

ГЛАВА 14

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

14.1. Общие сведения

14.2. Основные положения теории подобия

14.3. Метод эквивалентных материалов

14.4. Метод центробежного моделирования

14.5. Поляризационно-оптический метод моделирования

14.6. Другие методы моделирования

Выше были рассмотрены, в основном, аналитические методы решения геомеханических задач. Для одиночных выработок, расположенных в однородном изотропном породном массиве и имеющих круглую форму поперечного сечения, такие решения можно получить в замкнутом виде. В случае более сложной формы поперечного сечения исследуемых выработок при наличии примыкающего выработанного пространства и структурных неоднородностей породного массива, прибегают к численным методам исследований. Но и в этом случае не удастся воспроизвести в достаточно полной мере процесс деформирования породного массива по мере создания в нем искусственных полостей.

Одним из методов исследования сложноструктурных объектов в геомеханике является моделирование в лабораторных условиях различных физических процессов горного производства. Цель моделирования заключается в воспроизведении и изучении на модели физического процесса, подобного происходящему в натуральных условиях. Метод моделирования позволяет на уменьшенных или увеличенных по отношению к действительности моделях проводить качественные и количественные детальные исследования изучаемого процесса.

Являясь одним из основных составляющих комплексных исследований, методы моделирования достаточно широко используются в различных областях современного естествознания и техники. Применительно к механике подземных сооружений эти методы позволяют выяснить основные качественные элементы механизма процессов сдвига, деформации и разрушения горных пород при ведении очистных и подготовительных работ, являясь необходимым этапом при разработке новых гипотез и теорий, а также проверки решений, полученных аналитическими методами.

14.1. Общие сведения

В механике горных пород, изучающей, как правило, объекты весьма больших размеров, применяют моделирование, связанное с уменьшением абсолютных размеров объектов. По принципам, на которых оно основано, различают моделирование двух видов: **физическое и аналоговое**. Первое предусматривает воссоздание в модели тех же самых физических полей, которые действуют и в объекте природы, но измененных по своим абсолютным значениям в соответ-

ствии с принятым масштабом моделирования. Аналоговое моделирование предусматривает замену в модели одних физических полей другими, например, замену поля механических напряжений электрическим полем в модели. При этом на моделях изучают закономерности явлений и процессов, протекающих в реальных объектах, используя математическую аналогию различных по физической природе процессов, т.е. математическую тождественность основных законов и совпадение дифференциальных уравнений, описывающих эти процессы.

Массив горных пород является весьма сложной средой, в которой при ведении горных работ одновременно происходят процессы деформирования различного характера: упругие, упругопластические смещения и разрушение пород с разрывом сплошности. Поэтому теоретические расчеты деформирования горных пород, прочности и устойчивости горных выработок и различных сооружений в породных массивах часто представляют собой трудно решаемую задачу. Натурные исследования отличаются значительной трудоемкостью, высокой стоимостью, требуют довольно длительного периода времени. Кроме того, в натурных условиях обычно весьма ограничены возможности варьирования параметрами системы, технологией и последовательностью ведения горных работ, тогда как при моделировании можно проследить влияние основных параметров в самых широких пределах.

Таким образом, моделирование открывает такие возможности изучения процессов механики горных пород, которые не дают ни аналитические методы, ни наблюдения и измерения в натурных условиях.

В то же время на моделях невозможно воспроизвести все детали моделируемых объектов. Поэтому моделирование позволяет вести изучение процессов с определенной степенью упрощения и схематизации натуральных объектов. Это существенно облегчает интерпретацию результатов шахтных наблюдений и измерений, позволяя с большей степенью обобщения проследить и уточнить механизм процессов и максимально полно изучить влияние на эти процессы действующих факторов.

Обычно при решении задач механики горных пород методами моделирования испытанию подвергают серию моделей различных масштабов, используя при этом наиболее эффективный для решения конкретной задачи метод. Например, сперва на моделях мелкого

масштаба изучают общие закономерности процессов в пределах всего участка массива, подверженного влиянию выработки, а затем на моделях более крупного масштаба детально изучают закономерности процессов в некоторой области массива, в частности, процессов взаимодействия пород с крепью выработки. При этом в модели крупного масштаба воспроизводится лишь некоторая часть массива, а действие всей остальной части компенсируют с помощью пригрузки, осуществляемой нагрузочными приспособлениями рычажного, пружинного или гидравлического типа.

Первые попытки моделирования проявлений горного давления были осуществлены в 1885 г. М. Файодем, который рассматривал слоистые горные породы как ряд несвязанных между собой породных слоев и изучал проявление деформации изгиба горных пород на простейших моделях, состоящих из пачки полос, опирающейся на две опоры. Опыты, сделанные с различными материалами (железо, куски плоских рудничных канатов, глина, стекло, гипс и др.), показали затухание величин прогиба слоев снизу вверх, что послужило поводом для создания гипотезы свода давления.

К методам наблюдений на простых моделях относятся также опыты А. Леона, Ф. Левинсона-Лессинга, М.М. Протождяконова, Г. Шпаккелера, Ф.А. Белаенко и др.

На сегодняшний день, учитывая сложность механических процессов, происходящих в толще пород при проведении выработки, методы моделирования продолжают оставаться необходимым звеном исследований.

Наиболее удобным для исследования проявлений горного давления является метод моделирования на эквивалентных материалах, предложенный Г.Н. Кузнецовым в 1936 г. [217].

Весьма ценным методом, позволяющим получать важные относительные количественные характеристики неоднородных напряженных состояний элементов сложных механических систем, является также оптический метод исследования напряженного состояния вокруг подземных выработок, начало которому было положено Ф. Левинсоном-Лессингом [218].

При одновременном действии сил тяжести и упругости механическому подобию удовлетворяет метод центробежного моделирования, разработанный и практически развитый Г.И. Покровским [219] и др.

Среди других методов моделирования заслуживают внимания электроаналоговые методы моделирования, т.е. электрическое моделирование физических полей, а также различные комбинированные методы, например, сочетающие принцип метода эквивалентных материалов и принцип центробежного моделирования и др.

14.2. Основные положения теории подобия

С учетом специфики горного дела величины, полученные на моделях, нельзя механически переносить на натурные условия простым умножением на соответствующий масштаб. В основе моделирования физических явлений лежит учение о подобии, основы которого заложены еще И. Ньютоном, сформулировавшим общее понятие динамического подобия механических систем.

Основные свойства подобных явлений и признаки подобия рассматриваемых явлений между собой характеризуются тремя теоремами подобия. Первая, установленная Ж. Бертраном в 1848 г., основана на общем понятии динамического подобия Ньютона и втором законе механики Ньютона. Академик М.В. Кирпичев дает следующую формулировку первой теоремы подобия: **«Подобными называют явления, происходящие в геометрически подобных системах, если у них во всех сходственных точках отношения одноименных величин есть постоянные числа».**

Вторая теорема подобия сформулирована в начале XX в. независимо друг от друга Дж. Букингемом и А. Федерманом. Она устанавливает возможность преобразования физического уравнения связи, описывающего данное явление, при этом получается уравнение, составленное из критериев (или инвариантов) подобия. Согласно второй теореме результаты опытов по изучению какого-либо физического явления, представленные в виде критериальных уравнений связи, возможно перенести на другие явления, подобные исследованному.

Третья теорема подобия сформулирована и доказана в 1930 г. М.В. Кирпичевым и носит название теоремы о существовании подобия. Согласно этой теореме, для существования подобия между явлениями необходимо и достаточно, чтобы эти явления имели подобные условия однозначности и одинаковые определяющие критерии подобия.

Закон Ньютона относится к рассмотрению движения и равновесия одной материальной частицы. Механическое же состояние де-

формируемого тела в каждой точке с координатами x, y, z характеризуется компонентами напряжений $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}$, компонентами перемещения u, v, w и компонентами деформаций $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{xz}$.

Между этими величинами, характерными для каждого напряженного состояния природы и модели, должно быть взаимно однозначное соответствие, так как только при этом условии можно путем моделирования определить натурные величины смещения пород и давления их на крепь.

Для выяснения условий, обеспечивающих существование однозначного соответствия механических состояний природы и модели, должна быть рассмотрена в общем виде система уравнений, отражающая деформированное состояние среды. Поскольку процессы сдвигения и деформирования горных пород в окрестности выработки являются весьма медленными, то инерционными силами можно пренебречь и тогда уравнения равновесия могут быть записаны в следующей форме:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} &= \gamma; \\ \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} &= 0; \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} &= 0. \end{aligned}$$

Механическое подобие процессов в модели и природе будет обеспечено, если записанные для модели и природы в безразмерном виде уравнения равновесия будут тождественно совпадать. Введем безразмерные координаты и напряжения:

$$\begin{aligned} x &= l\xi; y = l\eta; z = l\zeta; \\ \sigma_x &= \gamma l R_\xi; \sigma_y = \gamma l R_\eta; \tau_{xy} = \gamma l R_{\xi\eta}, \end{aligned}$$

тогда уравнения равновесия примут следующий вид:

$$\frac{\partial R_\xi}{\partial \xi} + \frac{\partial R_{\xi\eta}}{\partial \eta} + \frac{\partial R_{\xi\zeta}}{\partial \zeta} = 1 \quad \text{и т.д.}$$

Для того чтобы обеспечить требуемое тождество уравнений равновесия для природы и модели, необходимо, чтобы любой компонент безразмерного напряжения в природе $(R_{ik})_н = \frac{(\sigma_{ik})_н}{(\gamma l)_н}$ был равен соот-

ветствующему компоненту в модели $(R_{ik})_m = \frac{(\sigma_{ik})_m}{(\gamma l)_m}$, поэтому

$\frac{(\sigma_{ik})_n}{(\sigma_{ik})_m} = \frac{\gamma_n}{\gamma_m} \cdot \frac{l_n}{l_m} = \frac{\gamma_n}{\gamma_m} \lambda$, где λ — линейный масштаб моделирования. Сле-

довательно, масштаб напряжений

$$\mu = \frac{\gamma_n}{\gamma_m} \lambda.$$

Здесь и далее индексом «*n*» обозначены параметры природы, индексом «*m*» - модели, l — линейный размер, γ — объемный вес (плотность).

Масштаб сил (β) может быть найден умножением масштаба напряжений на масштаб площадей, т. е.

$$\beta = \frac{\gamma_n}{\gamma_m} \lambda \lambda^2 = \frac{\gamma_n}{\gamma_m} \lambda^3.$$

При характеристике того или иного процесса механическое подобие может быть определено заданием переходных множителей или масштабов для длин (геометрическое подобие), для времени (кинематическое подобие) и для масс (динамическое подобие).

Условие геометрического подобия для двух подобных систем состоит в том, что все размеры пространства, занятого системой в модели, и размеры отдельных элементов модели изменены в определенное число раз по сравнению с соответствующими размерами натурной системы.

Условие кинематического подобия этих систем состоит в том, что любые сходственные точки (частицы) систем, двигаясь по геометрически подобным траекториям, проходят геометрически подобные пути в промежутки времени, отличающиеся постоянным множителем.

Условие динамического подобия систем состоит в том, что массы любых сходственных частиц этих систем отличаются друг от друга постоянным множителем.

При изучении процессов деформирования и разрушения горных пород и подземных выработок широко используется теория прочности Мора, согласно которой определяющими параметрами являются элементы паспорта прочности, т.е. сцепление и внутреннее трение. Таким образом, паспорт прочности для материала модели должен быть геометрически подобен паспорту реальной толщи горных по-

род. Г.Н. Кузнецов рекомендует при подборе эквивалентного материала для слабых и пластических пород пользоваться следующими соотношениями:

$$R_M = \frac{\ell}{L} \times \frac{\gamma_M}{\gamma_H} R_H;$$

$$R'_M = \frac{\ell}{L} \times \frac{\gamma_M}{\gamma_H} R'_H.$$

или

$$c_M = \frac{\ell}{L} \times \frac{\gamma_M}{\gamma_H} c_H;$$

$$\operatorname{tg} \rho_M = \operatorname{tg} \rho_H,$$

где R_M , R_H - соответственно предел прочности на сжатие материала модели и природы; R'_M , R'_H - пределы прочности на растяжение материала модели и природы; c_M , c_H - коэффициент сцепления для материала модели и природы; ρ_M , ρ_H - углы внутреннего трения материала модели и природы.

Для соблюдения подобия при моделировании упругих систем необходимо, чтобы были выполнены следующие условия:

$$E_M = \frac{\ell}{L} \times \frac{\gamma_M}{\gamma_H} E_H; \quad \mu_M = \mu_H,$$

где E_M , E_H - модули упругости, материалов модели и природы соответственно; μ_M , μ_H - коэффициенты Пуассона.

Для моделирования процессов в условиях пластического деформирования (без учета времени) необходимо, чтобы уравнения, связывающие деформации и напряжения, были тождественны как для природы, так и для модели при условии написания их безразмерной формы.

Важным элементом в соблюдении условий подобия является отражение в модели структурных особенностей массива – слоистости, кливажа, отдельностей и пр.

Однако, количественная оценка геолого-петрографических особенностей строения и сложения пород весьма затруднительна, и может быть учтена только как эффект масштаба.

14.3. Метод эквивалентных материалов

Наиболее освоенным и широко распространенным в настоящее время является отмечавшийся выше метод моделирования на эквивалентных материалах.

Основные принципы этого метода сводятся к замене в модели естественных горных пород искусственными материалами с физико-механическими свойствами, которые, в соответствии с принятым масштабом моделирования, находятся в определенных соотношениях с физико-механическими свойствами натуральных горных пород.

Одним из преимуществ метода моделирования на эквивалентных материалах является возможность измерения показателей, отражающих НДС массива в интересующих областях, которые в натуральных условиях осуществить практически невозможно ввиду труднодоступности участков массива.

При условии удовлетворения всех критериев подобия для эквивалентных материалов и обеспечении геометрического подобия натуре и модели, совпадение механических процессов может быть обеспечено при подобии граничных условий.

В принципе, модель достаточно полно отражает НДС массива в натуре. Соблюдение же граничных условий по торцам модели не представляется возможным, однако, в силу известного принципа Сен-Венана, можно утверждать, что роль торцов становится заведомо малой на расстояниях от них, равных толщине модели. Поэтому при отработке моделей замеры величин смещений кровли и давления на крепь являются достоверными только в ее средней части.

Лабораторный подбор и испытания эквивалентного материала для изготовления моделей направлены в сторону изыскания удобообрабатываемых смесей, которые не обладали бы длительными сроками схватывания и твердения, а по своим физико-механическим свойствам обеспечивали бы подобие с горными породами. При этом безразмерные константы - коэффициенты Пуассона и углы внутреннего трения должны численно совпадать в эквивалентном материале и натуральных горных породах.

По природе связующих веществ применяемые в настоящее время эквивалентные материалы разделяются на четыре группы:

1. На основе углеводородов нефтяного происхождения (вазелин, парафин, масла и др.) – обладают пластичными и упругопластическими свойствами.

2. На основе неорганических гидравлических связующих (цемент, гипс, жидкое стекло, тиосульфат натрия) – обладают хрупким характером разрушения, а при добавлении в состав глины приобретают пластичные свойства.

3. На основе синтетических полимеров (эпоксидная, карбомидная, кремнийорганическая и др. смолы) – обладают упруго-пластичными и хрупкими свойствами.

4. На основе смол естественного происхождения (пек, канифоль и др.) – обладают свойствами хрупких материалов.

В последние годы все более популярным становится также моделирование на кусочках пиленого сахара, который дает хорошие качественные результаты.

При подборе эквивалентных материалов с конкретными свойствами используют различные модификаторы, присадки и инертные заполнители. В качестве последних применяются мелкие кварцевые пески и мелкодисперсные материалы (цемент, мел, инертная пыль, порошки солей металлов и др.). Подобрать и уточнив рецептуры эквивалентных материалов для всей моделируемой толщи, приступают к следующему этапу - изготовлению самой модели.

Модели изготавливают непосредственно в испытательных стендах, представляющих собой жесткие рамные металлические конструкции. Для изготовления и испытания плоских моделей, выполненных в разрезе по простиранию перпендикулярно к плоскостям напластования, слоистости или полосчатости моделируемой толщи, применяют стенды, подобные представленному на рис.14.1.

Если необходимы плоские модели, выполненные для наклонного залегания пород в разрезе вкrest простирания, применяют поворотные (круговые) стенды. Для объемных моделей служат трехмерные поворотные стенды.



Рис. 14.1. Общий вид плоского стенда для моделирования на эквивалентных материалах (ГВУЗ «НГУ»)

В зависимости от решаемых задач моделирование ведут в различных геометрических масштабах: мелких, от 1:400 до 1:100, или крупных, от 1:60 до 1:10. Толщи слабых пород моделируют только в крупных масштабах.

Разделение толщи пород в модели на отдельные слои обеспечивают путем присыпки поверхности каждого слоя крупной молотой слюдой, трещиноватость или кливаж воспроизводят насечкой свежеприготовленных слоев до отвердения или схватывания материалов.

При изготовлении плоских моделей вместо опалубки используют прозрачные ограждающие стенки, стационарно закрепляемые на весь период испытания модели. Для этих целей применяются листовые закаленные стекла, укрепляемые на стыках швеллерами, которые обеспечивают необходимую жесткость прозрачного бокового ограждения.

После изготовления модели и набора эквивалентным материалом прочности (или его остывания) на поверхность моделируемого массива наносится мерная сетка, в намеченных слоях устанавливаются марки и датчики для регистрации картины поля напряжений, деформаций и смещений в период испытания, а также выполняются полости, имитирующие горные выработки, в которые встраиваются приборы, воспроизводящие работу крепи.

Напряженное состояние и деформации элементов модели определяют также с помощью спаренных микроскопов, жестко соединенных между собой и позволяющих определять с высокой точностью смещения двух точек относительно друг друга. База измерений в моделях указанными выше приборами составляет 40-50 мм, а относительная погрешность $(1 \div 2) \cdot 10^{-4}$, т. е. на порядок ниже, чем при измерениях в натуре.

Для определения сдвижений точек плоской модели в процессе ее испытания служит метод фотофиксации - периодическое фотографирование боковой поверхности модели с установленными в ней марками и последующие измерения смещений марок на фотоснимках, осуществляемые на компараторе. Метод фотофиксации позволяет быстро и одновременно регистрировать смещения всех точек на боковой поверхности модели, но точность определения смещений точек модели, учитывая масштаб моделирования, оказывается обычно ниже точности определения смещений соответствующих точек при измерениях непосредственно в натуральных условиях. Установка на боковой поверхности модели блочных тензометров позволяет повысить точность

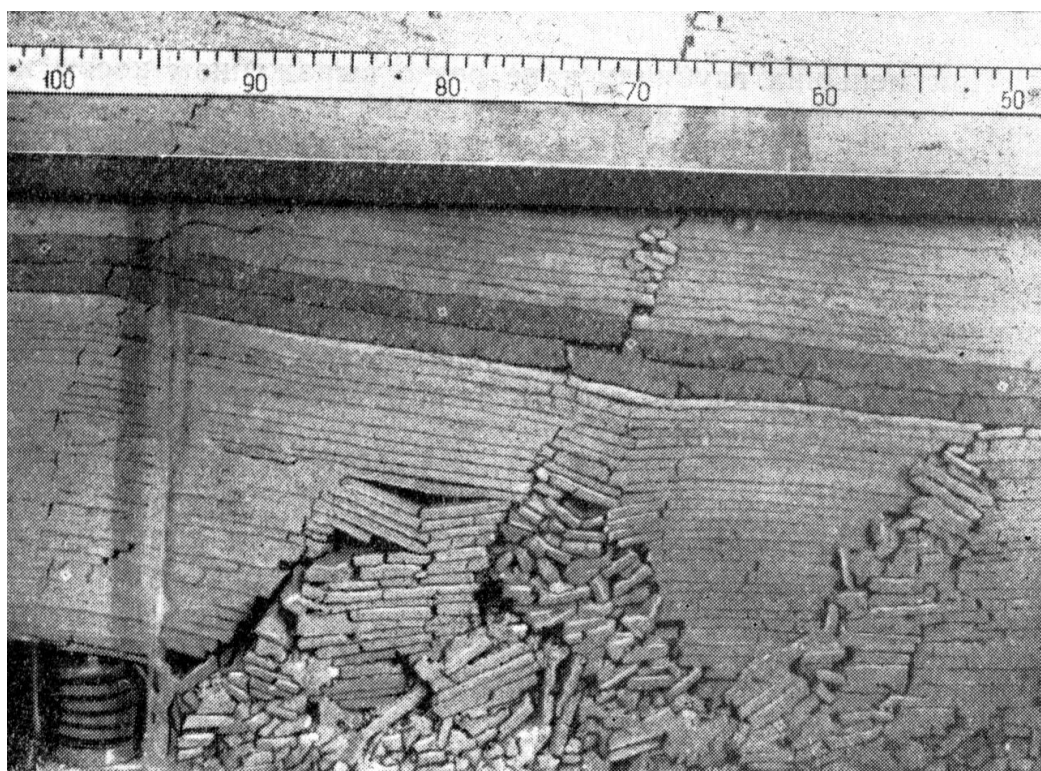
определения смещений точек методом фотофиксации в 20 раз. При масштабе фотоснимка 1:10 и геометрическом масштабе модели 1:100 значения сдвижений точек в пересчете на натуру могут быть определены в этом случае с точностью до 1 мм. Такую же точность определения смещений обеспечивают зеркальные и оптические тензометры, при этом смещения реперов в увеличенном виде фиксируют на экране.

Для воспроизведения работы крепей применяют приборы пьезометрического и рычажного типов - для моделей мелких масштабов, рычажно-маятникового и гидравлического типов - для моделей крупных масштабов.

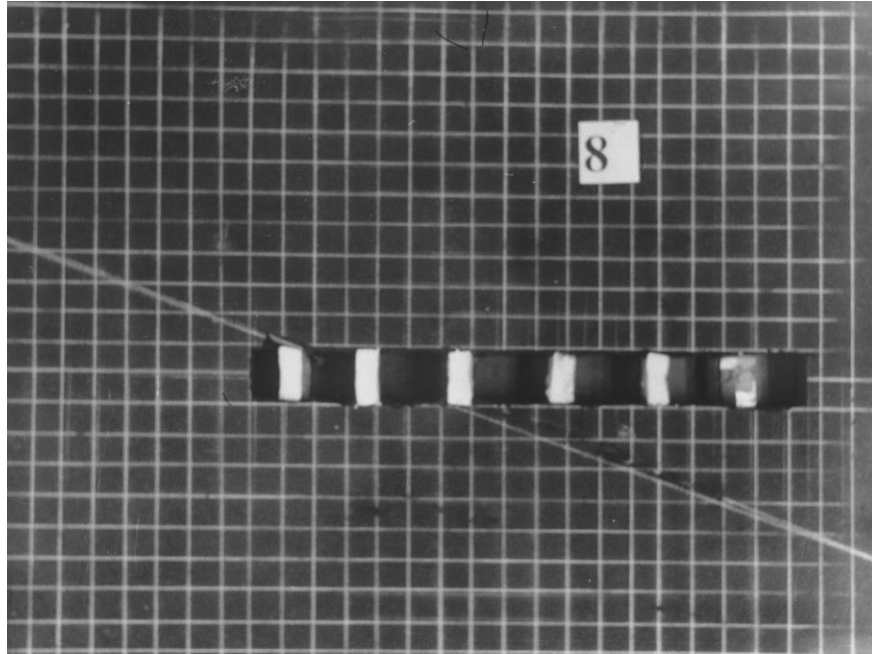
Завершающим этапом моделирования является собственно испытание модели, т.е. воспроизведение в определенном масштабе времени процесса изменений полей напряжений, деформаций и смещений с разрывом сплошности при разработке. Исходя из конкретной задачи, при испытании модели более подробно изучают распределение напряжений в массиве вокруг забоя выработки, либо развитие деформаций и сдвижений толщи пород и земной поверхности, либо развитие деформаций, разрушений и смещений пород в призабойном пространстве и взаимодействие пород с крепью и т. д.

На рис. 14.2 показаны виды некоторых моделей из эквивалентного материала с различными вариантами решаемых исследователями задач.

a)



б)



в)

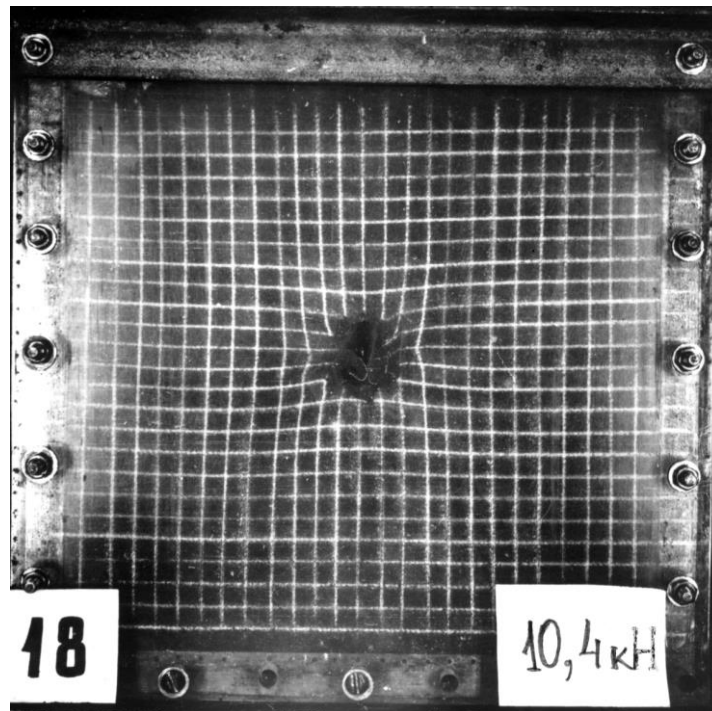


Рис. 14.2. Некоторые варианты моделей из эквивалентных материалов, выполненные на различных стендах: а) изучение характера смещений толщи пород над выработанным пространством; б) изучение характера смещения пород вокруг забоя подготовительной выработки пересекающей трещину; в) изучение характера деформирования приконтурного массива в окрестности одиночной выработки, закрепленной металлической арочной крепью с обратным сводом

По окончании испытания модели обычно из ее части, не подвергнутой деформациям при испытаниях, вырезают образцы материалов-эквивалентов для проведения контрольных определений их свойств.

Обработка результатов исследований производится путем построения функциональных зависимостей изучаемых параметров от изменения горно-геологических и горнотехнических условий. Они представляются в виде относительных показателей, при этом полученные в результате зависимости должны сопоставляться с результатами натурных исследований.

Для построения прогнозных зависимостей серии опытов планируют так, чтобы максимально охватить все необходимые условия и получить надежные результаты, для чего используют современные научные методы планирования экспериментов, например, метод латинских квадратов.

Моделирование на эквивалентных материалах позволяет с большой степенью детальности проследить механизм процессов в толще пород при движении забоя выработки, особенно процессов деформирования пород с разрывом сплошности, что обычно исключено при других методах моделирования. Вследствие этого метод эквивалентных материалов является наиболее действенным, благодаря чему он получил широкое применение при решении различных задач механики горных пород.

14.4. Метод центробежного моделирования

Метод центробежного моделирования заключается в замене гравитационных сил инерционными, создаваемыми в модели в результате ее вращения в каретке центрифуги. В принципе, метод позволяет моделировать объемное напряженно-деформированное состояние (НДС) пород вокруг выработок как в упругой области, так и за ее пределами.

Модель объекта, выполненную в заданном геометрическом масштабе, помещают в центрифугу и путем равномерного вращения нагружают объемными инерционными силами, придавая тем самым породам модели некоторый фиктивный объемный вес. Это позволяет в ряде случаев для изготовления модели использовать материал, одинаковый по своим физико-механическим свойствам с материалом природы, что создает определенные преимущества перед методом эквивалентных материалов.

Центрифуга представляет собой коромысло, укрепляемое на вертикальной вращающейся оси (рис. 14.3). К нему прикрепляют съемные каретки, в которые помещаются исследуемые модели. Из условий безопасности и с учетом значительных размеров центрифуг (диаметр 3...5 м), их размещают в помещениях с массивными ограждениями, чаще всего – в подвалах.

С помощью специального устройства при работе центрифуги измеряют и контролируют скорость вращения и разворот кареток из вертикального в горизонтальное положение (при наборе скорости вращения) и обратный разворот (при снижении скорости).

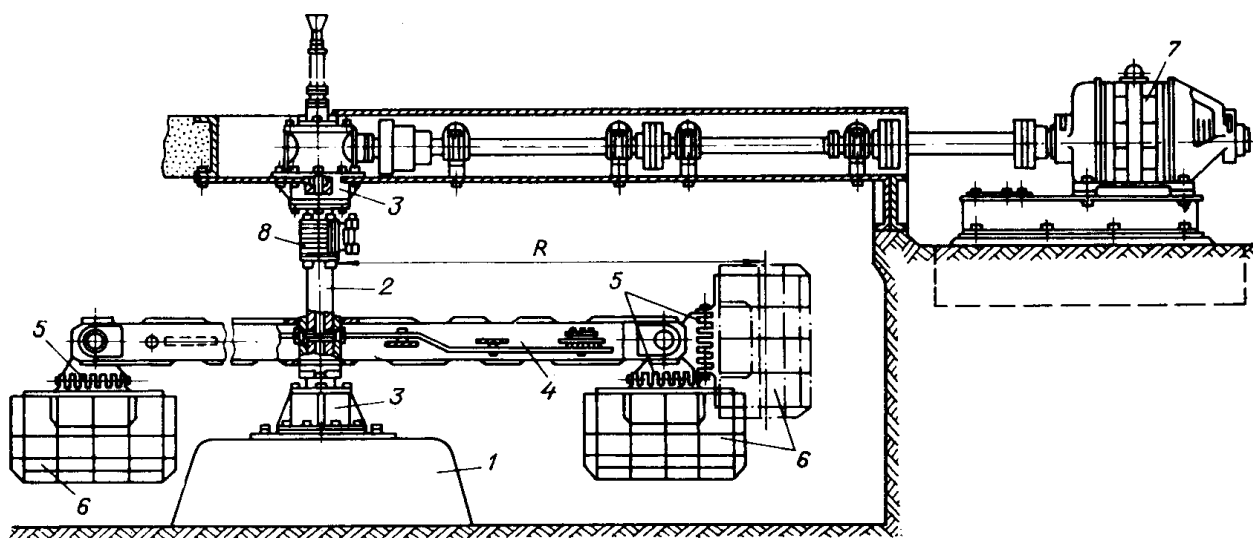


Рис. 14.3. Конструктивная схема центрифуги: 1 – фундамент; 2 – ось вращения; 3 – подшипники; 4 – коромысло; 5 – коммутаторы; 6 – каретки; 7 - электродвигатель

Наблюдения за деформациями модели ведут с помощью электрических или других тензодатчиков, аэростатических динамометров, сельсиновых пар, индикаторов часового типа и пр. датчиков, позволяющих в процессе вращения центрифуги непрерывно получать информацию на пульте управления (дистанционно). Фиксируя деформации и напряжения пород модели в различных точках, изучают таким путем закономерности процессов для моделируемых условий, а также устанавливают оптимальные параметры горнотехнических объектов и сооружений по фактору устойчивости.

Для непосредственного наблюдения за макродеформациями моделей в процессе центрифугирования применяют также дистанционные фото-, видеоустановки и стробоскопные установки, позволяющие проследить кинетику деформаций модели. Стробоскопы – приборы,

позволяющие фиксировать быстропротекающие периодические процессы – применяют также для визуального наблюдения.

При решении задач механики горных пород с применением центробежного моделирования обычно испытывают несколько (2 ÷ 6) идентичных моделей (моделей-близнецов), помещая их попарно в каретки центрифуги. Результаты экспериментов затем усредняют, одновременно контролируя достоверность опытов по признаку повторяемости результатов в пределах случайных отклонений.

Метод центробежного моделирования с успехом и большой степенью надежности может быть применен при решении задач, связанных с определением размеров устойчивых потолочин камер, оптимальной формы и параметров бортов карьеров и отвалов, давления обрушенных пород на днища очистных блоков, влияния длительной нагрузки на крепь капитальных выработок, пройденных в пластичных глинистых породах и др. Использование специальных устройств позволяет моделировать в центрифуге одновременное действие статического поля напряжений и динамического поля, создаваемого при взрывных работах.

Достоинством центробежного моделирования является и то, что это единственный из методов моделирования, в котором, благодаря использованию натуральных горных пород, соблюдается соответствие между размерами частиц и молекул. Для некоторых задач это имеет значение.

Вместе с тем данный метод имеет и ряд недостатков. Один из них – отсутствие однородности механического силового поля, т.к. вследствие ограниченного радиуса центрифуги силовые линии и эквипотенциальные поверхности в модели непараллельны. Кроме того, с удалением от центра тяжести модели в ту или иную сторону по ее высоте изменяется эффективный радиус вращения, соответственно, изменяется и масштаб моделирования. Указанное обстоятельство и технические возможности ограничивают предельные размеры моделей по высоте, а, следовательно, и возможные глубины моделируемой толщи пород.

При центробежном моделировании также крайне затруднительно, а иногда и совсем невозможно, воспроизводить слоистые толщи разнородных по составу и свойствам пород, большие технические трудности представляет и воспроизведение в модели перемещения забоя во времени, что ограничивает область эффективного применения

данного метода, поэтому в ряде случаев возникает необходимость обращения к другим методам моделирования.

14.5. Поляризационно-оптический метод моделирования

Поляризационно-оптический, или просто оптический, метод моделирования позволяет устанавливать распределение и значения напряжений в массивах пород и элементах сооружений любой конфигурации, когда деформации модели происходят без разрыва сплошности.

Еще в 1816 г. Д.Брустер обнаружил, что если кусок стекла, находящийся в напряженном состоянии, осветить поляризованным светом, то на этом стекле будет видна окрашенная в яркие цвета фигура. Эти цвета, как было установлено, зависят от величины действующих напряжений. Д.Брустер предложил воспользоваться наблюдаемым эффектом для определения напряжений в телах сложной конфигурации, при помощи изготавливаемых из стекла моделей, которые должны исследоваться в поляризованном свете при различных условиях нагружения. Позже была установлена зависимость между оптическим эффектом и величиной разности действующих в некоторой точке тела главных нормальных напряжений, при этом было замечено, что изменение толщины плоской модели пропорционально сумме главных нормальных напряжений, действующих в этой же точке.

Практическое применение оптический метод исследования напряжения получил только с 1901 г., когда в качестве материала для моделей стали применять целлулоид и была разработана техника измерения напряжений.

Таким образом, оптический метод основан на свойстве большинства прозрачных изотропных материалов (целлулоид, бакелит, фенолит и др.), называемых оптически чувствительными, при приложении механических нагрузок приобретать оптическую анизотропию и проявлять способность двойного лучепреломления. Последнее заключается в том, что луч света, проходя через прозрачную кристаллическую среду, разлагается на две взаимно перпендикулярные плоскополяризованные составляющие, которые распространяются внутри среды с различной скоростью.

Применительно к решению задач горного давления впервые этот метод был применен Ф.Левинсон-Лессингом и А.Зайцевым при ис-

следовании влияния формы сечений тоннелей на характер распределения напряжений [218]. Проведенные опыты показали, что наибольшее сжимающее напряжение (при одноосном начальном напряженном состоянии) возникает по боковым сторонам отверстия и что оно достигает, примерно, тройного значения по отношению к сжимающему напряжению в ненарушенном массиве; наименьшие напряжения возникают при овальном и подковообразном сечениях, вытянутых в направлении действующих сил.

Применение метода фотоупругости в геомеханике базируется на теореме Леви-Митчела о независимости характера распределения напряжений в плоских моделях (в том числе - из оптически чувствительных материалов) от упругих постоянных моделей при равенстве нулю равнодействующей всех приложенных внешних сил (главного вектора) и равнодействующей всех моментов (главного момента), что позволяет при моделировании обеспечивать только геометрическое подобие модели и натуры.

Оптически чувствительные материалы, применяемые для изготовления моделей, должны обладать высокой прозрачностью, оптической и механической изотропностью, стабильными оптико-механическими характеристиками и необходимой прочностью. Вместе с тем они должны хорошо обрабатываться и проявлять достаточно малые краевые эффекты, связанные с появлением оптической разности хода на контуре пластин вследствие внутренних напряжений.

Под руководством П.М. Цимбаревича были проведены эксперименты по исследованию НДС массива при помощи оптико-поляризационного метода с применением в качестве оптически-активного материала игдантин, состоящего из смеси желатинового раствора и глицерина. Игдантин заливался в разъемную ванну с боковыми стеклянными стенками, а нагрузка модели осуществлялась собственным весом материала. Однако попытки применения желатиновых растворов не дали положительных результатов, т.к. на контактах слоев полностью искажалась картина распределения напряжений.

Производство новых полимерных материалов с разнообразными оптико-механическими свойствами открыло широкие возможности в подборе материалов для оптического моделирования. В частности, для задач механики горных пород весьма удобно применение органических стекол и эпоксидных смол. В пластинках из указанных материалов в принятом масштабе вырезаются контуры изучаемых выработок (или систем выработок), вокруг которых исследуется распреде-

ление напряжений при различных схемах нагружения пластинок по контуру растягивающими или сжимающими силами.

Линейную разность хода Γ и направления главных напряжений определяют при просвечивании плоской модели в полярископе (рис. 14.4).

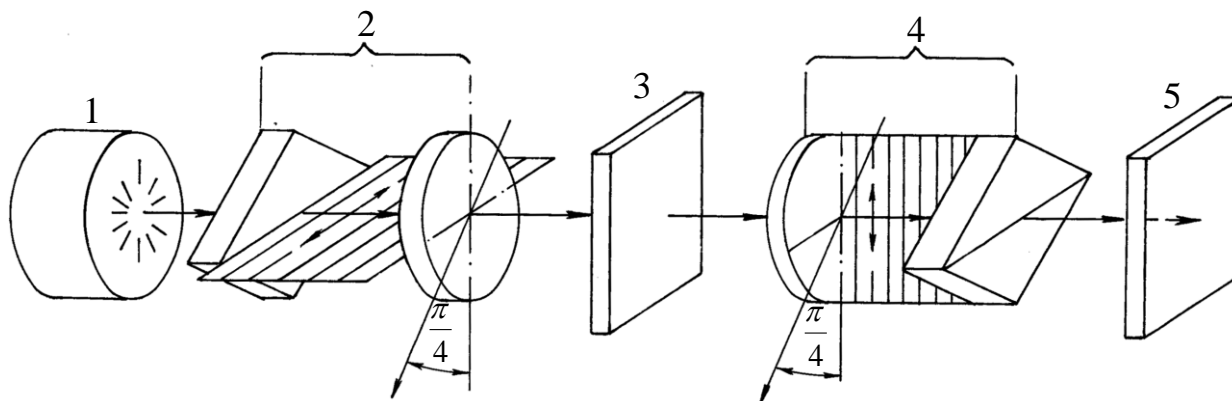


Рис. 14.4. Принципиальная схема оптико-поляризационной установки:
 1 – коробка с матовым стеклом; 2 – поляризатор;
 3 – испытываемая модель; 4 – анализатор; 5 – экран

Луч света от источника 1 , пройдя через поляризатор 2 , плоско поляризуется. Поляризованный свет, пройдя далее через напряженную модель 3 , претерпевает двойное преломление, которое различно в разных точках модели в зависимости от значений и направлений главных напряжений в этих точках. Далее оба луча, образовавшиеся в рассматриваемой точке модели, проходят через анализатор 4 и при этом приводятся в одну плоскость. Прошедшие анализатор плоскополяризованные лучи интерферируют при определенной оптической разности хода, которая пропорциональна разности главных напряжений в соответствующей точке модели.

Если источник 1 в полярископе излучает белый свет, то модель и анализатор после прохождения лучей света через поляризатор получают на экране 5 изображение, окрашенное в различные цвета светового спектра. При этом каждая цветная полоса представляет собой геометрическое место точек с одинаковой оптической разностью хода Γ и, следовательно, с одной и той же разностью главных нормальных напряжений $\sigma_1 - \sigma_2$, полуразность которых представляет собой максимальное касательное напряжение

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}$$

Таким образом, цветные полосы на экране полярископа представляют собой линии равных максимальных касательных напряже-

ний исследуемой модели. Эти линии называют **изохромами**. Картину изохром, получаемую в поле анализатора, можно визуально наблюдать и фотографировать (рис. 14.5 а).

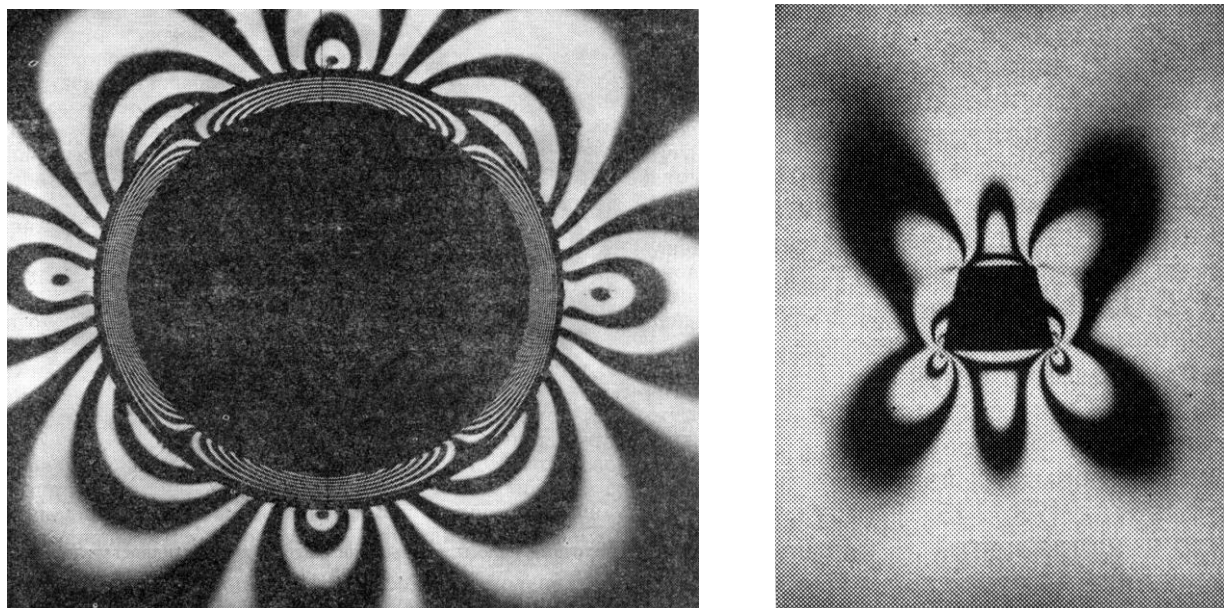


Рис. 14.5 Изохроматическая картина полос в оптических моделях:
а) кольцевая крепь; б) крепь трапециевидной формы.

В некоторых точках исследуемой модели плоскость колебания луча совпадает с направлением какого-либо из главных нормальных напряжений. В таких точках двойного лучепреломления не происходит. Если плоскости поляризации поляризатора и анализатора взаимно перпендикулярны, т.е. скрещены, то лучи в указанных выше точках модели через анализатор не проходят. В результате на экране появляются черные линии, пересекающие цветную картину изохром. Эти линии суть геометрических мест точек, в которых направления главных нормальных напряжений параллельны между собой. Такие линии называют **изоклинами**.

Поворачивая скрещенные поляризатор и анализатор на различные углы, получают систему изоклин, позволяющую определить направления главных нормальных напряжений в любой точке модели. По изоклинам строят траектории главных напряжений, называемые **изостатами**.

При просвечивании напряженной модели темные пятна образуются также в точках, свободных от напряжений, и в точках, где главные напряжения равны между собой. Эти точки называют **изотропными** или особыми. Особые точки определяют структуру изохром и

изоклин и поэтому имеют важное значение при исследовании распределения напряжений в модели.

Если требуется исключить появление на экране изоклин, то вместо плоской поляризации света используют круговую. Для этого в полярископе конструктивно предусмотрены пластинки из слюды такого же диаметра, как и у поляроидов. Одну из них вводят в оптическую систему позади поляризатора (относительно источника света), другую - впереди анализатора. Для света, поляризованного по кругу, все направления в модели, на которую он падает, равноценны, поэтому по изостатическим направлениям луч не погасает.

Кроме белого, при исследовании распределения напряжений в модели используется также монохроматический свет с определенной длиной волны, что значительно облегчает количественный анализ напряжений в различных точках модели. Для этого применяют натриевые или ртутные лампы со светофильтрами. Обычно выделяют зеленую линию светового спектра с длиной волны $\lambda=546$ мкм. Если напряженную модель просвечивать монохроматическим светом, то на экране вместо цветной картины изохром получается чередующийся ряд темных и светлых полос (рис.14.5, б), причем в тех точках, где разность хода равна четному числу полуволен (т.е. целому числу волн), происходит погасание света, и образуются темные полосы; в тех же точках, где разность хода равна нечетному числу полуволен, проходящий свет достигает наибольшей интенсивности и наблюдаются светлые полосы.

Подсчитав число полос, которые прошли через исследуемую точку модели при ее нагружении легко определить оптическую разность хода, а по ней - максимальное касательное напряжение в этой точке.

Однако в соответствии с основным законом фотоупругости для этого необходимо знать оптический коэффициент напряжений C , который является показателем относительной чувствительности оптически активных материалов. Коэффициент C устанавливают путем испытания контрольных образцов в режиме растяжения, сжатия или чистого изгиба. Он имеет размерность, обратную размерности напряжения; обычно его выражают в брюстерах, причем $1 \cdot 10^{-7} \text{ см}^2/\text{кгс}=0,98$ брюстера.

Имея данные о коэффициенте C , определяют оптическую разность хода Γ и далее переходят к величинам $\sigma_1 - \sigma_2$ и τ_{\max} . Для этого применяют различные способы. Один из них - способ полос - в общих чертах описан выше. Этот способ применяют для моделей из ма-

териалов с высокой оптической чувствительностью. Он довольно прост и обеспечивает точность, достаточную для практических целей. Другим является способ сопоставления цветов по цветной картине изохром, получаемой при просвечивании модели белым светом. Для определения по картине изохром значения оптической разности хода Γ используют шкалу цветов или таблицу цветов Ньютона. Определив цвет и порядок изохромы в данной точке модели и установив по таблице соответствующую разность хода, вычисляют значение $\sigma_1 - \sigma_2$ по формуле:

$$\Gamma = Cd(\sigma_1 - \sigma_2).$$

Данный способ менее точен, чем предыдущий, так как включает в себя цветовую ошибку индивидуального наблюдателя.

Более точным является способ компенсации, предусматривающий использование специального прибора - компенсатора. Принцип этого способа состоит в том, что на разность хода лучей, создаваемую моделью, компенсатором накладывается разность хода, равная по значению, но обратная по знаку. Результирующая разность хода оказывается нулевой, т.е. при скрещенных поляроидах в исследуемой точке модели происходит затемнение.

Однако конечной задачей является раздельное получение значений главных напряжений в каждой точке модели. Способы разделения главных напряжений основаны на использовании дифференциальных уравнений равновесия с привлечением при определениях картин изохром и изостат. Особо следует отметить способ разделения напряжений с использованием линий сумм главных напряжений – **изопахик**, которые могут быть получены различными методами - с помощью эффекта муаровых полос, лазерной или голографической интерферометрии.

При решении задач, которые не могут быть сведены к плоским, применяют объемные модели. Для нахождения напряжений в какой-либо внутренней области объемной модели выделяют эту область так, чтобы по пути прохождения светового луча напряженное состояние практически не менялось. Основные способы решения объемных задач: а) способ, основанный на использовании свойств оптически чувствительных материалов моделей фиксировать («замораживать») оптический эффект; б) способ рассеянного света; в) способ оптически чувствительных клеек.

Наибольшее распространение получил первый способ - «замораживание» с последующим распиливанием объемной модели на тон-

кие срезы толщиной 1-3 мм. Он основан на открытом Г. Оппелем в 1936 г. эффекте сохранения картины полос некоторыми оптически чувствительными материалами, обусловленном особенностями их двухфазной молекулярной структуры. Сперва модель нагружают при повышенной температуре; затем, не убирая нагрузки, постепенно охлаждают до комнатной. При снятии нагрузки деформации, полученные при повышенной температуре, остаются, соответствующее им двойное лучепреломление также сохраняется. Температуры «замораживания» различных оптически чувствительных материалов колеблются в пределах 80-150°C.

В последние годы метод фотоупругости все шире применяют и для решения динамических задач. При этом возникающие в моделях интерференционные картины дают возможность безинерционно исследовать распространение волн напряжений на всех стадиях динамического процесса. Поляризационно-оптическое исследование динамических явлений связано с особенностями моделирования, техники регистрации быстропротекающих процессов, определения зависимости между механическими и оптическими величинами и выбора методов разделения напряжений. В частности, для применяемых материалов необходимо оценивать влияние вязкоупругих свойств с точки зрения погрешности в определении напряжений и деформаций. Для регистрации интерференционных картин применяют высокоскоростные камеры, в качестве источников света используют обычно газоразрядные импульсные лампы.

Моделирование динамических нагрузок осуществляют с помощью копров различных конструкций, а также взрывов специальных зарядов.

Для разделения напряжений одновременно с регистрацией картин полос производят запись деформаций в модели с помощью тензометрических или геометрических (муар, голография, сетки) методов.

Другое направление связано с использованием метода фотомеханики при изучении деформирования пород в условиях проявления неупругих деформаций, в частности деформаций пластичности и ползучести. В этом случае речь идет об эффекте фотопластичности и фотоползучести применяемых оптически чувствительных материалов.

При моделировании динамических процессов, а также напряженного состояния объектов с учетом деформаций пластичности и пол-

зучести в отличие от статических задач необходимо добиваться соответствия реологических свойств природы и материала модели.

Таким образом, оптическое моделирование позволяет получить весьма наглядное представление о поле напряжений в массиве пород вокруг выработок любой конфигурации. Даже качественная картина распределения напряжений иногда позволяет сделать важные заключения и выводы, выделить наиболее и наименее напряженные участки, наметить пути достижения оптимального распределения напряжений.

14.6. Другие методы моделирования

При решении задач механики горных пород, наряду с применением описанных выше различных методов, используют также и их комбинации, например, принципа центробежного моделирования и принципа поляриционно-оптического метода, либо метода эквивалентных материалов и центробежного моделирования.

Метод, сочетающий принцип метода эквивалентных материалов и принцип центробежного моделирования, получил научную, технологическую разработку и широкое применение в результате многолетних (с 1946 г.) исследований Криворожского научно-исследовательского горнорудного института (НИГРИ), проводившихся под руководством проф. И.Р. Ривкина.

Применением в модели эквивалентных материалов взамен натуральных горных пород и нагружением модели в центрифуге, обеспечивается выполнение условий подобия в геометрическом масштабе модели.

Таким образом, сущность данного метода состоит в том, что вместо модели из натуральных горных пород, применяемой в методе центробежного моделирования, модель изготавливают из эквивалентных материалов, механические характеристики которых удовлетворяют условию в некотором достаточно крупном геометрическом масштабе. Модель помещают в центрифугу и подвергают испытаниям при параметрах вращения, определяемых принятым масштабом центробежного моделирования. В данной комбинации двух методов геометрический масштаб модели из эквивалентных материалов, испытываемой в центрифуге, равен произведению этих двух геометрических масштабов.

Подбирая эквивалентные материалы с учетом геометрического масштаба, например, 1:20 и задавая параметры вращения центрифуги при масштабе центробежного моделирования 1:20, обеспечивается общий геометрический масштаб модели 1:400, в котором и необходимо изготовить все элементы модели, подготавливаемой к испытаниям.

Изложенный подход существенно расширяет технические возможности изготовления материалов и испытания моделей в широком диапазоне геометрических масштабов.

Объемные модели из оптически чувствительных материалов также обычно нагружают с использованием центрифуги, сочетая в этом случае принципы оптического метода и метода центробежного моделирования.

Среди прочих методов заслуживают особого внимания электроаналоговые методы моделирования, т.е. электрическое моделирование физических полей. Эти методы основаны, как отмечалось выше, на совпадении дифференциальных уравнений, описывающих процессы в электрическом и механическом силовых полях. Такие модели могут быть двух типов. В первом - методе электрогидродинамических аналогий (ЭГДА), предложенном в 1922 г. акад. Н.Н. Павловским, используют меняющиеся электрические свойства сплошной проводящей среды.

Второй, известный как метод электрических сеток прямой аналогии (ЭСПА), предусматривает замену сплошной среды сеткой из некоторых элементарных электрических ячеек, параметры которых назначают исходя из свойств среды в механической системе и критериев подобия. Электрические ячейки - элементы напряжения, силы тока, индуктивности, емкости - служат аналогами механического напряжения, скорости упругого смещения, массы, податливости элементарных объемов моделируемого массива пород.

Электроаналоговые методы применяют в настоящее время для решения задач, связанных с динамическими процессами в породных массивах, а дальнейшее развитие этих методов может открыть пути моделирования совместного действия статических и динамических процессов механики горных пород.

Часто используют в сочетании оптический метод и метод эквивалентных материалов. Например, оптическим методом наиболее детально изучают распределение напряжений в зоне опорного давления, а методом эквивалентных материалов для тех же условий иссле-

дуют развитие деформаций толщи с разрывом сплошности и механизм взаимодействия сдвигающихся пород с крепью.

Более подробную информацию о методах моделирования можно почерпнуть в книге Насонова И.Д. и Ресина В.И. [220].

Биографическая справка

1. Левинсон-Лессинг, Франц Юльевич (1861-1939) - советский геолог и петрограф, академик. Основные труды по теоретической петрографии, вулканологии, вопросам петрогенезиса, дал первую химическую классификацию горных пород.

2. Покровский, Георгий Иосифович (1901-1976) – советский ученый в области физики. Основные труды по физике взрыва и направленным взрывам.

3. Бертран, Жозеф Луи Франсуа (1822-1900) - французский математик, почетный член Петербургской АН труды по математическому анализу, теории групп. Им установлены, в частности, признаки сходимости числовых рядов.

4. Кирпичев, Михаил Викторович (1879-1955) - известный советский ученый в области теплотехники и теплофизики, академик. Создатель теории теплового моделирования процессов теплопередачи и тепловых устройств.

5. Леви, Поль (1886-1971) – французский математик, основные работы по теории вероятностей, теории функций, механике и функциональному анализу.

6. Павловский, Николай Николаевич (1884-1932) - советский ученый в области гидравлики и гидротехники, академик АН СССР. Наиболее важное значение имеет его труд “Теория движения грунтовых вод под гидротехническими сооружениями”.

Контрольные вопросы и задания

1. Сформулируйте теоремы подобия, лежащие в основе моделирования физических явлений?
2. Сформулируйте условия геометрического, кинематического и динамического подобия механических систем.
3. На какой основе изготавливают эквивалентные материалы?

4. Изложите методику подбора эквивалентного материала на основе песчано-парафиновой смеси.
5. Изложите методику испытаний моделей из эквивалентных материалов.
6. Раскройте физические принципы, лежащие в основе центробежного моделирования.
7. Изложите физические предпосылки оптического метода моделирования.
8. Дайте определение «изохром», «изоклин», «изостат».
9. Какие точки при исследовании оптических моделей называют «изотропными»?
10. В чем состоит «метод замораживания напряжений при оптическом моделировании»?