 2, \\ \tau_{xy} &= \tau_{yx} = [(q' - p') \sin 2\theta_1] / 2, \end{aligned} \quad (6.6)$$

где θ_1 — угол между осью x и направлением q' .

Аналогично от квазиглавных напряжений p'' и q'' можно перейти к напряжениям $\sigma_z, \sigma_x, \tau_{zx}, \tau_{xz}$ по формулам:

$$\begin{aligned} \sigma_z &= [(q'' + p'') + (q'' - p'') \cos 2\theta_2] / 2, \\ \sigma_x &= [(q'' + p'') - (q'' - p'') \cos 2\theta_2] / 2, \\ \tau_{zx} &= \tau_{xz} = [(q'' - p'') \sin 2\theta_2] / 2, \end{aligned} \quad (6.7)$$

где θ_2 — угол между осью z и направлением q'' .

Из соотношений (6.6) и (6.7) видно, что с помощью двух произвольно ориентированных датчиков можно измерить только пять компонент тензора из шести независимых. Одна из независимых касательных компонент, в нашем случае $\tau_{xz} = \tau_{zx}$, не может быть вычислена. В то же время показания обоих датчиков могут быть сверены между собой, так как компонента σ_z вычисляется независимо по показаниям как датчика 1, так и датчика 2.

Одновременные замеры по трем датчикам. Замеры по трем датчикам позволяют вычислить все компоненты тензора напряжений, если только датчики установлены так, что их оси не параллельны между собой и не лежат в одной плоскости. В простейшем случае, когда оси датчиков взаимно перпендикулярны и координатные оси совпадают с осями датчиков, компоненты тензора напряжений вычисляются по формулам, аналогичным (6.6) и (6.7).

В процессе расчетов показания всех датчиков взаимно контролируются, так как каждая из нормальных компонент $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ независимо вычисляется по показаниям двух датчи-

§ 3. ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ ВО ВРЕМЕНИ И ГРАФИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ТЕНЗОРОВ

Фотоупругий датчик — прибор длительного действия. Одновременно установленный, он реагирует на любые изменения напряжений, происходящие в плоскости, перпендикулярной его оси, в течение всего срока его службы, т. е. вплоть до момента разрушения. Эта особенность фотоупругих датчиков позволяет использовать их для исследования изменения полей напряжений во времени.

В любой момент времени датчик дает информацию о трех параметрах: о величине наибольшего и наименьшего квази-главных напряжений и о направлении любого из них относительно наперед выбранного направления. Эта информация позволяет построить плоский тензор напряжений в главных осях вида (6.3), который можно записать и в любой другой фиксированной системе координат (например (6.4) и (6.5)). Если исследуемое поле напряжений меняется с течением времени, то каждая из компонент тензоров (6.3) — (6.5) является функцией времени:

$$\left\| \begin{matrix} q(t) & 0 \\ 0 & p(t) \end{matrix} \right\|; \left\| \begin{matrix} \sigma_x(t) & \tau_{xy}(t) \\ \tau_{yx}(t) & \sigma_y(t) \end{matrix} \right\|; \left\| \begin{matrix} \sigma_r(t) & \tau_{r\theta}(t) \\ \tau_{\theta r}(t) & \sigma_\theta(t) \end{matrix} \right\|. \quad (6.8)$$

Каждый из тензоров (6.8) можно представить графически в виде совокупности кривых или ломаных (в случае дискретных замеров) линий, характеризующих каждая в отдельности изменение одной из компонент тензора, а в совокупности изменение во времени всего тензора. В качестве примера рассмотрим графические изображения первых двух тензоров из (6.8).

Пусть в результате замеров некоторый тензор представлен в следующем виде:

$$\left\| \begin{matrix} \sigma_1(t) & 0 \\ 0 & \sigma_2(t) \end{matrix} \right\| = \left\| \left\| \begin{matrix} 4 & 0 \\ 0 & 3 \end{matrix} \right\|; \left\| \begin{matrix} 5 & 0 \\ 0 & 3,5 \end{matrix} \right\|; \left\| \begin{matrix} 6 & 0 \\ 0 & 2,5 \end{matrix} \right\|; \right. \\ \left. \left\| \begin{matrix} 4,5 & 0 \\ 0 & 2 \end{matrix} \right\|; \left\| \begin{matrix} -2 & 0 \\ 0 & 1 \end{matrix} \right\| \right\}. \quad (6.9)$$

Графическое изображение этого тензора (рис. 34, а) состоит из двух ломаных линий, характеризующих изменение во времени компонент $\sigma_1(t)$ и $\sigma_2(t)$. По оси абсцисс отложено время t , по оси ординат — напряжение σ . Стрелками обозначены углы наклона напряжений относительно горизонтали. Представим тензор (6.9) в некоторой фиксированной прямоугольной системе координат $хоу$, где ось $ох$ совпадает с

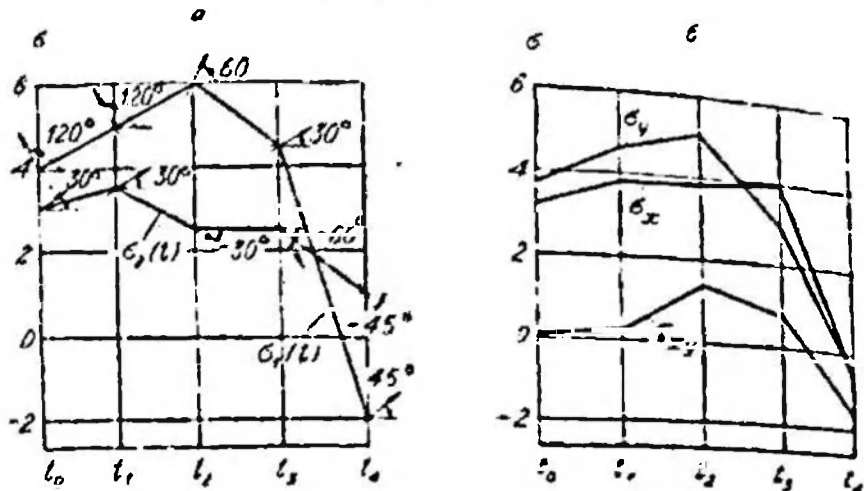


Рис. 31. Графическое представление тензора напряжений, запрессованного в главных осях (а) и в заданной системе координат (б).

ранее выбранным направлением, относительно которого отсчитывались направления компонент тензора (6.9):

$$\begin{pmatrix} \sigma_x(t) & \tau_{xy}(t) \\ \tau_{yx}(t) & \sigma_y(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3,25 & 0,19 \\ 0,19 & 3,75 \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} 3,875 & 0,2 \\ 0,2 & 4,625 \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} 3,875 & 1,51 \\ 1,51 & 5,125 \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} 4 & 0,85 \\ 0,85 & 3 \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} -0,5 & -1,5 \\ -1,5 & -0,5 \end{pmatrix}. \quad (6.10)$$

Графическое изображение тензора (6.10) (рис. 34, б) включает три ломаные, соответствующие компонентам $\sigma_x(t)$, $\sigma_y(t)$ и $\tau_{xy}(t) = \tau_{yx}(t)$. Поскольку направления этих напряжений однозначно связаны с фиксированной системой координат, указывать их направления не имеет смысла.

Для объемного тензора напряжений наиболее простое графическое изображение получается в случае, если тензор записан в фиксированной системе координат, например в прямоугольной:

$$\begin{pmatrix} \sigma_x(t) & \tau_{xy}(t) & \tau_{xz}(t) \\ \tau_{yx}(t) & \sigma_y(t) & \tau_{yz}(t) \\ \tau_{zx}(t) & \tau_{zy}(t) & \sigma_z(t) \end{pmatrix}. \quad (6.11)$$

Графическое изображение последнего тензора аналогично приведенному на рис. 34, б и содержит шесть линий, соответствующих шести независимым компонентам.

§ 4. ИЗМЕНЕНИЕ ПОЛНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

При измерении полных напряжений в осадочных горных породах с помощью фотоупругих датчиков возможны два метода: разгрузки и измерения деформаций ползучести.

Метод разгрузки. Сущность этого метода состоит в следующем. В месте измерения бурится скважина, в которую устанавливается датчик. После полного затвердевания клея вокруг датчика обустраивается разгрузочная щель. Если поперечные размеры керна достаточно велики (в 8—10 раз больше диаметра скважины), то после обустройства напряжения по контуру керна будут равны нулю. Однако, вследствие того, что датчик приклеен к стенкам скважины, в процессе разгрузки керна и деформирования стенок скважины в датчике возникнут напряжения, пропорциональные напряжениям, существовавшим в породе до бурения скважины и установки датчика. По оптической картине в датчике можно определить величину и направление этих напряжений.

В случае, если размеры керна достаточно велики по сравнению с диаметром скважины, форма разгрузочной щели не имеет значения и может быть кольцевой, эллиптической, квадратной, прямоугольной и любой другой. При установке датчика на небольшую глубину разгрузочная щель может быть выпилена ручной угольной или породной пилой. При глубине установки датчиков до 1—3 м керн можно обурить серией пробуренных по контуру щели скважин с использованием, например, направляющего устройства, предложенного Н. Ф. Шалагиновым [39]. При большей глубине установки датчиков обустройство керна серией скважин становится затруднительным. В этом случае полезно пройти по направлению к датчику выработку небольшого сечения (порядка 1 м²) с таким расчетом, чтобы расстояние от забоя этой выработки до датчика не превышало 1—2 м, и после этого провести разгрузку путем обустройства керна.

Чтобы методом разгрузки замерить все компоненты полного тензора напряжений, необходимо пробурить 3 скважины (или 2, если из общих соображений известно направление одного из главных напряжений) под углом друг к другу так, чтобы они сходились в одной области, установить три датчика и провести их разгрузку. При пересчете показаний датчиков можно воспользоваться методикой, изложенной в § 2 настоящей главы.

Метод разгрузки можно использовать и для измерения исходного поля напряжений нетронутого массива. В этом случае измерения следует проводить из одиночной подготовительной выработки, удаленной как от зон влияния очистных забоев, так и от других подготовительных выработок. Чтобы исключить влияние выработки на результаты замеров, датчики необходимо устанавливать на глубине, в 5—6 раз превышающей наибольший поперечный размер выработки.

Основная трудность при применении метода полной разгрузки — это надежное приклеивание датчиков к стенкам

скважины, так как в этом случае стенки скважины, клей и материал датчика работают на растяжение. В наших исследованиях наиболее надежное приклеивание обеспечивалось клеем фирмы «Horstman».

Заметим, что влияние скважины, в которую устанавливается датчик, и дополнительных напряжений вокруг нее, возникающих в процессе ее бурения, учитывается аппаратом расшифровки оптической картины в датчике и поэтому не отражается на конечных результатах измерений.

Метод измерения деформаций ползучести применим только при измерениях в породах, склонных к ползучести, и основан на свойстве фотоупругого датчика реагировать на деформации ползучести. В частности, его можно использовать для определения напряжений нетронутого массива. Датчик, установленный в скважине, пройденной в нетронутом массиве, реагирует на деформации ползучести, вызванные дополнительными напряжениями, возникшими в процессе бурения скважины. Теория этого метода рассмотрена в гл. IV. Метод достаточно прост и удобен, но при его использовании необходимо определять параметры ползучести породы в месте измерения, а также точно фиксировать время от момента бурения скважины до момента схватывания клея.

Если полные напряжения изменяются с течением времени и ставится задача исследовать процесс этого изменения, то измерения следует вести в такой последовательности. Вначале в месте измерения одним из описанных выше способов (или любым другим известным способом) определяются полные напряжения, существовавшие к началу наблюдений. Заметим, что эти напряжения могут быть и отличными от напряжений нетронутого массива, например вследствие влияния соседних выработок и т. п. Одновременно с этим устанавливаются фотоупругие датчики для измерения всех изменений поля напряжений, которые будут происходить в процессе дальнейших наблюдений. Полные напряжения в любой момент времени определяются путем суммирования первоначальных напряжений и последующих приращений напряжений. При этом следует иметь в виду, что суммировать можно только одноименные компоненты тензоров напряжений, причем сами тензоры должны быть записаны в одной и той же системе координат.

В процессе перераспределения напряжений в массиве дополнительные напряжения могут быть как сжимающими, так и растягивающими. Чтобы повысить надежность работы датчика при измерении растягивающих напряжений, его можно устанавливать с предварительным распором, что обеспечивается путем применения либо специальных установочных приспособлений, либо расширяющихся клеев, например цемента [5]. После полного затвердевания клея в датчике

возникают сжимающие напряжения, которым соответствует оптическая картина в виде колец. С уменьшением напряжений в массиве оптическая картина в датчике будет изменяться, при этом напряжения в клее и на контакте клея со стенками датчика и скважины до определенного предела, обусловленного величиной предварительного распора, будут оставаться сжимающими.

§ 5. ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ ВОКРУГ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

Важнейшая и наиболее изученная область применения фотоупругих датчиков — это исследование прироста напряжений вокруг горных выработок под влиянием различных горнотехнических факторов.

В результате выполнения различных технологических процессов по выемке полезного ископаемого и управлению горным давлением напряжения в породах в месте ведения горных работ постоянно меняются. На поле напряжений нетронутого массива, существовавшее до начала горных работ, накладываются дополнительные поля напряжений, возникающие как в процессе образования различных полостей в горном массиве (подготовительные и очистные выработки, камеры и т. д.), так и при обрушениях и сдвиганиях горных пород, при деформации крепи и целиков и т. п. Дополнительное поле напряжений, образующееся впереди очистных и подготовительных забоев (зоны опорного давления), перемещается в пространстве вместе с подвиганием этих забоев. Напряжения вокруг очистных и подготовительных выработок, закрепленных деревянной или податливой металлической крепью, хотя и незначительно, но постоянно изменяются вследствие податливости этой крепи. Меняется поле напряжений вокруг той или иной выработки в процессе проведения соседних выработок как по данному пласту или рудному телу, так и по боковым породам и сближенным пластам. В значительных по объему участках горного массива напряжения перераспределяются при посадках кровли в случае применения систем разработки с обрушением.

Хотя и в меньших масштабах, но перераспределение напряжений происходит в породах вокруг выработанного пространства и при работе с закладкой. Здесь изменение напряжений связано с процессом сдвигания горных пород вследствие усадки закладочного материала. Определенное влияние на напряженно-деформированное состояние пород вокруг горных выработок оказывают процессы ползучести, свойственные в той или иной мере всем горным породам, особенно осадочным.

Фотоупругие датчики позволяют изучать как весь процесс изменения напряжений в том или ином участке массива, так и отдельные его этапы. Применительно к угольным шахтам фотоупругие датчики могут использоваться в следующих случаях:

— для измерения прироста напряжений и исследования соответствующих полей напряжений в самых различных горно-геологических и горнотехнических ситуациях;

— для исследования дополнительного поля напряжений впереди забоя подготовительной выработки;

— для измерения прироста напряжений вокруг подготовительных выработок, вызванного проведением соседних горных выработок, в том числе для измерения напряжений в местах пересечения выработок;

— для исследования поля дополнительных напряжений в угольном пласте и боковых породах впереди очистного забоя (зона опорного давления), а также для измерения прироста напряжений в боковых породах и в целиках в выработанном пространстве;

— для измерения прироста напряжений в массиве вокруг подготовительных выработок, находящихся в зоне влияния очистных работ, в том числе на участках сопряжения подготовительных выработок с очистными забоями;

— при исследовании влияния очистных работ по сближенным пластам на напряженное состояние массива в условиях подработки и надработки;

— при исследовании физико-механических свойств горных пород в массиве и их изменении в условиях различного напряженного состояния и при различных режимах нагружения.

При решении всех этих задач (а также других, не названных здесь) методика измерений с использованием фотоупругих датчиков относительно проста и включает выбор участка наблюдения, бурение скважин, установку датчиков и снятие отсчетов по ним. Следует обращать внимание на периодичность взятия отсчетов, что должно согласовываться со всей горнотехнической обстановкой на участке. Так, например, при исследовании эксплуатационного опорного давления и при измерении напряжений и деформаций в зоне опорного давления впереди очистных забоев установку датчиков следует производить с таким расчетом, чтобы к моменту появления влияния очистного забоя в месте установки датчиков клей успел бы полностью затвердеть и набрать прочность. Это особенно важно при установке датчиков на цементном растворе. По мере приближения забоя частота замеров должна увеличиваться. Если вначале, когда очистной забой находится на расстоянии 100—200 м от места установки датчиков, отсчеты достаточно проводить один раз

в месяц, то при приближении забоя на 20—30 м отсчеты должны проводиться один раз в сутки. А с расстояния 15 м от забоя отсчеты следует проводить после каждого подвигания забоя, чтобы не пропустить момента прохождения через место установки датчиков максимума опорного давления и точно зафиксировать его положение относительно забоя.

Для получения более достоверных данных о положении максимума опорного давления и общего характера кривой опорного давления рекомендуется устанавливать несколько датчиков на расстоянии 1—2 м друг от друга. Если прирост напряжений приближается к предельному для используемых датчиков (для датчиков из стекла при одноосном поле это 40—50 кгс/см²), необходимо рядом с каждым датчиком установить следующий, причем время установки дополнительных датчиков выбирать так, чтобы они вступали в работу к моменту выхода из строя основных датчиков.

Глава VII

ПОГРЕШНОСТЬ МЕТОДА И ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ДАТЧИКОВ

§ 1. ПОГРЕШНОСТЬ МЕТОДА

Измерение напряжений с помощью фотоупругих датчиков сопровождается рядом погрешностей. Возникая по различным причинам, погрешности в сумме определяют область применения датчиков, а также требования к конструкции датчиков и полярископов.

Погрешность рассматриваемого метода зависит от следующих факторов:

- качества полярископов;
- ошибок в определении размеров датчиков, оптических и механических постоянных материала датчиков;
- качества материала датчика: его оптической и механической однородности;
- ошибок в определении упругих постоянных породного массива и материала клея;
- ошибок в определении диаметра скважины, а следовательно, и толщины клеевого слоя;
- точности установки датчиков: перекосы датчика в скважине, несоосность датчика в скважине, несплошность слоя клея;
- ошибок в определении параметров ползучести горного массива, в учете времени между бурением скважины и схватыванием клея и других ошибок, связанных с учетом реологических свойств массива;
- ошибок в определении координат точек отсчета на оптической картине в датчике;
- ошибок при определении порядка полосы в точках отсчета;
- ошибок, связанных с допущениями, принятыми при выводе расчетных формул для пересчета показаний датчика в напряжения в массиве, в том числе влияние торца скважины, ограниченной длины датчика и др.

Первые две группы приведенных ошибок являются «приборными» и вместе с последней группой могут быть отнесе-

ны к систематическим ошибкам. Их влияние при точных измерениях можно учесть. Остальные ошибки случайные.

Не все из этих факторов одинаково влияют на суммарную погрешность метода. Наибольшее влияние оказывают ошибки в оценке величины модуля упругости, в учете влияния слоя клея и реологических свойств массива.

Суммарная ошибка, возникающая вследствие неудовлетворительного качества полярископа (неоднородность поляриондов, непараллельность пучка света, направляемого в датчик, неточность установки оптических осей поляриондов и четвертьволновых пластинок между собой, а также неточность ориентировки поляризатора и анализатора), обычно невелика и в расчетах может быть принята равной 1%. Две последние ошибки могут быть достаточно значимы, и, чтобы их исключить, необходимо тщательно проверять в каждом полярископе ориентацию оптических осей всех оптически активных элементов прибора.

Ошибка в определении размеров датчиков, оптических и механических постоянных материала датчиков может быть сведена к нулю. Для этого необходимо для каждой партии датчиков в лабораторных условиях с необходимой точностью определять длину датчика, внешний и внутренний диаметр, модуль упругости, коэффициент Пуассона и оптическую чувствительность материала датчика по всему его объему. Все датчики должны проверяться на наличие остаточных напряжений, если эти напряжения зафиксированы, датчики непригодны для использования.

Ошибка, возникающая в результате неточного определения модуля упругости исследуемой горной породы в массиве, подробно рассмотрена в § 4 и 5 гл. II. В тех случаях, когда модуль упругости породы не определяется специальными методами, величина рассматриваемой ошибки колеблется от нескольких процентов для датчиков V класса жесткости до 30—50—100% и более для датчиков, работающих в I классе жесткости (см. табл. 4, 5). На практике при измерении напряжений в осадочных горных породах с помощью стеклянных фотоупругих датчиков всегда можно добиться, чтобы величина рассматриваемой ошибки не превышала 2—3%.

Влиянием коэффициента Пуассона массива при грубых измерениях можно пренебречь, так как соответствующая ошибка не превышает 1—3%. Однако при точных измерениях его влияние следует учитывать, что обеспечивается коэффициентом k_3 в расчетных формулах.

Влияние слоя клея можно не учитывать при его толщине менее 1 мм в случае грубых измерений и менее 0,1—0,2 мм при достаточно точных. Можно пренебречь влиянием слоя клея и тогда, когда модуль упругости и коэффициент Пуассона слоя клея близки к соответствующим величинам для ис-

следуемой породы, а также когда модуль упругости и коэффициент Пуассона клея близки к соответствующим величинам для материала датчика, а толщина слоя клея невелика — порядка 1—1,5 мм. При большей толщине слоя клея возникает необходимость корректировать значение параметра m для датчика.

В общем случае влияние погрешностей в определении упругих постоянных клевого слоя значительно, особенно при толщине слоя более 1—2 мм. Влияние механических свойств клея и его толщины подробно рассмотрено в § 9 гл. II. При практических измерениях, зная упругие свойства применяемого клея и измеряя каждый раз диаметр скважины в месте установки датчика, рассматриваемую ошибку можно свести к ошибке в точности определения коэффициента μ в расчетных формулах.

Ошибкой из-за перекоса датчика в скважине и несоосности датчика и скважины можно пренебречь, если при установке датчиков использовать установочные штанги. Сложнее вопрос с учетом несплошности слоя клея, которая обычно связана с наличием пузырчатости в клее. Кроме того, при установке датчиков клей иногда не полностью заполняет зазор между датчиком и стенками скважины. Оба эти фактора на практике учесть не удастся, поэтому необходимо тщательнее размещивать клевою композицию и соблюдать все правила при установке датчиков.

Влияние реологических свойств массива на показания датчиков рассмотрено в гл. IV. Соответствующие расчеты показывают, что наибольшее влияние ползучести на показания датчиков имеет место в первые 2—3 сут после бурения скважины, а также в первое время после изменения нагрузок на исследуемый участок массива. Чтобы исключить влияние ползучести массива, вызванное бурением скважины, необходимо либо датчики устанавливать за 1—2 мес до начала очистных работ на участке, либо скважины бурить за несколько дней до установки датчиков. Так, из расчетов следует: если датчик будет установлен немедленно после бурения скважины, то показания датчика вследствие деформаций ползучести за первые трое суток могут достигнуть 30—50% от величины первоначальных напряжений. При установке же датчика через трое суток после бурения скважины его показания в результате деформаций ползучести за 30 сут работы составят не более 10% от величины первоначальных напряжений в массиве.

Влияние ползучести породы из-за прироста напряжений, имеющего место после установки датчиков, учесть достаточно трудно. Необходимо в каждом конкретном случае проводить расчеты, используя математический аппарат, изложенный в гл. IV.

На практике если перпод наблюдений невелик, а прирост напряжений в массиве приходится на конец этого периода, влиянием ползучести на показания датчика можно пренебречь. Учитывая результаты опытов по исследованию работы датчиков в условиях постоянной деформации и постоянной нагрузки (см. § 5, гл. IV), можно предположить, что влияние ползучести массива на показания датчика в известной мере компенсируется одновременным воздействием как процессов ползучести, так и процессов релаксации. Таким образом, ошибку измерения из-за неучета влияния ползучести примем равной 3—5%.

Из допущений, принятых при выводе формул для пересчета показаний датчика напряжения в массиве (см. § 6, гл. II), не рассмотренными остались вопросы об однородности и изотропности массива в месте установки датчиков и о влиянии длины датчика.

Так как размеры фотоупругих датчиков сравнительно невелики, то прилегающий к прибору участок массива всегда можно считать однородным, за исключением случаев, когда датчик устанавливается вблизи контакта двух различных слоев породы или вблизи трещин и других нарушений однородности массива.

Вопрос о правомерности распространения результатов замеров по одному или нескольким датчикам на значительные объемы породного массива должен решаться особо в каждом конкретном случае и представляет предмет самостоятельного исследования. Заметим только, что в тех случаях, когда участок массива состоит из нескольких слоев с разными физико-механическими свойствами, например угольный пласт сложного строения, датчики необходимо устанавливать в каждом слое.

При измерениях в бетонной крепи горных выработок, в бетонных и железобетонных сооружениях и других аналогичных неоднородных материалах, размеры неоднородностей которых (галька, щебень и т. п.) сравнимы с размерами датчиков, пренебрегать неоднородностью нельзя. В связи с этим при измерениях, например, в бетонных конструкциях рекомендуется предварительно изготавливать кубики из песчано-цементной смеси с установленными в них датчиками.

Анизотропность горных пород настоящей методикой не учитывается. Предполагается, что ее влияние на показания датчика незначительно. Для трансверсально-изотропных горных пород значение анизотропии в отдельных случаях может быть существенным. Например, для углей анизотропность проявляется в различии упругих свойств в направлениях, параллельных напластованию и нормальных напластованию. В таких породах измерение напряжений с помощью фотоупругих датчиков можно проводить отдельно в пло-

скости, параллельной напластованию, и в плоскости, нормальной напластованию.

Во всех теоретических выкладках, приведенных выше, предполагалось, что длина датчика много больше его диаметра. На практике длина датчика соизмерима с его диаметром. В этом случае влияние концентрации напряжений у торцов датчика может быть заметным. Учет этого влияния осуществляется введением соответствующего коэффициента l , который следует определять при лабораторных испытаниях, сопоставляя фактические показания датчика с теоретическими. Ошибка в определении l будет незначительна, если тарирование выполнено достаточно тщательно. Величину коэффициента l можно принимать и по табл. 8.

Рассмотрим ошибки, возникающие при взятии отсчетов по датчику. Координаты неподвижных точек отсчета фиксированы, и ошибки в их определении обычно не возникает. При взятии отсчетов в подвижных точках возможны ошибки в определении их переменных координат, однако при достаточном навыке работы с датчиками величиной этих ошибок можно пренебречь. При отсчете порядка полосы в той или иной точке ошибка неизбежна и связана с трудностью точного отсчета дробных порядков. Если использовать полярископ без компенсатора, точность отсчетов можно повысить, взяв отсчеты по нескольким точкам и затем усреднив их (см. § 1 гл. III). Точность отсчетов при использовании полярископа без компенсатора для малоопытного наблюдателя не выше 0,5 полосы, для опытного наблюдателя 0,2—0,3 полосы при взятии отсчетов по одной точке и 0,1 полосы и выше при взятии отсчетов по нескольким точкам и их усреднении. Более высокая точность отсчетов, порядка 0,02 полосы, может быть получена только при использовании полярископов с компенсаторами.

При взятии отсчетов возможна ошибка и из-за неточности ориентации оптических осей полярископа относительно осей симметрии оптической картины в датчике. Эту ошибку можно не учитывать, если ошибка в ориентации осей не превышает 3—5° [40]. Такая точность вполне возможна при визуальной ориентации осей прибора и оптической картины.

Заметим, что ошибки, связанные со взятием отсчетов по оптической картине, в известной мере субъективны.

С учетом всего сказанного приведем суммарную относительную ошибку измерения δ , вычисленную на основе Гауссова закона распределения случайных ошибок для некоторого конкретного сочетания всех исходных параметров:

n , полос	1	2	3	4	5
δ , %	24,5	21	18	15	12,

где n — отсчеты по датчику.

Вычисляя эту ошибку, примем, что для наблюдения оптической картины и взятия отсчетов используется полярископ без компенсатора, а точность взятия отсчетов равна 0,2 полосы.

При малой величине показаний датчика (низкая чувствительность датчика или малый прирост напряжений в массиве при заданной чувствительности датчика) ошибка измерения значительна. Так, при $n < 1$ ошибка измерения может превышать 25%. При увеличении числа полос в датчике ошибка измерения уменьшается и при $n = 5$ составляет 12%.

Если требуется более высокая точность измерения, то необходимо увеличивать точность определения всех параметров системы датчик—клей—массив, а также повышать точность полярископа и точность взятия отсчетов. Заметим, что резко уменьшить суммарную ошибку измерения только путем использования полярископа с компенсатором нельзя.

Остановимся на точности отсчетов углов, определяющих направление измеряемых напряжений. Эти направления совпадают с направлениями осей симметрии оптической картины в датчике (см. гл. II). При визуальном отсчете этих углов без специальных приспособлений точность отсчетов не превышает 10—15°, а при использовании простейшей шкалы с угловыми делениями повышается до 3—5°. Специальные устройства, встроенные в полярископ, увеличивают точность отсчета углов до 1° и более.

§ 2. ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ДАТЧИКОВ

Под чувствительностью датчиков будем понимать количество полос, возникающих в датчике с приростом напряжений в массиве или породном образце на 1 кгс/см² и при $\lambda = 0$. В кольцевом датчике эта величина различна для разных точек отсчета. На основании формулы (2.26) имеем

$$n = 2CtAq/\Gamma_0,$$

откуда в соответствии с приведенным определением для чувствительности датчика получаем следующее выражение:

$$n_a^{(\sigma)} = n/q = 2CtA/\Gamma_0. \quad (7.1)$$

Здесь $n_a^{(\sigma)}$ — чувствительность датчика по напряжениям в a -й точке отсчета, полос, кгс/см²; n — порядок полосы в a -й точке отсчета; C — оптическая постоянная материала датчика по напряжениям, мкм·см/кгс; t — длина датчика, см; A — некоторый параметр, зависящий от механиче-

ских свойств материала датчика, клея и породы, от геометрических размеров датчика, координат точек отсчета, параметра λ , но независящий от наибольшего главного напряжения в породе; Γ_0 — разность хода лучей в датчике, соответствующая одной наблюдаемой полосе (или, что то же самое, длине волны применяемого света λ). Величина Γ_0 может быть взята равной 520—550 мкм; q — величина наибольшего главного напряжения в породе, кгс/см².

Из последней формулы следует, что чувствительность датчика прямо пропорциональна оптической постоянной по напряжениям материала датчика C и длине l . Подбирая материал датчика или его длину, всегда можно получить нужную чувствительность датчика. Так как коэффициент A зависит от координат точек отсчета, то для каждой группы одноименных точек будет своя чувствительность.

При использовании фотоупругих датчиков для измерения деформаций вместо чувствительности датчика по напряжениям удобнее пользоваться величиной чувствительности датчика по деформациям.

Из формулы (7.1) имеем

$$q = n/n_a^{(0)}, \quad (7.2)$$

откуда следует, что погрешность измерений обратно пропорциональна чувствительности датчика. Действительно, при малой чувствительности датчика в нем будет наблюдаться мало полос и ошибка измерения будет значительной. Наоборот, при высокой чувствительности датчика при той же величине напряжений в породе в нем будет наблюдаться больше полос и соответственно ошибка измерения будет меньше. Однако высокая чувствительность датчика полезна только при измерении небольших приростов напряжений. При высоких приростах напряжений и значительной чувствительности оптическая картина в датчике будет размытой и печеткой, особенно при наблюдении в белом свете.

Величина чувствительности датчика должна выбираться из следующих соображений. При наблюдении датчика из стекла в белом свете четко различаются полосы вплоть до 7—8-го порядка, иногда больше. Датчики из стекла нормально работают при одноосных напряжениях в массиве до 40—50 кгс/см², при больших приростах напряжений датчики раскалываются вдоль главной осп симметрии (из-за концентрации растягивающих напряжений на внутреннем контуре датчика в точках S). Это многократно наблюдалось при шахтных и лабораторных наблюдениях. При двухосной нагрузке уже при $\lambda=0,15-0,25$ датчики могут работать при приростах напряжений в массиве до

70—80 кгс/см² и более. При одноосной нагрузке в датчике отражательного типа длиной $l=30$ мм при допустимых напряжениях 40—50 кгс/см² может наблюдаться 4—6 полос, при двухосной нагрузке — до 7—8 полос. Если же взять датчик длиной $l=60$ мм, то в тех же условиях при одноосной нагрузке возникает 8—12 полос, только после этого датчик будет расколот. Очевидно, иметь датчики большей длины при приростах напряжений более 40—50 кгс/см² нет смысла, так как при большем числе полос произвести надежные отсчеты затруднительно. В то же время при измерении малых приростов напряжений (порядка 5÷20 кгс/см²) нецелесообразно применять датчики с низкой чувствительностью.

Таким образом, можно рекомендовать следующий ряд фотоупругих датчиков из стекла по их длине:

10 мм — для крепких скальных пород при высоких приростах напряжений;

30 мм — для крепких скальных пород при малых приростах напряжений и для осадочных пород средней крепости и крепких углей при высоких приростах напряжений;

60 мм — для осадочных горных пород ниже средней крепости и для крепких углей при небольших приростах напряжений — до 10,0 кгс/см²;

90 мм — для слабых пород и углей при малых приростах напряжений.

Эти размеры относятся к датчикам, работающим в отраженном свете. Поскольку при такой же длине чувствительность датчиков, работающих в проходящем свете, в 2 раза ниже, область их применения соответственно сдвигается в сторону более крепких пород и более высоких приростов напряжений.

Рассмотрим вопрос о целесообразном диаметре датчика. Вообще говоря, возможен любой диаметр датчика и любой диаметр осевого отверстия в датчике. Диаметр датчика при постоянной величине параметра $m=R/R_1$ никак не влияет на показания датчика, однако в датчике большего диаметра оптическую картину наблюдать удобнее. Как уже указывалось, значение параметра m , равного отношению внешнего радиуса датчика к его внутреннему радиусу, оптимально при $m=6$. На практике внешний диаметр датчика удобно принимать равным 40 мм. Это обусловлено тем, что буровое оборудование на угольных шахтах рассчитано на бурение шпуров диаметром 41—43 мм. Диаметр датчиков следует принимать, исходя из диаметра стандартного бурового оборудования, применяемого на предприятиях, где предполагается проводить измерения. При любом другом диаметре датчиков требуется изготавливать специальные штанги и коронки для бурения скважин, что существенно осложняет проведение экспериментов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рост глубины разработки месторождений полезных ископаемых и ведение горных работ в тяжелых горно-геологических условиях в последнее время значительно расширили круг стоящих перед механикой горных пород задач по всестороннему изучению напряженно-деформированного состояния, физико-механических свойств и поведения горных пород. Основным фактором, определяющим рост с глубиной проявлений горного давления, особенно его динамических форм, таких как внезапные массовые обрушения, внезапные выбросы породы, внезапные выбросы угля и газа, горные удары, является возрастание по мере увеличения глубины напряженного состояния пород. Наиболее достоверную информацию о напряженном состоянии горных пород в настоящее время получают главным образом путем экспериментальных исследований. Здесь основная роль принадлежит натурным методам измерения напряжений непосредственно в массиве горных пород. К сожалению, количество таких методов и соответственно измерительных приборов крайне ограничено, что безусловно тормозит решение многих практических задач по повышению эффективности работы горнодобывающих предприятий.

Рассмотренный в настоящей работе метод фотоупругих датчиков принадлежит к числу немногих прямых методов измерения напряжений, позволяющих непосредственно в массиве пород определять величину напряжений. Фотоупругие датчики — исключительно простые и в то же время высокоинформативные приборы. Широкий диапазон их применения. Описанные датчики в настоящее время практически единственные приборы, которые позволяют непосредственно замерять направления главных напряжений в массиве. Они применяются при измерениях тензоров напряжений, замерах деформаций, определении упругих характеристик пород в массиве. Перспективно их использование в комбинации с другими измерительными устройствами, осо-

бенно при исследовании физико-механических свойств горных пород.

Опыт использования фотоупругих датчиков при шахтных исследованиях показывает, что они исключительно удобны при длительных измерениях. В практике работы Лаборатории горного давления ИГД СО АН СССР известны случаи, когда датчики исправно работали и непрерывно давали показания в течение шести лет. Фотоупругие датчики отличаются высокой надежностью и стабильностью в работе. Они не боятся влаги, вибрации, тряски. В процессе работы не требуют специального ухода или надзора. Важным достоинством фотоупругих датчиков является простота их установки, а также несложное вспомогательное оборудование. При снятии отсчетов по датчикам в большинстве случаев достаточно малогабаритного карманного полярископа.

Описанная в работе методика расшифровки показаний фотоупругих датчиков проста и не требует сколько-нибудь высокой квалификации операторов. В то же время она позволяет обеспечить достаточно высокую точность измерений.

Приведенные в работе результаты показывают, что помимо шахтных исследований перспективно использование фотоупругих датчиков при лабораторных экспериментах, в частности при изучении ползучести горных пород, а также свойств бетонов.

Возможности фотоупругих датчиков не исчерпываются задачами механики горных пород. Они могут с успехом использоваться при измерениях напряжений в грунтах, например под фундаментами, в дамбах и т. п. Такие датчики будут полезны при измерениях напряжений в различных массивных каменных и бетонных сооружениях, в том числе в обделках тоннелей и метрополитенов, в различных гидротехнических сооружениях, особенно в плотинах. Полезно их использование при определении напряжений, действующих в различных строительных конструкциях, например в фундаментах, опорах мостов и др.

ЛИТЕРАТУРА

1. Опель Г. Применение поляризационно-оптического метода к исследованию свойств бетона.— «Проблемы прочности в машиностроении», М., Изд-во АИ СССР, 1962, вып. 8, с. 44—51.
2. Трумбачев В. Ф., Катков Г. А. Измерение напряжений и деформаций методом фотоупругих покрытий. М., «Наука», 1968. 115 с.
3. Roberts A. The Photoelastic Coating Technique Applied to Research in Rock Mechanics.— "Trans. Inst. Min. Met.", 1962, v. 62, N 125.
4. Влох И. П., Сашурин А. Д. Методы измерения напряжений в крепких горных породах.— В кн.: Измерение напряжений в массиве горных пород. Новосибирск, «Наука», 1968, с. 82—92.
5. Влох И. П., Сашурин А. Д. Измерение напряжений в массиве крепких горных пород. М., «Недра», 1970. 121 с.
6. Hiramatsu Y. Measurement of Variation In Stress with a Photoelastic Stressmeter. Kyoto Univ., Kyoto, March, 1964. 8 p.
7. Hiramatsu Y., Niwa Y., Oka Y. Measurement of Stress in the Field by Application of Photoelasticity.— "Tech. Rept. Engng. Res. Inst. Kyoto Univ.", 1957, VII, 3, N 37.
8. Roberts A., Hawkes I., Williams F. T., Dhir R. K. A Laboratory Study of the Photoelastic Stressmeter.— "Int. J. Rock. Mech. Min. Sci.", 1965, v. 1, p. 411—457.
9. Roberts A., Hawkes I. The Determination of in Situ Stress and Strain Using Photoelastic Techniques.— "Grundfragen auf dem Gebiete der Geomechanik. Principles in the Field of Geomechanics", Wien—N. Y., Springer-Verlag, 1964, p. 58—71.
10. Roberts A., Hawkes I., Williams F. T., Murrell S. A. F. The Determination of the Strength of Rock in Situ.— A Reprint from "Trans. of the Eighth Congr. of Large Dams". Edinburgh, Great Britain, May, 1964, 4—8, p. 167—186.
11. Roberts A., Hawkes I., Williams F. T. Some Field Applications of the Photoelastic Stressmeter.— "Int. J. Rock. Mech. Min. Sci.", 1965, v. 2.
12. Barron K. Class Insert Stressmeters.— "Trans. Amer. Inst. Min. Engrs", 1965, v. 235.
13. Hawkes I., Fellers G. E. Theory of the Determination of the Greatest Principal Stress in a Biaxial Stress Field Using Photoelastic Hollow Cylinder Inclusions.— "Int. J. Rock Mech. Min. Sci.", 1969, v. 6, p. 143—158.
14. Сашурин А. Д., Влох И. П., Зубков А. В., Царегородцев В. М. Фотоупругие датчики для измерения напряжений в массиве горных пород.— В кн.: Устойчивость бортов карьеров и горное давление. М., «Недра», 1966, с. 99—107.
15. Сашурин А. Д. Исследование по совершенствованию методов измерения в крепких горных породах. Автореф. канд. дис. Свердловск, ИГД МЧМ, 1969, 21 с.
16. Турчанинов Н. А. Применение метода фотоупругости для исследования напряженного состояния горных пород и горного давления в природных условиях.— В кн.: Вопросы горного давления. Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1962, вып. 13, с. 60—65.
17. Шрепп Б. В., Бояркин В. И., Свечников В. Ф. Изучение напряженного массива с использованием фотоупругих тензометров и оптических дат-

- чиков.— В кн.: Измерение напряжений в массиве горных пород. Новосибирск, ИГД СО АН СССР, 1972, с. 221—223.
18. Сенук Д. П. Анализ работы фотоупругих датчиков при измерении напряжений в горном массиве.— В кн.: Измерение напряжений в массиве горных пород. Новосибирск, «Наука», 1968, с. 93—104.
 19. Грицко Г. И., Сенук Д. П., Кулаков Г. И. Об измерении напряжений в упруго-наследственной среде с помощью фотоупругих датчиков.— «Физ.-техн. проблемы разработки полезных ископаемых», Новосибирск, «Наука», 1970, № 3, с. 100—103.
 20. Грицко Г. И., Сенук Д. П., Посохов Г. Е., Носков В. Ф., Кулаков Г. И. Исследование напряженного состояния надквершляжного целика фотоупругими датчиками.— В кн.: Измерение напряжений в массиве горных пород. Новосибирск, ИГД СО АН СССР, 1970, с. 153—159.
 21. Савин Г. И. Концентрация напряжений около отверстий. М., ГИТТЛ, 1951. 496 с.
 22. Фрохт М. М. Фотоупругость. Т. 1. М.—Л., Гостехиздат, 1948. 432 с.
 23. Ханимова-Малькова Р. И. Методика исследования напряжений поляризационно-оптическим методом. М., «Наука», 1970. 115 с.
 24. Дюрелли А., Райли У. Введение в фотомеханику (поляризационно-оптический метод). М., «Мир», 1970. 387 с.
 25. Сенук Д. П., Кулаков Г. И. Влияние механического состояния фотоупругого датчика на его показания.— «Физ.-техн. проблемы разработки полезных ископаемых», Новосибирск, «Наука», 1971, № 2, с. 102—105.
 26. Фрохт М. М. Фотоупругость. Т. 2. М.—Л., Гостехиздат, 1950. 488 с.
 27. Ержанов Ж. С. Теория ползучести горных пород и ее приложения. Алма-Ата, «Наука», 1964. 175 с.
 28. Гуменюк Г. Н. Экспериментальное изучение свойств ползучести Карагандинских горных пород. Автореф. канд. дис. Алма-Ата, 1968. 15 с.
 29. Бобров Г. Ф. Исследование ползучести осадочных пород Кузбасса. Автореф. канд. дис. Новосибирск, 1971. 25 с.
 30. Журавель А. А. Лабораторное и натурное исследование реологии вмещающих пород Кузнецкого бассейна. Автореф. канд. дис. Алма-Ата, 1971.
 31. Векслер Ю. А. Исследование больших деформаций ползучести и разрушение горных пород вокруг горных выработок. Автореф. докт. дис. Новосибирск, 1971. 29 с.
 32. Кулаков Г. И. Влияние ползучести горных пород на показания фотоупругого датчика.— В кн.: Измерение напряжений в массиве горных пород. Новосибирск, ИГД СО АН СССР, 1972, с. 211—217.
 33. Злотников М. С. Эпоксидная смола, отвержденная метилтетрагидрофталевым ангидридом,— модельный материал для метода фотоупругости.— «Труды ВНИМИ», 1971, сб. 82, с. 36—42.
 34. Williams F. T. An Example of Stress Measurement in the Concrete Lining of a Shaft Inset.— "Min. Mag.", Sheffield Univ., 1967—1968, p. 55—61.
 35. Влох Н. П. Управление горным давлением в крепких горных породах на основе исследования закономерностей формирования их напряженного состояния. Автореф. докт. дис. Л., 1973. 45 с.
 36. Иванова Н. В., Лейкин М. В. Малогабаритный переносный поляриметр ИГ-85.— «Опτικο-механическая промышленность», ГОИ им. С. В. Вавилова. 1971. № 7, с. 27—29.
 37. Сенук Д. П., Кулаков Г. И. Измерение нагрузок на крепь горных выработок с помощью фотоупругих датчиков.— В кн.: Горное давление в капитальных и подготовительных выработках Кузбасса. Новосибирск, «Наука», 1969, с. 127—130.
 38. Кулаков Г. И. Натурные замеры напряжений и смещений в межщитовом целике.— В кн.: Измерение напряжений в массиве горных пород. Новосибирск, «Наука», 1970, с. 162—169.
 39. Шалагинов Н. Ф. Измерение напряженности на контуре угольного целика.— «Технология и экономика угледобычи», М., «Недра», 1966, № 3.
 40. Иванова Н. В. О погрешности измерения механических напряжений оптическими датчиками.— «Физ.-техн. проблемы разработки полезных ископаемых», Новосибирск, «Наука», 1970, № 3, с. 103—106.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Глава I. Физические основы метода фотоупругих датчиков	6
§ 1. Физические основы измерения напряжений фотоупругими датчиками	—
§ 2. Краткие сведения из теории полярископов	8
§ 3. Методы определения разности хода лучей и порядка полосы	15
Глава II. Теория работы фотоупругого датчика в упругой среде	21
§ 1. Напряжения в фотоупругом датчике и в породе вблизи датчика	—
§ 2. Анализ оптической картины в датчике	23
§ 3. Сплошной фотоупругий датчик	30
§ 4. Влияние жесткости фотоупругого датчика на точность измерений	—
§ 5. Классификация фотоупругих датчиков по жесткости	40
§ 6. Влияние механической схемы взаимодействия датчика с породой на точность измерения	44
§ 7. Связь действительной картины распределения напряжений в датчике с теоретической. Квазиглавные напряжения	45
§ 8. Определение квазиглавных напряжений в породном массиве по показаниям фотоупругого датчика	48
§ 9. Учет влияния слоя клея	58
Глава III. Тарирование датчиков и расчетные формулы	62
§ 1. Методика снятия показаний датчика	—
§ 2. Цепи полос фотоупругого датчика и ее формы	67
§ 3. Породные образцы и оборудование для тарирования датчиков	69
§ 4. Тарирование датчиков	71
§ 5. Выбор расчетных формул	77
§ 6. Упрощенная методика	81
Глава IV. Теория работы фотоупругого датчика в упруго-наследственной среде	83
§ 1. Общие замечания	—
§ 2. Напряжения в фотоупругом датчике, обусловленные ползучестью горной породы	85
§ 3. Взаимодействие сплошного фотоупругого датчика с породой, обладающей свойством ползучести	88
§ 4. Взаимодействие кольцевого фотоупругого датчика с породой, обладающей свойством ползучести	90
§ 5. Методика и некоторые результаты лабораторных исследований реологических свойств горных пород и других	—

	материалов с помощью фотоупругих датчиков	93
	§ 6. Общие замечания по учету влияния деформаций ползучести	97
Глава V.	Конструкции датчиков и полярископов	98
	§ 1. Датчики	—
	§ 2. Полярископы	102
Глава VI.	Вопросы шахтных исследований	108
	§ 1. Методика установки датчиков	—
	§ 2. Способы измерения компонент тензора напряжений поля, на которое реагирует фотоупругий датчик	117
	§ 3. Исследование напряжений во времени и графическое представление тензоров	123
	§ 4. Измерение полных напряжений	124
	§ 5. Исследование изменения напряжений вокруг горных выработок	127
Глава VII.	Погрешность метода и чувствительность датчиков	130
	§ 1. Погрешность метода	—
	§ 2. Чувствительность датчиков	135
Заключение	. . . . .	138
Литература	. . . . .	140

Геннадий Игнатьевич Грицко
Геннадий Иванович Кулаков

**ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ
ФОТОУПРУГИМИ ДАТЧИКАМИ**

Ответственный редактор Евгений Иванович Шемякин

Редактор С. А. Садко
Художественный редактор Т. Ф. Качиппа
Художник Н. А. Савельева
Технический редактор А. В. Семкова
Корректоры М. В. Ржевцева, С. Ф. Липпская

ИБ № 9709

Сдано в набор 31 марта 1977 г. Подписано в печать 10 января 1978 г. МН 01501.
Формат 60x90^{1/16}. Бумага типографская № 1, 9 печ. л., 8,8 уч.-изд. л. Заказ № 496.
Тираж 1000 экз. Цена 1 р. 10 к.

Издательство «Наука», Сибирское отделение, 630099, Новосибирск, 99, Советская, 18.
4-я типография издательства «Наука», 630077, Новосибирск, 77, Ставриславского, 25.