



**МОСКОВСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**РЕДАКЦИОННЫЙ**

**С О В Е Т**

**ИЗДАТЕЛЬСТВО  
МОСКОВСКОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО  
ГОРНОГО УНИВЕРСИТЕТА**

*Председатель*

**Л.А. ПУЧКОВ**

*ректор МГГУ,  
чл.-корр. РАН*

*Зам. председателя*

**Л.Х. ГИТИС**

*директор  
Издательства МГГУ*

*Члены редсовета*

**И.В. ДЕМЕНТЬЕВ**

*академик РАН*

**А.П. ДМИТРИЕВ**

*академик РАН*

**Б.А. КАРТОЗИЯ**

*академик РАН*

**М.В. КУРЛЕНЯ**

*академик РАН*

**В.И. ОСИПОВ**

*академик РАН*

**Э.М. СОКОЛОВ**

*академик МАН ВШ*

**К.Н. ТРУБЕЦКОЙ**

*академик РАН*

**В.В. ХРОНИН**

*профессор*

**В.А. ЧАНТУРИЯ**

*академик РАН*

**Е.И. ШЕМЯКИН**

*академик РАН*



**А.И. Мороз**

**ГОРНЫЕ НАУКИ**

**САМО-  
НАПРЯЖЕННОЕ  
СОСТОЯНИЕ  
ГОРНЫХ ПОРОД**



**МОСКВА**

**ИЗДАТЕЛЬСТВО МОСКОВСКОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО ГОРНОГО УНИВЕРСИТЕТА**

**2 0 0 4**

УДК 622.023.23, 622.831  
ББК 30.121  
М 80

*Книга соответствует "Гигиеническим требованиям к изданиям книжным для взрослых. СанПиН 1.2.1253-3", утвержденным Главным государственным санитарным врачом России 30 марта 2003 г.*

**Мороз А.И.**  
М 80 Самонапряженное состояние горных пород. – М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2004. – 288 с.: ил.  
ISBN 5-7418-0330-X

Приведены результаты исследований закономерностей возникновения и развития самонапряженного состояния в условиях разгрузки в массиве горных пород и конструкциях подземных сооружений.

Обобщены и проанализированы современные представления о начальном напряженном состоянии горной породы и его изменении после снятия природных давлений. Рассмотрены различные схемы образования неоднородного напряженного состояния в горных породах как причины появления самонапряженного состояния в цикле разгрузки.

Изложен подход для анализа напряженно-деформированного состояния осадочной (обломочной) горной породы с эпигенетической цементацией, объясняющий возникновение самонапряженного состояния при разгрузке, с учетом истории формирования ее н.д.с. Значительная часть книги посвящена исследованию напряженно-деформированного состояния горной породы в цикле разгрузки на основе механических моделей.

Для широкого круга специалистов, занимающихся исследованием вопросов геомеханики, проектированием и строительством подземных сооружений. Может представлять интерес для преподавателей и студентов технических вузов специальностей геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика, геотехнология (подземная, открытая и строительная).

Табл. 8, ил. 122, список лит. – 133 назв.

УДК 622.023.23, 622.831  
ББК 30.121

ISBN 5-7418-0330-X

© А.И. Мороз, 2004  
© Издательство МГГУ, 2004  
© Дизайн книги. Издательство МГГУ, 2004

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Объем строительства подземных сооружений в России составляет несколько тысяч километров в год, в том числе на шахтах только одного Кузнецкого бассейна в 2000 г. было пройдено более 450 км горно-промышленных выработок.

Освоение подземного пространства, связанное с ростом добычи полезных ископаемых, развитием инфраструктуры больших городов, строительством гидротехнических выработок, объектов специального назначения продолжает сталкиваться с многочисленными проблемами (безопасности, экологическими, совершенствования технологии проходки и крепления и т.д.), требующими своего решения.

Одной из наиболее сложных проблем геомеханики является полнота и достоверность описания механических свойств вмещающего массива горных пород, влияющих при строительстве подземных сооружений на выбор и разработку новых, высокотехнологичных видов крепления.

При традиционном подходе к оценке прочностных и деформационных свойств породного массива по результатам испытания извлеченных из него образцов горной породы считается, что они находятся в ненапряженном состоянии, и предполагается неизменность этих свойств до начала испытания образцов и адекватность их свойствам *in situ*. Вместе с тем известны многочисленные случаи уменьшения прочностных свойств образцов породы во времени после изъятия их из природного массива.

В лабораторных условиях (на одноосное сжатие, сложное напряженное состояние) исследователи получают эмпирические данные о свойствах образцов, не учитывая, что в процессе разгрузки их прочностные и деформационные свойства могут претерпеть необратимые изменения. Это обстоятельство может привести при таких исследованиях к ошибочным выводам о фактических механических свойствах породного массива.

Одна из главных причин снижения прочности горной породы в условиях разгрузки связана с природным процессом формирования ее напряженно-деформированного состояния под действием сил гравитации (генезисом), который сопровождается образованием

двух основных подструктур (элементов породы), являющихся носителями своих механических совмещенных полей напряжений, сумма которых равна начальным напряжениям. Образованные в горных породах разнородные механические поля напряжений являются причиной возникновения внутренних напряжений разной полярности в условиях разгрузки, что наблюдается при проходке выработок и строительстве подземных сооружений.

При разгрузке осадочной породы в результате воздействия упругой энергии ее активной подструктуры (сжимающих напряжений) на консервативную подструктуру в последней возникают растягивающие напряжения (образуется поле противоположной полярности по отношению к начальному), которые и являются источником снижения прочностных и деформационных свойств породы. Такое состояние, характеризуемое как сжимающими, так и растягивающими напряжениями, называется самонапряженным.

Идея возникновения самонапряженного состояния при разгрузке осадочной горной породы принадлежит советскому ученому Л.Н. Репникову (1963 г.). Это предложение, по ряду причин, в том числе и субъективных, оставшееся вне поля зрения исследователей, по существу явилось продолжением подхода Н.М. Герсеванова о двух системах напряжений в грунтовой массе, представляющего в основных чертах только первую стадию формирования напряженно-деформированного состояния осадочной горной породы до второй стадии – превращения заполнителя в связующий цемент.

Дальнейшие исследования показали, что процессы образования разнополярных напряжений происходят и в конструкциях подземных сооружений, состоящих из элементов с различными деформационными свойствами. Возникающие растягивающие напряжения при разгрузке в одном из элементов обделки являются потенциальным источником образования дефектов в последующий период эксплуатации сооружения.

Таким образом, установление закономерностей возникновения и развития самонапряженного состояния в условиях разгрузки в массиве горных пород и конструкциях подземных сооружений может внести значительный вклад в развитие представлений о природе геомеханических процессов при обосновании расчетных схем и строительстве подземных сооружений.

# **1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ ОБ ИЗМЕНЕНИИ НАЧАЛЬНОГО НАПРЯЖЕННО- ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОРОДНОГО МАССИВА ПРИ УМЕНЬШЕНИИ ВНЕШНИХ НАГРУЗОК**

---

---

## **1.1. НАЧАЛЬНОЕ НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПОРОДНОГО МАССИВА ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ГОРНОЙ ТЕМАТИКИ**

Среди приоритетных направлений исследований в области современной геомеханики – науки о формировании напряженно-деформированного состояния (н.д.с.) и *«деформациях горных пород, движениях в них жидкости и газа и силах, вызывающих эти движения и деформации»*, устойчивости горных выработок – находятся изучение и прогноз развития деформационных процессов и явлений, возникающих в породном массиве при освоении подземного пространства [23]. Реализация указанных исследований возможна при обосновании и выборе систем и порядка ведения подземных работ, способов управления горным давлением и параметров технологических процессов, при которых деформации в толще горных пород и на поверхности будут находиться в заданных пределах.

Повышение достоверности прогноза процессов и явлений, связанных со строительством подземных сооружений, может быть достигнуто с помощью описания в численных критериях параметров первоначального (природного) напряженного состояния породного массива.

Описание процессов изменения начального напряженного состояния вмещающего массива горных пород продолжает оставаться одной из наиболее сложных и актуальных научных проблем геомеханики, включающих две относительно самостоятельные за-

дачи. Первая – оценка естественного состояния по многим параметрам, в том числе с точки зрения сложившегося на протяжении геологических эпох н.д.с. до начала техногенных воздействий (разгрузки). Вторая – оценка влияния техногенных воздействий на изменение природного «фона» напряженно-деформированного состояния породного массива. Важность решения задачи исчерпывающего описания н.д.с. массива очевидна. Для того, чтобы решить вторую задачу, необходимо в полном объеме предмета провести исследования породного массива и составить паспорта состояния массива.

Исследования, относящиеся к изучению процессов формирования природного напряженного состояния с точки зрения влияния на результирующее н.д.с., которое будет образовываться при разгрузке породного массива, можно представить двумя основными блоками.

Подавляющее число работ, посвященных описанию начального напряженного состояния породного массива, можно отнести к первому блоку. Особенность этих исследований состоит в том, что горная порода рассматривается как инертная к «природной технологии» среда, формируемая под действием сил гравитации по всей траектории его нагружения, в которой на какой-либо стадии нагружения исключается образование областей материала с другим напряженным состоянием. В случае снятия сил гравитации в массиве напряженное состояние характеризуется отсутствием напряжений, т.е. разгруженная порода приходит в ненапряженное состояние.

Отличительной чертой подходов второго блока является стремление некоторых авторов с разных точек зрения [21, 27, 70, 120] отразить и учесть одну и ту же особенность «природной технологии» – специфику формирования в разных формах совмещенных или локальных (разобщенных) неоднородных полей напряжения в горной породе как в одно- или двухфазной средах. В случае разгрузки в породе с разнородными полями (подструктурами) возникают внутренние напряжения разной полярности, и она переходит в самонапряженное состояние, что является принципиальным отличием от подходов первого блока.

В настоящей работе под начальным напряженным состоянием, изучаемым в работах обоих блоков, подразумевается состояние

массива до начала всякого рода воздействия техногенного характера, т.е. это результирующий продукт природы на момент начала разгрузки. Материалы по оценке начального напряженного состояния являются базой для разработки решений, связанных с проектированием подземных объектов и, что, очевидно, основой мониторинга состояния породного массива в последующий период времени.

В общем случае под напряженным состоянием какого-то объема среды подразумевают распределение внутренних напряжений по указанному объему от действия внешних сил (если не уточняется, о каких напряжениях идет речь), т.е. напряжения являются функцией координат. По своему содержанию они представляют предел приращения усилия к соответствующему приращению площади поверхности, когда приращение площади стремится к размерам элементарной площадки [8, 55, 74]. Из этого определения следует, что указанное распределение напряжений будет носить сугубо вероятностный характер (напряжения в каждой точке являются случайной величиной), когда имеют в виду распределение напряжений по какой-то поверхности, и только в случае интегральной оценки напряженного состояния породного массива под напряжением понимают некоторую усредненность усилий, отнесенных к соответствующей площади. Особенность такого подхода состоит в том, что операция оценки носит формальный (механический) характер. Она не учитывает массу важных факторов (историю формирования массива, физико-механические свойства горной породы с описанием их возможной динамики на протяжении предшествующих геологических эпох и т.д.).

При оперировании понятием «напряжения»  $\sigma$  следует отметить некоторые известные в механике положения. Например, не существует прямого метода определения напряжений в точке (размерности: бар, МПа). О величине напряжений судят по косвенным признакам, которые оказываются доступными для измерений – точнее для инструментального измерения их приращений.

Для того чтобы рассматриваемый вопрос носил конкретный характер, уместно привести некоторые известные из механики сплошной среды понятия.

1. При описании напряженного состояния в точке или элементе горной породы бесконечно малых размеров обычно из массива



Рис. 1.1. Распределение нормальных и касательных напряжений в элементе горной породы

ствующим координатным осям. Если систему координат ориентировать так, что ось  $z$  совпадает с вертикалью, а оси  $x$  и  $y$  являются координатами элемента в горизонтальной плоскости, тогда схема напряжений, действующих на этот элементарный кубик, будет иметь вид, представленный на рис. 1.1.

Следует отметить, что в большинстве работ, посвященных описанию природного напряженного состояния, принято считать оси  $x$ ,  $y$ ,  $z$  главными, причем ось  $z$  ориентирована вертикально. Символ  $\sigma$  означает нормальное к площадке напряжение. Символ  $\tau$  означает, что рассматриваемое напряжение является касательным. Всего в общем случае имеется три нормальных компонента и шесть касательных, но в силу закона парности касательных напряжений число их компонентов сокращается до трех.

2. Совокупность всех компонентов напряжений, которой определяется объемное напряженное состояние среды в точке, называется тензором напряжения и записывается в виде

$$T_{\sigma} = \begin{vmatrix} \sigma_z & \tau_{zx} & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \sigma_x & \tau_{xy} \\ \tau_{yz} & \tau_{yx} & \sigma_y \end{vmatrix}. \quad (1.1)$$

Если координатные оси для элемента являются главными, то касательные напряжения оказываются равными нулю, и тензор напряжений принимает следующий вид:

$$T_{\sigma} = \begin{vmatrix} \sigma_z & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_x & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_y \end{vmatrix}, \quad (1.2)$$

причем в общем случае  $\sigma_z(\sigma_1) > \sigma_x(\sigma_2) > \sigma_y(\sigma_3)$ . «В частности, когда  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma$  (всестороннее равномерное растяжение или сжатие), тензор напряжений называют шаровым» [8].

Для рассмотрения задачи об изменении объема и формы при сложном напряженном состоянии удобно представить каждое из главных напряжений в виде суммы двух напряжений. В этом случае заданный тензор напряжений, образуемый главными напряжениями, записывают в виде двух слагаемых: шарового тензора напряжений (из равных напряжений) и дополняющего его до заданного – так называемого девиатора напряжений (рис. 1.2). «Шаровой тензор связан с изменением объема в окрестности выбранной точки, а девиатор – с изменением формы в окрестности той же точки» [31].

3. Породный массив рассматривается как сплошная среда, и это означает, что напряжения  $\sigma_z$ ,  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  и т.д. являются функциями координат.

Графическое (двумерное) представление трехмерного напряженного состояния дает способ Мора в виде совокупности трех кругов напряжений, построенных на главных напряжениях ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ ) (рис. 1.3).

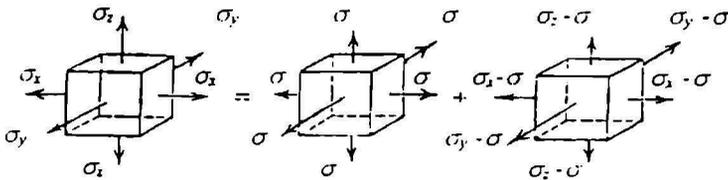


Рис. 1.2. Разложение тензора напряжений, образуемого главными напряжениями, на шаровой тензор и девиатор напряжений

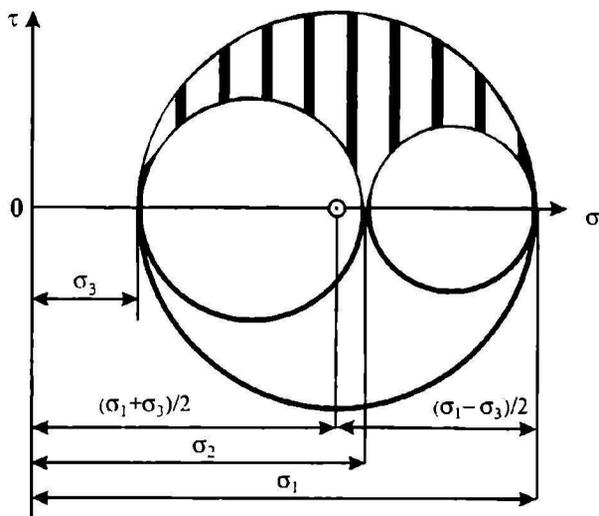


Рис. 1.3. Тензор напряжений в графическом виде

Координаты точек этих окружностей определяют комбинацию нормальных и касательных напряжений ( $\sigma$ ,  $\tau$ ) по сечениям кубика (см. рис. 1.1), параллельным одному из главных напряжений, которая является разрушающей. «Самый большой из трех кругов носит название круга Мора» [31].

Если в кубике провести три площадки, проходящие через начало координат и параллельные главным напряжениям, то напряжения по ним будут зависеть только лишь от двух других напряжений. Например, напряжения по площадкам, направленным параллельно  $\sigma_3$ , изображаются координатами точек круга, построенного на главных напряжениях  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ ; для площадок, параллельных  $\sigma_1$ , — на главных напряжениях  $\sigma_2$  и  $\sigma_3$ . «Таким образом, координаты точек трех кругов напряжений изображают нормальные и касательные напряжения по сечениям кубика, параллельным одному из главных напряжений» [8]. Для площадок, пересекающих все три оси главных напряжений, напряженное состояние полностью определяется точками заштрихованной на рис. 1.3 площади [8, 31].

Другим наглядным представлением напряженного состояния является эллипс напряжений (рис. 1.4), который показывает ориентацию двух главных нормальных напряжений в среде относительно

заданной нагрузки в принятой системе координат, однако при экспериментах эллипс получить нельзя [74].

На этом рисунке приведен эллипс напряжений из [32], в котором главное напряжение, действующее на горизонтальную площадку, равно  $\sigma_{\max}$ , и на вертикальную –  $\sigma_{\min}$ . Этот эллипс может быть использован для определения напряжений по наклонной площадке, составляющей угол  $\alpha$  с вертикальной осью.

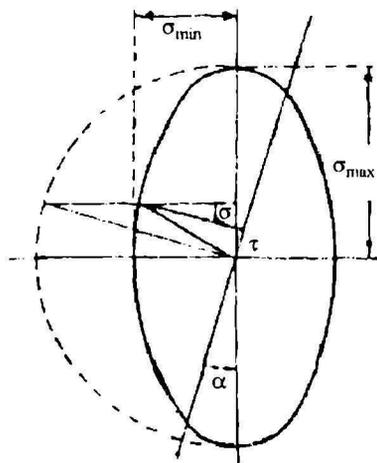


Рис. 1.4. Эллипс напряжений [32]

Согласно современным представлениям начальное напряженное состояние породного массива и его элементарных объемов в самом общем случае является функцией пространственных и временной координат [6]. «С физической точки зрения такой элементарный объем является наименьшим объемом, который сохраняет все физические свойства рассматриваемой горной породы» [74].

Факторы, влияющие на формирование начального напряженного состояния, подразделяются на две группы.

К первой группе относят: гравитационное и температурное поля, физико-механические свойства и структурно-механические особенности породных массивов, рельеф земной поверхности. Ко второй группе – тектонические и горообразовательные процессы, действие подземных и наземных вод и газов, производственную деятельность человека [6]. Основными силами, формирующими начальное напряженное состояние породных массивов, являются силы гравитации (или силы тяжести) горных пород [6, 12]. Это означает, что напряженное состояние является функцией внешних факторов (нагрузок), под действием которых происходило его формирование, и определяется в общем случае полным тензором напряжений.

В работе [11] отмечается, что «собственный вес пород является, как правило, причиной начального напряженного состояния масси-

вов осадочных пород. Начальное поле напряжений массива в этом случае называется гравитационным».

Начальное напряженное состояние принято рассматривать как сумму двух составляющих (от гравитации и от остальных факторов), полагая, что остальные факторы искажают начальное напряженное состояние, образовавшееся под действием сил гравитации. Например, авторы [7] считают, что «общее естественное статическое поле напряжений в ненарушенном массиве формируется под суммарным влиянием гравитационного и тектонического силовых полей».

Акад. В.В. Ржевский отмечал, что искажение гравитационной составляющей существенным образом зависит от проявления физико-механических параметров как отдельностей (образцов), так и массива, состоящего из них: конкретные значения этих параметров создают условия для пространственного перераспределения сил и возникновения локальных зон давления горных пород [6].

Под термином «влияние других факторов» в работах первого блока подразумевается изменение напряженного состояния, выражающееся в повороте эллипса напряжений и изменении величин его главных осей.

В свою очередь первый блок может быть представлен тремя группами предложений. Первая группа авторов (А.Н. Динник, М.М. Протодьяконов, П.М. Цимбаревич, В.Д. Слесарев, Н.С. Булычев и др.) считает, что «вертикальные напряжения являются наибольшими и соответствуют весу столба пород до поверхности; величина горизонтальных напряжений определяется коэффициентом бокового давления» [11], т.е.  $\sigma_z > \sigma_x$ . Компоненты гравитационного начального поля напряжений составляют:

$$\begin{aligned}\sigma_z^{(0)} &= \sigma_1^{(0)} = \gamma H; \\ \sigma_x^{(0)} &= \sigma_y^{(0)} = \sigma_2^{(0)} = \sigma_3^{(0)} = \lambda \gamma H,\end{aligned}\tag{1.3}$$

где  $\gamma$  – удельный вес пород,  $\text{МН/м}^3$ ;  $H$  – глубина залегания рассматриваемой точки, м;  $\lambda$  – коэффициент бокового давления в массиве.

Вторая группа предложений (К.В. Руппенейт, Ф.П. Саваренский, Е.И. Шемякин и др.) основана на том, что горизонтальные и вертикальные напряжения равны между собой. Объясняется это

тем, что «в массиве будет, хотя и очень медленно, происходить процесс релаксации напряжений, напряженное состояние массива будет стремиться к гидростатическому» [74]. В результате коэффициент бокового давления в массивах горных пород должен быть очень близок к единице, причем это относится «не только к напряжениям, создаваемым собственным весом горных пород, но в равной степени и к тектоническим напряжениям». «Давление на некоторой глубине, подобно гидростатическому давлению, передается во все стороны с одинаковой силой» [78].

В работе [27] также отмечается, что «вертикальные и горизонтальные напряжения, возникающие в кубике, должны быть равны между собой». Это означает, что коэффициент Пуассона  $\nu$ , с которым связан коэффициент бокового давления следующим выражением:  $\lambda = \nu / (1 - \nu)$ , должен быть равен 0,5. Эллипс напряжений в этом случае превращается в круг. При  $\nu = 0,5$  относительное изменение объема равно нулю [8].

*«В породных массивах, геологические структурные ослабления которых отличаются большой контактной поверхностью (прослойки, тектонические трещины) и имеют высокую прочность на сдвиг, вертикальная составляющая напряжений in situ является главной и равна горизонтальному давлению  $\gamma H$ »* [42].

В третьей группе предложений предполагается, что при наложении на гравитационное поле дополнительных тектонических напряжений, обычно горизонтальных, суммарное поле напряжений будет характеризоваться горизонтальными напряжениями, превышающими по величине вертикальные. «Горизонтальные напряжения в результате тектонических усилий могут быть равными или даже превосходить напряжения от веса налегающих горных пород» [113]. Это означает, что эллипс напряжений будет вытянутым в горизонтальном направлении. Многие авторы [3, 117, 121 и др.] отмечают, что горизонтальные тектонические напряжения в отличие от гравитационных имеют иные причины и механизмы возникновения. В связи с этим следует отметить, что по определению геотектоника изучает «структуру, движения, деформации и развитие земной коры в верхней мантии Земли в связи с развитием Земли в целом» [61].

Таким образом, в приведенной литературе среди других факторов авторами не рассматривается возможное влияние разнородно-

сти полей напряжений на результирующее напряженное состояние массива.

Между тем «история» образования неоднородных полей в горной породе в условиях гравитации, на что обращено внимание в работах второго блока, является фактором, накладывающим отпечаток на конечное состояние горной породы по различным параметрам (физический, химический, температурный, тектонический, механический и др.). В связи с этим механическое напряженное состояние среды можно интерпретировать как один из элементов памяти материала о своем прошлом. Отметим влияние лишь некоторых из огромного числа факторов, например давления, и последовательности образования горной породы на результирующее напряженное состояние. «Природная технология» образует и преобразует горную породу под действием сил гравитации в различных последовательностях, которые могут являться причинами возникновения неоднородных полей напряжений.

Наиболее наглядно это влияние может быть прослежено на примере образования осадочных (обломочных) пород, которые подвергаются цементации поровым цементом. Цементирующие вещества могут быть сингенетическими, т.е. накапливающимися одновременно с образованием осадка, и эпигенетическими [24]. Последовательность образования пород с эпигенетической цементацией характеризуется постепенным накоплением в течение длительного времени (геологических эпох) обломочного материала, который подвергался сжатию вышележащими слоями осадков с уплотнением элементов скелета и выжиманием жидкой фазы. Затем сжатая высоким давлением и деформированная среда омоноличивалась за счет твердения различных растворов, заполнявших поры [10, 24]. Таким образом, в процессе формирования горной породы по указанной схеме «нагружение скелета – омоноличивание образовавшейся структуры связующим раствором» разные элементы породы несут на себе разный уровень нагрузок. Описанной выше схеме «нагружение – омоноличивание» в определенной степени соответствует формирование и других видов горной породы (магматических, метаморфических) [24, 48].

Одно из первых исследований, посвященных вопросу возникновения неоднородности при метаморфизме горных пород, показало,

что неоднородность появляется в виде локальных зон напряжений, размещенных случайным образом в массиве, которые, по мнению автора, необходимо каким-то образом учитывать [120]. Однако если учесть постоянно происходящие различные геологические процессы в массиве (что позволяет не считать его «мертвым»), которые со временем могут привести к «диффузии» (передвижению) локальных неоднородных полей в смежные области, то с большой степенью вероятности можно утверждать, что произойдет образование совмещенных неоднородных полей напряжений.

Во втором типе предложений неоднородность как раз равномерно размещена по массиву, и она выражается в существовании одновременно совмещенных систем напряжений [21, 70]. Существование таких систем напряжений косвенно (феноменологически) подтверждается предложением учитывать так называемые *«горизонтальные составляющие объемных сил грунта»* [27], вступающие в работу в тех случаях, когда перемещение подземной конструкции направлены в сторону породного массива.

Однако в природе возникают и иные многочисленные условия образования осадочных горных пород (например, органических и химических), специфическая особенность которых состоит в том, что, будучи формально однородными в рассматриваемом объеме, они состоят по меньшей мере из двух совмещенных элементов с совершенно различными физико-механическими показателями. Это, в частности, каменный уголь, который является мощным аккумулятором углеводородных газов (млрд м<sup>3</sup>), причем их давление может достигать 19 МПа [38]. Такие среды обнаруживают особые физические свойства только при изменении внешнего давления: в силу разных деформационных характеристик элементов среды образуются внутренние биполярные напряжения при разгрузке.

Таким образом, в работах второго блока можно усмотреть общую идею образования в массиве в разных формах неоднородности напряженного состояния горной породы, благодаря чему в случае снятия сил гравитации порода приходит в самонапряженное состояние.

Одним из результатов фундаментальных исследований ряда научно-исследовательских институтов горного профиля стало установление характера развития деформационных процессов и знако-

переменных деформаций в толще пород [23] и их влияние на образование различных трещин, зон разгрузки и т.д., что можно интерпретировать как показатель приращений напряжений разных знаков.

В рамках рассматриваемой проблемы уместно отметить класс искусственных строительных конструкций и механизмов, основанных на использовании принудительного напряженного состояния на базе разнополярных усилий в этих конструкциях, что новым не является. Например, в мостовых заклепочных соединениях, при обжатии колесного центра стальными коваными кольцами – бандажами, преднапряженном бетоне и др. сохраняются остаточные напряжения разной полярности после разгрузки (при отсутствии внешних силовых воздействий). При этом напряжения определенной полярности сконцентрированы в отдельных локальных областях материала и не «растворены» одни в других [91], т.е. имеют место детерминированные участки разной полярности. О наличии участков с биполярными напряжениями в структурных блоках горных пород, по-видимому, как в элементах несущей строительной конструкции, являющейся частью вмещающего массива, отмечается и в [15].

Тем не менее, с принципиальной точки зрения, элементы, в которых заложенные стартовые условия практически не изменяются в период их эксплуатации, в случае разгрузки тем или иным способом возвращаются к начальному состоянию. По этой причине по существу, если использовать цикл разгрузки как критерий образования самонапряженного состояния, к подходам второго блока они не могут быть отнесены.

Однако, согласно этому критерию, можно привести другой пример определенной аналогии неоднородного напряженного состояния искусственного сооружения, например, с нагруженным несущим каркасом с последующим заполнением пространства между каркасом не несущими элементами, соединяемыми конструктивно с каркасом. Очевидно, что, во-первых, напряженное состояние нагруженного каркаса и второстепенных элементов будет разным. Во-вторых, если гипотетически представить себе разгрузку несущего каркаса (от сил гравитации), то в силу совместности деформаций второстепенные элементы при разгрузке придут в новое на-

пряженное состояние с появлением растягивающих напряжений и с возможным появлением дефектов и даже их разрушением.

В рамках первого блока вопросам оценки начального н.д.с. породного массива посвящены многочисленные исследования. Их укрупненно можно разделить по группам на теоретические, эмпирические и теоретико-эмпирические подобно тому, как это предложено в [23] при классификации методов расчета влияния горных работ на изменение н.д.с. вмещающих пород. Между теоретическими и эмпирическими методами четкой границы не существует: теоретические методы, как правило, базируются на результатах экспериментальных работ, обработка экспериментальных данных выполняется с привлечением математических методов. Полуэмпирические методы, с одной стороны, базируются на логических соображениях, с другой – на относительно строгих теоретических предпосылках [97].

Тем не менее указанный теоретический метод оценки напряжений в массиве является естественным общепринятым и его следует рассматривать в качестве первого приближения при определении величины начального напряженного состояния массива. Теоретическое определение начального поля напряжений применительно к будущим горным выработкам основано на использовании эмпирических данных о механических константах породы и теоретических предпосылках [11].

Теоретические методы оценки природного напряженного состояния породного массива первоначально рассматривались в трудах специалистов горного дела [27, 93 и др.]. Несколько позже этот вопрос изучался в «родственных» науках, связанных с сооружением подземных инженерных объектов (транспортные тоннели, объекты гидротехнического строительства, объекты оборонного значения и пр., фундаменты зданий и сооружений).

Достаточно четко просматривается динамика решения этой проблемы, состоящая в постепенном привлечении таких «точных» дисциплин, как механика сплошной среды (теория упругости, пластичности), механика грунтов, строительная механика подземных сооружений, вероятностные методы оценки результатов испытаний и пр.

Для описания физико-механических свойств горных пород обычно привлекаются и структурные (механические) модели [11,

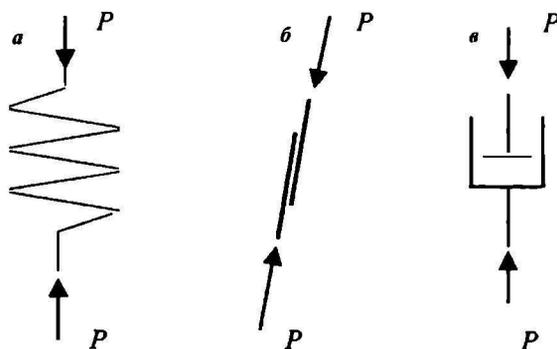


Рис. 1.5. Механические модели упругого (а), жесткопластического (б) и вязкого (в) элементов

19, 36, 74], «приводимые к соотношениям типа «напряжение – деформация» [100]. Они используются при исследовании напряженно-деформированного состояния различных материалов для наглядного и «понятного» слежения за зависимостями, отражающими связь между прикладываемыми усилиями (напряжениями) и регистрируемыми при этом деформациями. Модели составлены из простых элементов (упругий, жесткопластический и вязкий) (рис. 1.5), каждый из которых адекватно отражает те или иные физические свойства материалов.

Простейшим примером описания упругости горной породы является случай идеально упругого материала, у которого зависимость между усилиями (или их приращениями) и возникающими при этом деформациями является линейной, подчиняющейся закону Гука. Механическую модель такого материала принято представлять в виде упругой пружины [12, 23, 74], начальное состояние которой определено, как правило, отсутствием внешних нагрузок.

У других авторов [21, 70] применительно к горной породе, находящейся в начальном напряженном состоянии, этот элемент структурной модели, адекватно отражающий одномерную упругость материала, представлен в виде сжатой пружины (рис.1.5, а). Следует отметить, что впервые образное описание условий разгрузки «грунтовой массы» было приведено в [21]: «Если скелет освободится от бытовой нагрузки  $P_b$ , то он распрямится наподобие разгруженной пружины механической модели».

Для отражения поведения материала при пластических деформациях такой элемент модели изображается обычно в виде бруска, лежащего на шероховатой поверхности [11, 74], или площадки (рис. 1.5, б) с кулоновским трением (двух пластин) [36].

Следует отметить, что для описания изменения деформаций при нагружении во времени (ползучести) и при разгрузке с проявлением упругого последствия, когда зависимость не является линейной, в моделях используется вязкий элемент (Ньютона), который на схемах изображается поршнем с отверстиями, погруженным в цилиндр с вязкой жидкостью (рис. 1.5, в) [11, 36 и др.]. Свойство ползучести отражается обычно реологическими моделями, структурные схемы которых включают вязкий элемент.

Различные комбинации этих трех простых элементов в виде структурных моделей увеличивают возможности описания изучаемых явлений и н.д.с. горной породы при воздействии на нее усилий, приближая теоретические результаты к экспериментальным данным. В ряде работ, например [11], эти модели, представленные в виде набора механических элементов, называются структурными схемами, а в совокупности с сопутствующими функциональными зависимостями трактуются как модели. Наиболее используемыми моделями являются: упругие (линейно деформируемые), пластические и реологические.

В подавляющем большинстве случаев исследования, выполняемые для построения уравнения состояния реальной среды, как при прямых экспериментах на образцах, так и с использованием указанных моделей [12, 21, 36, 74], проводятся в режиме возрастающей нагрузки на породу.

Некоторые двух- и многоэлементные модели, характеризующиеся большим числом параметров, приведены на рис. 1.6. Подробный анализ моделей из других комбинаций простых элементов, отображающих процессы сдвиговой ползучести, переменной вязкости и прочие, приведен у С.С. Вялова [19].

Модели, состоящие из параллельно соединенных упругого и вязкого элементов (модели Кельвина – Фойгта, Гогенемзера – Прагера, Пойтинга – Томсона), отражают способность горных пород к упругому последствию [11].

Автор отмечает, что упругое последствие – это восстанавливающаяся деформация разгрузки, протекающая в течение некото-

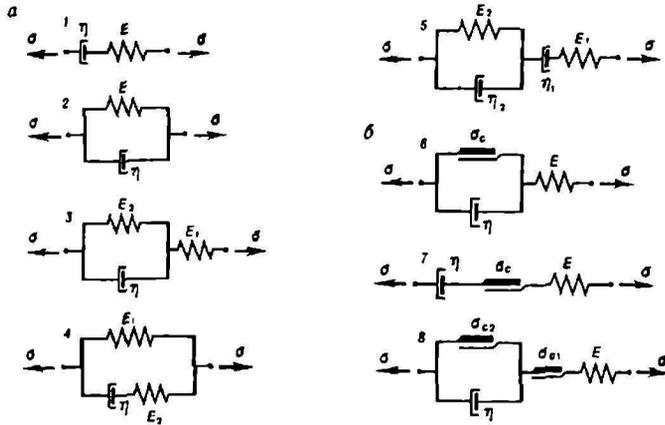


Рис. 1.6. Структурные модели, приведенные в [11], некоторых вязко-упругих (а) и вязко-упруго-пластичных (б) сред:  
 1 – Максвелла; 2 – Кельвина – Фойгта; 3 – Гогенемзера – Прагера; 4 – Пойтинга – Томсона; 5 – Бюргера; 6 – Шведова – Бингама; 7 – модель с последовательным расположением элементов; 8 – обобщенная модель с элементами кратковременной и длительной прочности

рого времени после снятия нагрузки. Если деформированную до уровня  $\epsilon = \epsilon_0$  модель Кельвина – Фойгта в момент времени  $t = 0$  разгрузить от действующих напряжений  $\sigma_{t=0} = 0$ , то решение уравнения состояния среды

$$\sigma = E\epsilon + \eta \frac{d\epsilon}{dt}, \quad (1.4)$$

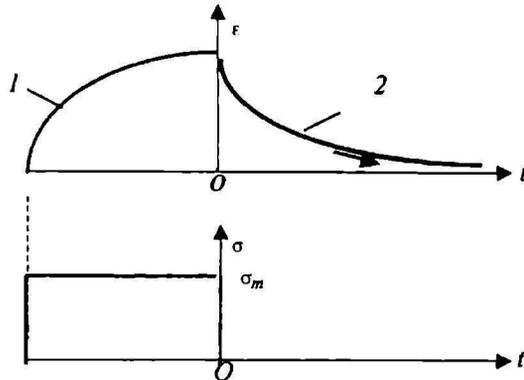
полученное путем суммирования упругой части, пропорциональной деформации, и вязкой части, пропорциональной скорости деформации, принимает следующий вид:

$$\epsilon = \epsilon_0 \exp\left(-\frac{E}{\eta} t\right), \quad (1.5)$$

где  $\eta$  – коэффициент динамической вязкости;  $t$  – время.

На рис. 1.7 приведена графическая интерпретация уравнения (1.5), заимствованная из работы [11]. Цифрой 1 обозначена кривая ползучести при нагружении постоянной нагрузкой, 2 – деформация упругого последствия. Как видно из графика и уравнения (1.5), она асимптотически стремится к нулю.

Рис. 1.7. Графическая интерпретация модели Кельвина – Фойгта



В работе [74] также отмечается об исчезновении остаточной деформации в аналогичных моделях после разгрузки: «в моделях же Фойгта и Пойтинга – Томсона полученная деформация исчезает после снятия нагрузки при  $t = \infty$  независимо от величины нагрузки. Таким образом, эти модели, удовлетворительно описывая поведение реальной среды при нагрузке, становятся непригодными для описания разгрузки». Интерпретируя это заключение, можно сделать обоснованный вывод о пригодности известных комбинаций простых элементов, в том числе и рассмотренных в работе [11], для адекватного описания процессов, происходящих в среде, при приложении внешних нагрузок одной полярности.

В некоторых работах последнего времени предложена так называемая упруго-вязко-пластично-хрупкая модель грунта [43], которая, по утверждению авторов этой разработки, при определенном подборе констант может отразить практически любые среды (грунтовая масса, порода, бетон и др.) за счет введения в модель хрупкого элемента. Несмотря на относительную оригинальность этой модели, в работе отсутствуют уточнение способов определения механических свойств этого элемента в лабораторных или полевых условиях, методов исследований, критерия хрупкости и других параметров модели. Поэтому в настоящее время трудно оценить возможные достоинства этой модели по сравнению с традиционными.

Однако, несмотря на большое число разработанных механических моделей в виде различных комбинаций элементов, они не могут отразить некоторые физические процессы, наблюдаемые при

экспериментальных исследованиях образцов горной породы. К ним можно отнести, например, изменение прочностных и деформационных свойств материала после разгрузки [55, 78, 99 и др.], появление наведенной анизотропии в образцах, извлекаемых с больших глубин [20, 15, 59] и др.

Следует отметить, что, помимо структурных, существуют модели массивов или контактные модели.

В работе [31] систематизированы и *«модели дискретных сред с точки зрения их приложения к изучению физико-механических процессов, происходящих в горном массиве»*. В качестве моделей рассматриваются регулярно упакованные цилиндры, шары, прямоугольные блоки, комбинации частиц различного размера и др., т.е. массив представляется в виде совокупности отдельных частиц. Авторы считают, что дискретные среды воспринимают внешние сжимающие воздействия, но практически не воспринимают растягивающих усилий. Некоторые модели, например с регулярно упакованными дисками, рассматриваются как статически неопределимые системы, однако без какого-либо анализа влияния этой статической неопределимости на н.д.с. при изменении знака нагружения.

По характеру передачи усилий дискретные среды разделены на две группы: распорные и безраспорные. В каждой частице первой группы от внешних воздействий возникают горизонтальные составляющие усилий. В безраспорной среде под влиянием собственного веса каждая частица передает нижележащим только вертикальные усилия. В дискретной среде под понятием «напряжение» *«понимается усредненное усилие на отдельные частицы, отнесенное к площади этих частиц»* [31]. Такой подход следует считать приближенным, сделанным без рассмотрения фактической картины распределения контактных площадей в рассматриваемом объеме среды.

В работе [100] выполнен обзор разнообразных моделей грунтов, отражающих различные аспекты его поведения под воздействием нагрузок, среди которых автор выделяет класс многоповерхностных моделей, основанных на концепции критического состояния (КС). Объединение микро- и макроструктурного подходов дает возможность описания наведенной анизотропии грунта, возникающей в ходе его пластического деформирования. Причиной наве-

денной анизотропии, как и образования при циклическом нагружении петель гистерезиса, является проскальзывание частиц грунта по контакту друг с другом, т.е. необратимой (пластической) деформацией. Одним из интересных выводов является утверждение о том, что *«после ряда нагружений и разгрузок на контактах остаются напряжения»*, однако без объяснения причин их возникновения. Этот результат позволяет данные работы отнести к работам второго блока.

Помимо рассмотренных предложений разработаны и нашли практическое применение при проектировании подземных объектов методы вариантов, аналитический (математического моделирования), графический, графоаналитический, логических инженерных решений, аналогий, интерполяций, натурного моделирования и многие другие [23]. Выбор технологических параметров в стадии проектирования сооружений без учета геомеханического состояния массива и происходящих в нем под влиянием горных работ деформационных процессов неизбежно ведет не только к ошибкам, но нередко и крупным авариям. Поэтому для ускорения получения характеристик горного массива и углубленного изучения их зависимостей от главных влияющих факторов, необходимых для корректировки параметров горных работ, разработан новый метод исследований, базирующийся на аналитико-экспериментальных способах оценки состояния массива [35]. Согласно ему описание характера деформирования толщи пород производится с помощью уравнений механики сплошной среды, а входящие в эти уравнения коэффициенты принимаются по результатам натурных наблюдений.

Перспективными экспериментальными способами оценки фактического напряженно-деформированного состояния породного массива являются геофизические (ИК, радиоизотопный, сейсмический, акустический, электроразведки и др.) [13, 16, 69, 71], основанные на регистрации расшифровки сигналов отражения от различных геобразований по выбранным информативным параметрам. К преимуществам геофизических методов можно отнести высокую оперативность, возможность проведения измерений на большой базе в течение длительного времени, автоматизацию процессов измерений и обработки полученных результатов и др. Метод акустической эмиссии (АЭ) [115] обладает высокой чувстви-

тельностью при регистрации образований микродефектов, возникающих в цикле разгрузки. Широкое применение получили сейсмоакустический метод [14], деформационный [16], сейсмический [17], инфракрасной радиометрии [65] и целый ряд других методов.

Использование современных геофизических методов исследования позволяет провести оценку н.д.с. и сыпучей среды. В частности, при быстрой разгрузке несвязного (зернистого) грунта в течение некоторого времени он излучает энергию в ИК-диапазоне [65]. Автор объясняет это явление взаимодействием главных напряжений в грунте, а именно падение напряжений вызывает отрицательное приращение плотности потока ИК-излучения, вызванное изменением суммы главных нормальных напряжений.

Применение геофизических и неразрушающих методов для изучения свойств пород основано на зависимостях между основными физическими и механическими свойствами, определяющими состояние массива, и характеристиками физических полей (электрического, магнитного, электромагнитного, акустического, теплового, поля радиоактивных излучений).

Использование геофизических методов для определения обобщенных характеристик массива [119], вмещающего подземные выработки, имеет в геомеханике ряд преимуществ по сравнению с численными методами из-за проблемы, связанной с адекватным описанием природных условий.

С этой точки зрения описание деформационных характеристик породного массива геофизическими методами можно рассматривать как интегральный (обобщенный) способ, имеющий преимущество по объему общей информации перед традиционными, при расчете протяженных подземных сооружений. К другим достоинствам относится значительно больший объем исследуемого материала по сравнению с объемом отобранных образцов и монолитов, возможность проведения многократных измерений характеристик, а также в ряде случаев и большая разрешающая способность геофизических и неразрушающих методов, что позволяет фиксировать изменение характеристик пород в локальных областях.

Одновременно следует отметить, что в целом разрешающая способность геофизических методов не обеспечивает детального описания породного массива в требуемом диапазоне глубин. Тем

не менее, по-видимому, оптимальным является подход, основанный на сочетании геофизических методов с традиционными способами инженерной геологической разведки.

Еще одним недостатком геофизических методов, которыми исследуются большие объемы грунтов или пород, в настоящее время является слабое метрологическое обеспечение, которое необходимо разработать с использованием статистических методов анализа результатов, а также, возможно, на основе комплексных или нормированных показателей свойств и соответствующих им результатов измерений. Поэтому с помощью большинства геофизических методов в геотехнике можно получить в основном только качественную картину о свойствах пород с выявлением общей, интегральной схемы распределения свойств. Таким образом, геофизические методы и соответствующая аппаратура не дают ответа на вопрос оценки начального напряженного состояния массива.

К другим экспериментальным методам исследования начального поля напряжений породного массива относится метод разгрузки [40 и др.], который подробно будет рассмотрен ниже.

Одним из основных экспериментальных способов определения модуля деформации и других характеристик нескальных грунтов является метод нагружения штампов в полевых условиях [22].

Из-за большой трудоемкости объем этих испытаний незначительный, и результат каждого из них носит случайный характер. Тем не менее этот подход рекомендуется к использованию в нормативных документах [64] и, как правило, корректируется на основании накопленных опытных данных об осадках искусственных сооружений в различных инженерно-геологических условиях с соответствующими штамповыми испытаниями. Необходимость этой корректировки заключается в том, что фактические свойства грунтового массива в пределах глубины «активной» зоны определяются размерами реального сооружения. При штамповых испытаниях глубина «активной» зоны соизмерима с диаметром штампа, и, следовательно, физико-механические особенности грунта, расположенного за пределами этой области, оказываются неучетными.

Позднее получил обоснование и развитие как для нескальных, так и скальных пород прессиометрический метод [76], который в

отличие от штамповых испытаний дает возможность найти распределение модулей деформации по глубине породного массива под искусственным сооружением. Метод основан на создании внутреннего радиального давления на стенки скважины (т.е. в цикле нагружения) с помощью зонда в условиях плоской деформации, и на основании измеренных радиальных приращений перемещений стенок скважины и приращений давлений вычисляется модуль деформации горной породы непосредственно в массиве.

Использование эмпирических (экспериментальных) методов описания напряженно-деформированного состояния породного массива имеет свою предысторию. Она состоит в том, что разработанные в смежных науках (сопротивление материалов, строительная механика и т.д.) способы оценки н.д.с. искусственных материалов в значительной степени механически (т.е. поверхностно) переносились на решение задач горной тематики. Эти экспериментальные методы при исследовании н.д.с. искусственных сооружений базировались на определенных предпосылках. Одна из них состояла в том, что н.д.с. конструкции формируется в процессе ее нагружения (т.е. в цикле нагрузки), причем, как правило, известными усилиями в предположении, что до этого нагружения конструкция находилась в ненапряженном состоянии (на этом базируются основные теоремы строительной механики).

Принципиальным отличием задач горного дела является то, что породный массив находится уже в каком-то (как правило, неизвестном) начальном напряженно-деформированном состоянии [12], которое в простейшем случае определяется весом напластований вышележащих горных пород. **Любое вторжение в него** (проходка выработок, бурение скважин, извлечение образцов и т.д.) **приводит к изменению н.д.с.** определенной области вокруг очага вторжения (принцип Сен-Венана) и в извлекаемых для изучения образцах горной породы.

Проблема описания природного (in situ) напряженного состояния породного массива усложняется отсутствием точных (численных) физико-механических параметров, большой неоднородностью (даже в пределах одного пласта), используемой технологией «вторжения» и другими факторами, что предъявляет повышенные требования к объему выборки извлеченных для исследования образцов,