

УДК 622.272:622.83
ББК 33.1
К14

Книга соответствует «Гигиеническим требованиям к изданиям книжным для взрослых» СанПиН 1.2.1253–03, утвержденным Главным государственным санитарным врачом России 30 марта 2003 г. (ОСТ 29.124–94). Санитарно-эпидемиологическое заключение Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека № 77.99.60.953.Д.014367.12.11

Экспертиза проведена Учебно-методическим объединением высших учебных заведений Российской Федерации по образованию в области горного дела (письмо № 51-16/135 от 30 июня 2011 г.)

Рецензенты:

- д-р техн. наук, проф. *Г.А. Катков* (Московский государственный открытый университет);
- *М.Э. Денисов*, заместитель главного инженера ФГУП «Государственный научно-исследовательский, проектный и конструкторский институт горного дела и металлургии цветных металлов» (Гипроцветмет)

Казикаев Д.М., Савич Г.В.

К14 Практический курс геомеханики подземной и комбинированной разработки руд: Учебное пособие. — М.: Издательство «Горная книга», 2012. — 224 с.: ил. (Горное образование)

ISBN 978-5-98672-277-1 (в пер.)

Рассмотрены наиболее характерные задачи геомеханики подземной и комбинированной разработки рудных месторождений. В каждой главе изложена методика решения одной или нескольких однотипных задач, а также содержится информация об их месте и значимости в общем процессе освоения рудного месторождения.

Д.М. Казикаев — д-р техн. наук, профессор кафедры «Технология подземной разработки рудных и нерудных месторождений» Московского государственного горного университета, *Г.В. Савич* — старший преподаватель этой же кафедры.

Для студентов вузов, обучающихся по специальности «Подземная разработка месторождений полезных ископаемых» направления подготовки «Горное дело».

ISBN 978-5-98672-277-1

УДК 622.272:622.83

ББК 33.1



9 785986 722771

© Д.М. Казикаев, Г.В. Савич, 2012
© Издательство «Горная книга», 2012
© Дизайн книги. Издательство
«Горная книга», 2012

ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящем учебном пособии изложено решение отдельных, наиболее часто встречающихся практических задач по геомеханике подземной и комбинированной разработки рудных месторождений.

При изложении материала авторы руководствовались структурой и содержанием дисциплины, утвержденных в учебном плане и рабочих программах и отраженных в учебнике [1].

Разумеется, в рамках учебного пособия невозможно охватить все многообразие геомеханических задач, возникающих при подземной и комбинированной разработке. Это невозможно, да в этом и нет необходимости.

Здесь приводятся методики и анализ результатов решения наиболее характерных задач, указывается их место в технологических процессах, акцентируется внимание на правильности интерпретации полученных результатов.

Обращается также внимание на необходимость критического отношения к исходным данным, анализу их надежности и происхождения.

Особое место в книге отведено выбору методов исследований и решения задач.

Показано, что геомеханические задачи могут решаться различными методами, выбор которых зависит от цели, с которой выполняется эта работа, от степени научной изученности процесса, отражением которого является решаемая задача, от профессиональной подготовленности исполнителя, наличия технических средств выполнения работы и т.д.

Для того чтобы продемонстрировать вышеизложенное, авторы учебного пособия для решения выбранного набора задач использовали различные методы, начиная от простейших до более сложных, включая геомеханическое компьютерное моделирование.

Такой подход способствует формированию у обучающихся представления о сущности методов решения задач прикладной

горной геомеханики, а также может помочь им при выборе их в соответствии с вышеуказанными целями.

Значительная часть задач, представленных в настоящем учебном пособии, прошла апробацию при выполнении практических заданий студентами горных вузов. Некоторые из этих задач включены в «Методические указания к практическим занятиям по геомеханике» [14], составленным и изданным авторами в 2000 г.

Методики решения некоторых задач, включенных в настоящую книгу, использованы студентами в качестве специальной части дипломных проектов применительно к условиям различных конкретных рудных месторождений.

Часть работ (отмечено в тексте) выполнялась совместно с аспирантами М.Ю. Хобтой, А.А. Девятенем, Й. Рахимовым и включена ими в свои кандидатские диссертации.

Материалы отдельных разделов (13.2, 14, 20) подготовлены на основании результатов совместных исследований с С.Н. Журиным и С.В. Сергеевым и также отражены в их докторских диссертациях.

ВВЕДЕНИЕ

Геомеханика — наука сложная, комплексная. Здесь используются и сочетаются методы механики твердого тела, жидкости и газа, с одной стороны, и методы наук горно-геологического цикла — с другой.

Особенностью деформационно-прочностных характеристик горных пород является связь и зависимость их от истории формирования и развития массивов в земной коре.

В связи с этим заметим, например, что никому не придет в голову поинтересоваться историей развития химии вообще и химии полимеров в частности в связи с изучением технологических и потребительских качеств определенных пластмасс.

То же самое можно сказать и о других направлениях человеческой деятельности. И их большинство.

Однако есть такие (их немного), где свойства изучаемого объекта являются прямым следствием его истории. Прежде всего это относится к массивам горных пород как участков земной коры, история становления и формирование которой наполнена многочисленными динамическими, термическими, физико-химическими событиями, каждое из которых оставляло след в этих породах. Причем он отличался от таковых в различных точках массивов пород.

В результате сформировались массивы горных пород, которые характеризуются присущим им естественным напряженным состоянием, структурной и литологической неоднородностью, анизотропией свойств и т.п.

Имея такой объект исследований, при решении геомеханических задач нельзя не учитывать историю его «жизни».

Между тем геомеханике, как и любой науке, присуще стремление к обобщению свойств и состояния различных массивов пород и на этой основе — к разработке также обобщенных закономерностей их напряженно-деформированного состояния, условий прочности.

Такая тенденция характерна практически для всех естественных наук, ибо является необходимым условием их развития, дает возможность разрабатывать расчетные методы решения практических задач, способствует прогнозированию изучаемых процессов.

Следует вместе с тем подчеркнуть, что земная кора и ее участки в пределах шахтных полей предстают как неповторимые, т.е. единственные в своем роде массивы твердого тела.

Это обстоятельство требует от исследователей и специалистов полного изучения состояния и свойств массивов пород на каждом конкретном объекте (руднике, карьере и др.). Проанализировав полученную информацию и сопоставив ее с существующими гипотезами интересующих процессов, можно сформировать ее геомеханическую модель, адекватно отражающую конкретные условия.

1 ЕСТЕСТВЕННОЕ НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ МАССИВОВ ГОРНЫХ ПОРОД

1.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Естественным называют напряженное состояние массива горных пород, возникшее в нем под воздействием совокупности внутренних и внешних факторов в земной коре с начала ее формирования и на протяжении всего геологического времени развития.

В числе указанных факторов в данном случае не рассматриваются антропогенные.

Естественное напряженное состояние является, таким образом, интегральным результатом всей совокупности силовых воздействий на массив горных пород, а его качественные и количественные показатели характеризуют начальное поле напряжений при решении задач горной геомеханики.

Наиболее значимыми с точки зрения горной геомеханики силовыми факторами, сформировавшими естественные поля напряжений, являются *гравитационные, гидростатические и тектонические усилия*.

1.1.1. Гравитационные напряжения

Гравитационные напряжения обусловлены гравитационным силовым полем, векторы которого направлены по отвесной линии к центру Земли.

Для количественной оценки параметров гравитационного поля в массиве горных пород используют гипотезу проф. А.Н. Динника или проф. А. Гейма.

Согласно первой вертикальные напряжения в точке массива σ_z пропорциональны ее глубине от земной поверхности H (рис. 1.1):

$$\sigma_z = \gamma H, \text{ т/м}^2, \quad (1.1)$$

где γ — средняя плотность толщи пород над точкой, т/м^3 .

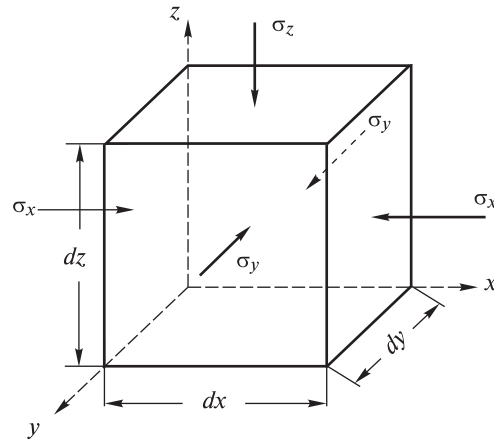


Рис. 1.1. Элементарный кубик в поле гравитационных напряжений

Горизонтальные составляющие гравитационных напряжений σ_x и σ_y равны соответственно

$$\sigma_x = \xi_x \sigma_z = \xi_x \gamma H; \quad \sigma_y = \xi_y \sigma_z = \xi_y \gamma H, \quad (1.2)$$

где ξ_x и ξ_y — коэффициенты бокового отпора пород в направлениях осей x и y соответственно.

Значения указанных коэффициентов можно вычислить по формулам:

$$\left. \begin{aligned} \xi_x &= \frac{\mu_x}{1 - \mu_x}; \\ \xi_y &= \frac{\mu_y}{1 - \mu_y}, \end{aligned} \right\} \quad (1.3)$$

где μ_x и μ_y — коэффициенты поперечных деформаций (Пуассона) вдоль направлений x и y соответственно.

Во многих случаях при решении геомеханических задач правильным является допущение $\xi_x = \xi_y = \xi$. Тогда согласно (1.2)

$$\sigma_x = \sigma_y = \xi \sigma_z.$$

На практике при анализе напряжений в точке принимают, что $\mu_x = \mu_y$ и соответственно $\xi_x = \xi_y$.

Однако если рассматривается напряженное состояние литологически сложного участка пород (например слоистого), то при расчетах принимают соответствующие им значения μ и ξ .

Согласно гипотезе А. Гейма, гравитационные напряжения в массивах горных пород распределены по гидростатическому закону:

$$\sigma_z = \sigma_x = \sigma_y, \quad (1.4)$$

где величину σ_z можно вычислить по приведенной выше зависимости (1.1).

В практической геомеханике гипотеза А.Н. Динника используется для анализа напряжений в скальных и полускальных массивах пород, деформации которых можно считать упругими, а гипотеза А. Гейма — в породах, где деформации отличаются от упругих.

Следует заметить, что само по себе гравитационное силовое поле в пространстве, соизмеримом с размерами шахтного поля, по природе своей довольно однородно.

Однако выполненные нами, а также другими исследователями непосредственные измерения напряженного состояния массивов пород показывают, что вертикальная составляющая гравитационного поля значительно изменяется в пределах рудника.

На рис. 1.2 приведено распределение усредненных измеренных значений вертикальных напряжений на участке шахтного поля рудника им. Губкина, разрабатывающего Коробковское месторождение железистых кварцитов КМА, приуроченное к крутопадающему крылу антиклинальной складки.

Из эпюры видно, что вертикальные гравитационные напряжения по горизонтальной площади залежи распределены неравномерно. Величины их на глубине 370 м в пределах массива железистых кварцитов составляют в среднем 7–8 МПа, в массиве окремненных сланцев — 2,9 МПа и в приконтактных зонах — 5,2 МПа.

Таким образом, давление от массы вышележащих пород перераспределяется пропорционально жесткости массивов.

Причем, как видно из приведенных данных, разница в величинах напряжений довольно значима и не учитывать ее при расчетах было бы ошибочным.

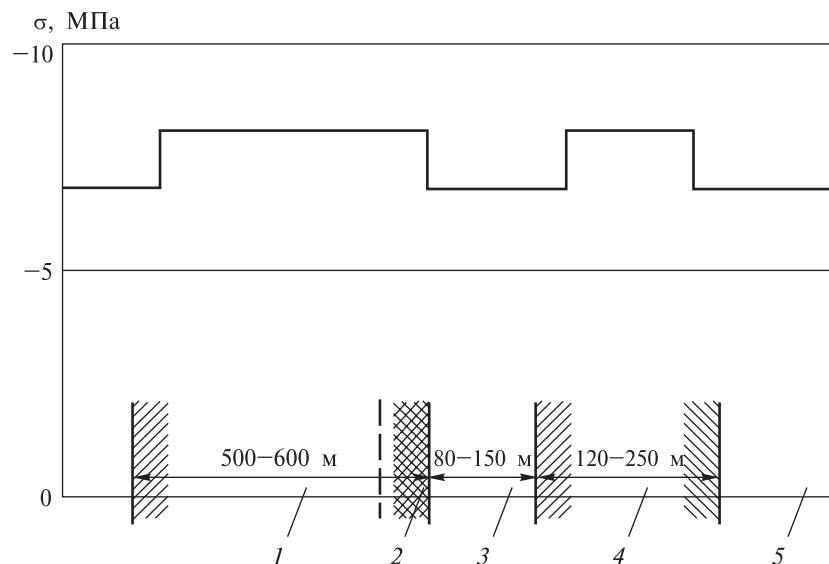


Рис. 1.2. Распределение эпюр вертикальных напряжений σ в массиве:
1 и 4 — железистые кварциты; 2 — приконтактная зона; 3 и 5 — сланцы

1.1.2. Гидрогеомеханические напряжения

Выделение этой составляющей естественных напряжений вызвано необходимостью учета гидростатических усилий при оценке напряженного состояния массива, обусловленных воздействием свободной (гравитационной) или поровой жидкости в горных породах.

Вследствие отмеченного выше, в массиве возникают напряжения, обусловленные массой столба жидкости, взвешивающим эффектом жидкости и поровым давлением.

Исходя из этого, целесообразно с помощью расчетов определять напряженное состояние массива пород, вызванное совместным гравитационным и гидростатическим воздействием σ^{Γ} . Тогда полное вертикальное напряжение, обусловленное отмеченными факторами, находится по зависимости (рис. 1.3)

$$\sigma_z^{\Gamma} = \sigma_3 + \sigma_H, \quad (1.5)$$

где σ_3 — исходное эффективное напряжение, численно равное реакции скелета пород на горизонтальной площадке, МПа;

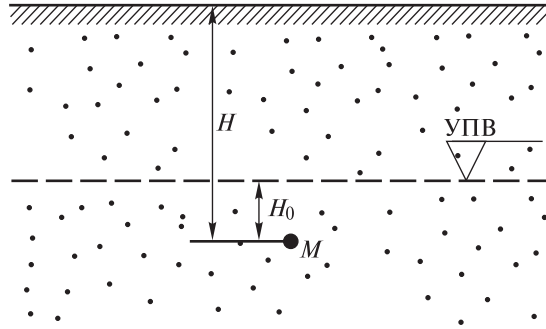


Рис. 1.3. Схема к расчету напряжений в однородном водоносном массиве

σ_n — исходное нейтральное давление жидкости, под которым в общем случае понимается как гидростатическое давление на рассматриваемой площадке, так и внутрипоровое, МПа.

Эффективное напряжение может быть определено по выражению

$$\sigma_{\varepsilon} = \gamma_w H_0 + \gamma(H - H_0), \quad (1.6)$$

где γ_w — средняя плотность пород над точкой, находящейся ниже начального уровня подземных вод H_0 ; H — общая глубина расположения точки; γ — средняя плотность пород выше уровня подземных вод;

$$\gamma_w = (\Delta - \gamma_b)(1 - n), \quad (1.7)$$

где Δ — удельная масса пород; γ_b — плотность жидкости; n — пористость пород.

Нейтральное давление жидкости

$$\sigma_n = \gamma_b H_0. \quad (1.8)$$

Таким образом, вертикальная составляющая суммарных гравитационного и гидростатического полей напряжений

$$\sigma_z^{\Gamma} = \gamma H + [(\Delta - 1)(1 - n) + \gamma_b - \gamma] H. \quad (1.9)$$

Полагая, что $\sigma_z^{\Gamma} = \sigma_y^{\Gamma}$, получим

$$\sigma_x^{\Gamma} = \sigma_y^{\Gamma} = \xi \sigma_z^{\Gamma}. \quad (1.10)$$

В слоистом массиве пород, включающем в себя и водоносный и водоупорный пласты, рассуждая аналогичным предыдущему

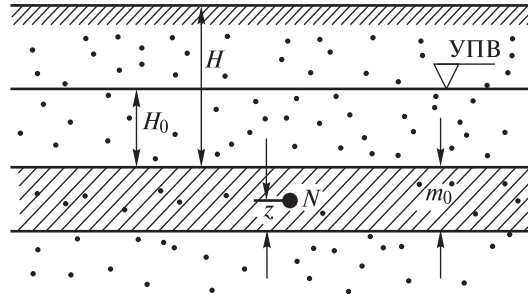


Рис. 1.4. Схема к расчету начальных напряжений в слоистом массиве

образом, получаем вертикальную составляющую $\sigma_z^{\text{гг}}$ в точке N (рис. 1.4) в виде

$$\sigma_z^{\text{гг}} = \gamma_0(m_0 - z) + \gamma H - \gamma_v(m_0 - z) \left(\frac{H_0}{m_0} - 1 \right) + \gamma_v, \quad (1.11)$$

где γ_0 — плотность пород водоупорного пласта; m_0 — мощность водоупорного пласта; H_0 — гидростатическое давление в кровле водоупорного пласта; z — расстояние от точки N до напорного водоносного пласта; γ — средняя плотность пород выше кровли водоупорного пласта; γ_v — плотность жидкости.

Две другие составляющие при условии, что $\sigma_z^{\text{гг}} = \sigma_y^{\text{гг}} = \xi \sigma_z^{\text{гг}}$, получаем в виде

$$\sigma_x^{\text{гг}} = \sigma_y^{\text{гг}} = \xi [\gamma_0(m_0 - z) + \gamma H - \gamma_v(m_0 - z) \left(\frac{H_0}{m_0} - 1 \right) + \gamma_v H_0], \quad (1.12)$$

где ξ — коэффициент бокового отпора породы, в которой расположена точка N .

1.1.3. Тектоническая составляющая

Тектоническую составляющую с достаточной для горно-инженерных расчетов точностью аналитическими методами получить пока не удалось. Причина тому — природа тектонических напряжений, являющихся следствием силового взаимодействия движущихся глыб (плит) земной коры.

Поэтому единственным доступным сейчас методом для определения параметров тектонических напряжений является непосредственное их измерение.

Таким образом, располагая данными о параметрах естественного (интегрального) поля напряжений, полученными путем непосредственных измерений, можно оценить тектонические напряжения, например, по следующей схеме.

Для того чтобы более четко проследить логику рассуждений, упростим для начала задачу, предположив, что направления составляющих действующих напряжений совпадают с направлениями главных нормальных напряжений.

Тогда можно записать:

$$\sigma_i^T = \sigma_i^0 - \sigma_i^r - \sigma_i^{rc} \quad \text{или} \quad \sigma_i^T = \sigma_i^0 - \sigma_i^{rT}, \quad (1.13)$$

где σ_i^0 , σ_i^r , σ_i^{rc} , σ_i^{rT} и σ_i^T — нормальные составляющие естественного (измеренного), гравитационного, гидростатического, совместного гравитационно-гидростатического, тектонического полей напряжений вдоль оси i в рассматриваемой точке массива пород соответственно.

Обычно при измерениях оси координат направляют вертикально и горизонтально, в результате чего они совпадают с главными осями гравитационного и гидростатического напряжений.

Измерения показали, что в большинстве случаев главные оси тектонических напряжений также имеют направления, близкие к вертикальным и горизонтальным.

1.1.4. Интегральное поле напряжений в нетронутом массиве

Главные напряжения естественного поля можно записать в виде

$$\left. \begin{aligned} \sigma_3 &= \sigma_3^r + \sigma_3^{rc} + \sigma_3^T; \\ \sigma_2 &= \sigma_2^r + \sigma_2^{rc} + \sigma_2^T; \\ \sigma_1 &= \sigma_1^r + \sigma_1^{rc} + \sigma_1^T. \end{aligned} \right\} \quad (1.14)$$

Тогда уравнения (1.14) с учетом зависимостей (1.8) и (1.9) будут иметь следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_3^0 &= \bar{\sigma}_3^T + (\gamma + \nabla \sigma_3^T)H + H_0(\gamma_w - \gamma + \gamma_B); \\ \sigma_2^0 &= \bar{\sigma}_2^T + (\xi\gamma + \nabla \sigma_2^T)H + \xi_w H_0(\gamma_w - \gamma + \gamma_B); \\ \sigma_1^0 &= \bar{\sigma}_1^T + (\xi\gamma + \nabla \sigma_1^T)H + \xi_w H_0(\gamma_w - \gamma + \gamma_B), \end{aligned} \right\} \quad (1.15)$$

где $\bar{\sigma}_1^T, \bar{\sigma}_2^T, \bar{\sigma}_3^T$ — главные тектонические напряжения на некотором «базовом» горизонте; $\nabla\sigma_1^T, \nabla\sigma_2^T, \nabla\sigma_3^T$ — градиенты главных тектонических напряжений при изменении глубины; ξ, ξ_w — коэффициенты бокового отпора необводненных и обводненных пород соответственно.

Для слоистого обводненного массива также можно по аналогии с (1.15) записать уравнение (1.14) с учетом зависимостей (1.11) и (1.12).

В массивах скальных необводненных пород, когда гидростатические усилия отсутствуют, уравнения (1.15) принимают вид

$$\left. \begin{aligned} \sigma_3 &= \bar{\sigma}_3^T + (\gamma + \nabla\sigma_3^T)H; \\ \sigma_2 &= \bar{\sigma}_3^T + (\xi\gamma + \nabla\sigma_3^T)H; \\ \sigma_1 &= \bar{\sigma}_3^T + (\xi\gamma + \nabla\sigma_3^T)H. \end{aligned} \right\} \quad (1.16)$$

При использовании уравнений (1.15) и (1.16) следует помнить о специфике тектонических полей напряжений, выражающейся в отсутствии линейной связи между компонентами (главными напряжениями) тектонических напряжений, между градиентами нормальных напряжений $\nabla\sigma_i^T$ и в отсутствии единой закономерности изменений $\sigma_i^T = f(H)$ для всех трех компонент.

Например, наши исследования тектонических напряжений в скальных породах в бассейне Курской магнитной аномалии показали, что градиенты изменения компонент нормальных напряжений с глубиной составляют:

$$\left. \begin{aligned} \nabla\sigma_3^T &\text{ соответствует } \nabla\sigma_3^T; \\ \nabla\sigma_2^T &= 2,2\nabla\sigma_2^T, \nabla\sigma_1^T = 1,6\nabla\sigma_1^T. \end{aligned} \right\} \quad (1.17)$$

Приведенные зависимости получены в предположении, что направления составляющих действующих напряжений совпадают с направлениями главных нормальных напряжений.

Однако в действительности это условие не выполняется, так как направление векторов, составляющих начальное поле напряжений, может существенно отличаться (рис. 1.5).

Величину и направление действия суммарного вектора напряжений для плоской задачи можно найти следующим образом:

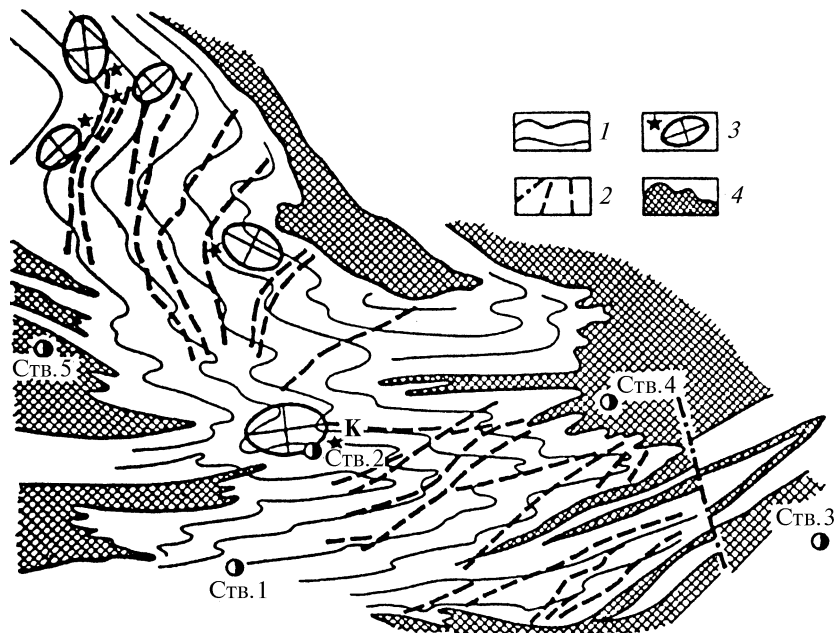


Рис. 1.5. Коробковское месторождение КМА:

1 — напластование пород; 2 — разрывные нарушения; 3 — точки измерения напряжений и ориентировка эллипсоида; 4 — контакты кварцитов со сланцами

$$\sigma^2 = (\sigma_{\Gamma} \cos \alpha_{\Gamma} + \sigma_{\Gamma} \cos \alpha_{\Gamma} + \sigma_{\Gamma} \cos \alpha_{\Gamma})^2 + (\sigma_{\Gamma} \sin \alpha_{\Gamma} + \sigma_{\Gamma} \sin \alpha_{\Gamma} + \sigma_{\Gamma} \sin \alpha_{\Gamma})^2, \quad (1.18)$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\sigma_{\Gamma} \sin \alpha_{\Gamma} + \sigma_{\Gamma} \sin \alpha_{\Gamma} + \sigma_{\Gamma} \sin \alpha_{\Gamma}}{\sigma_{\Gamma} \cos \alpha_{\Gamma} + \sigma_{\Gamma} \cos \alpha_{\Gamma} + \sigma_{\Gamma} \cos \alpha_{\Gamma}}, \quad (1.19)$$

где $\sigma_{\Gamma}, \sigma_{\Gamma}, \sigma_{\Gamma}$ — соответственно модули векторов гравитационного, тектонического и гидростатического напряжений, МПа; $\alpha_{\Gamma}, \alpha_{\Gamma}, \alpha_{\Gamma}$ — соответственно углы между горизонтальной осью и направлением действия векторов $\sigma_{\Gamma}, \sigma_{\Gamma}$ и σ_{Γ} , градус.

1.2. ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Для примера решения задачи выбраны условия, аналогичные массиву пород железорудного Коробковского месторождения (КМА). Предположим, что интересующая нас точка K расположена рядом с шахтным стволом 2 (помечена звездочкой) в

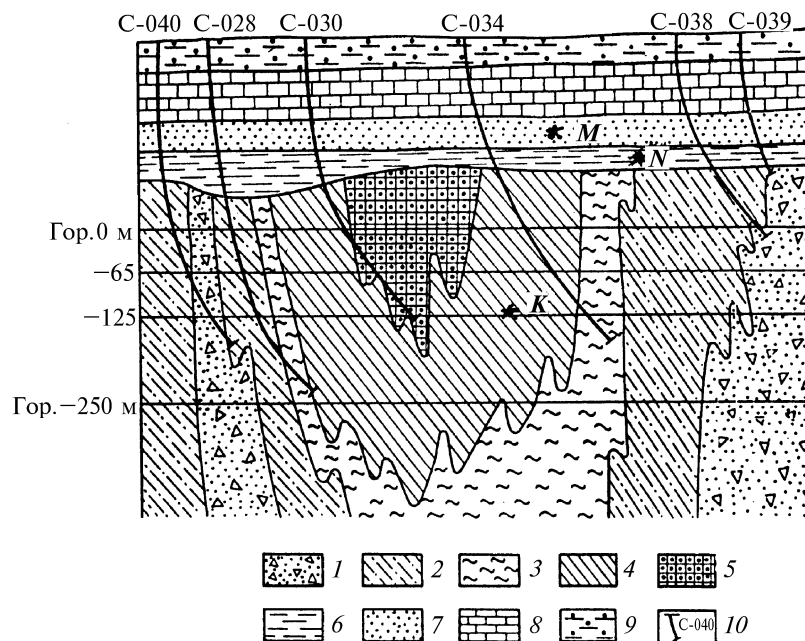


Рис. 1.6. Геологический разрез Коробковского месторождения:

1 — слаборудные и безрудные кварциты; 2 — силикатно-магнетитовые, магнетитовые кварциты; 3 — сланцы; 4 — железно-сланцево-магнетитовые кварциты; 5 — карбонат-магнетитовые, магнетитовые кварциты; 6 — юрские глины; 7 — сеноман-альбский песок; 8 — мел; 9 — суглинки; 10 — разведочная скважина

срединной части массива железистых кварцитов (см. рис. 1.5), а точка *M* — в пласте сеноман-альбских песков (рис. 1.6).

Задача формулируется следующим образом: определить параметры естественного напряженного состояния массива пород в точках *M*, *N* и *K*.

1.2.1. Определение гравитационных напряжений в слоистой неоднородной среде (т. *M*)

Исходные данные для решения задачи приведены в табл. 1.1.

В слоистой среде вертикальные напряжения формируются под воздействием массы налегающих пород (см. рис. 1.6):

$$\sigma_z = \gamma H, \quad (1.20)$$

где γ — плотность пород, т/м³; H — мощность слоя, м.

Таблица 1.1

Породы осадочной толщи	Гидростатический напор H_0 , м	Плотность γ , т/м ³	Плотность минерального скелета Δ , т/м ³	Коэффициент Пуассона μ , доли ед.	Пористость n , %	Мощность слоя H_i , м
Суглинок	–	2,70	2,40	0,32	–	40
Мел	–	2,68	1,50	0,30	5	68
Песок сеноман-альбский	–	2,68	2,48	0,20	20	45
Глина юрская	40	2,70	2,30	0,40	6	30
Железистые кварциты	–	3,20	2,90	0,15	5	220

Нагрузка создается массой каждого слоя:

$$\sigma_z = \gamma_1 H_1 + \gamma_2 H_2 + \dots + \gamma_n H_n. \quad (1.21)$$

В нашем случае H_1 — мощность суглинков; H_2 — мощность мелов; H_3 — половина мощности песков.

Следовательно, $\sigma_z = 2,7 \cdot 40 + 2,68 \cdot 68 + 0,5 \cdot 2,65 \cdot 45 = 3,5$ МПа.

Горизонтальные составляющие σ_z и σ_y вычисляем по формулам (1.2) и (1.3), при этом полагаем, что $\sigma_x = \sigma_y = \xi \sigma_z$.

Коэффициент бокового отпора рассматриваемого слоя песков

$$\xi_3 = \frac{\mu_3}{1 - \mu_3} = \frac{0,2}{1 - 0,2} = 0,25.$$

Следовательно,

$$\sigma_{x3} = \sigma_{y3} = \xi_3 \sigma_z = 0,25 \cdot 3,5 = 0,875 \text{ МПа.}$$

1.2.2. Определение гидрогеомеханических напряжений в слоистой обводненной среде (т. N)

Исходные данные приведены в табл. 1.1.

В слоистой обводненной среде (см. рис. 1.4 и 1.6) напряжения в точке N вычисляют по формулам (1.11) и (1.12).

Вертикальные напряжения

$$\sigma_z^{\Gamma} = 2,70 \cdot (30 - 15) + 2,68 \cdot 168 - \\ - 1 \cdot (30 - 15) \cdot \left(\frac{40}{15} - 1 \right) + 1 \cdot 40 = 5,58 \text{ МПа.}$$

В данном расчете используется величина γ — средняя плотность пород, расположенных выше кровли водоупорного пласта. В нашем случае эта величина определяется как средневзвешенная по мощности вышележащих пластов:

$$\gamma_{\text{ср}} = \frac{\gamma_1 H_1 + \gamma_2 H_2 + \gamma_3 H_3}{H_1 + H_2 + H_3} = \\ = \frac{2,7 \cdot 40 + 2,68 \cdot 68 + 2,68 \cdot 45}{40 + 68 + 45} = 2,68 \text{ т/м}^3.$$

Горизонтальные составляющие вычислены в предположении, что $\sigma_x^{\Gamma} = \sigma_y^{\Gamma} = \xi \sigma_z^{\Gamma}$:

$$\sigma_x^{\Gamma} = \sigma_y^{\Gamma} = 0,67 \cdot 5,58 = 3,7 \text{ МПа,}$$

$$\text{где } \xi = \frac{\mu}{1 - \mu} = \frac{0,40}{1 - 0,40} = 0,67.$$

1.2.3. Определение естественных напряжений в массиве железистых кварцитов (т. К)

Поскольку массив кварцитов является относительным водоупором, в точке *К* действует интегральная составляющая гравитационных и тектонических напряжений.

Как следует из отмеченного в разделе 1.1.4 положения, наиболее достоверным источником информации о значениях действующих в массивах скальных пород напряжений в настоящее время являются непосредственные измерения их.

Вблизи указанной точки *К* на гор. –125 м в конце 70-х годов прошлого столетия под руководством и при непосредственном участии Д.М. Казикаева сотрудниками отдела геомеханики

В ИОГЕМа были выполнены измерения действующих естественных напряжений методом полной разгрузки.

Результаты измерений показали, что в этой точке главные нормальные напряжения естественного поля имеют следующие значения: субгоризонтальная составляющая широтного направления — $\sigma_1 = 5,2$ МПа; субгоризонтальная составляющая меридионального направления — $\sigma_2 = 23,8$ МПа; субвертикальная составляющая — $\sigma_3 = 12,8$ МПа.

В то же время вертикальные гравитационные составляющие напряжений в т. *K*

$$\sigma_z = \gamma_1 H_1 + \gamma_2 H_2 + \gamma_3 H_3 + \gamma_4 H_4 + \gamma_5 H_5,$$

где первая составляющая обусловлена нагрузкой пласта суглинков; вторая — нагрузкой пласта мелов; третья — нагрузкой пласта песков; четвертая — нагрузкой пласта юрских глин; пятая — нагрузкой массива железистых кварцитов высотой от кровли палеозоя до точки *K*.

Следовательно,

$$\begin{aligned} \sigma_z &= 2,7 \cdot 40 + 2,68 \cdot 68 + 2,68 \cdot 45 + \\ &+ 2,70 \cdot 30 + 3,10 \cdot 200 = 12,0 \text{ МПа.} \end{aligned}$$

Горизонтальные гравитационные составляющие в т. *K*

$$\sigma_x = \sigma_y = \xi \sigma_z = 0,18 \cdot 12,0 = 2,16 \text{ МПа;}$$

$$\text{здесь } \xi = \frac{\mu}{1 - \mu} = \frac{0,15}{1 - 0,15} = 0,18.$$

Таким образом, субвертикальная составляющая расчетная, равная 12,0 МПа, отличается от измеренной (12,8 МПа) на 6,7% и может быть принята по расчету ($\sigma_z = 12,0$ МПа).

Горизонтальные составляющие тектонического поля напряжений:

$$\sigma_{t1} = \sigma_1 - \sigma_x = 5,2 - 2,16 = 3,04 \text{ МПа;}$$

$$\sigma_{t2} = \sigma_2 - \sigma_y = 23,8 - 2,16 = 21,64 \text{ МПа.}$$

Варианты практических заданий

Порода	Плотность γ , т/м ³	Мощность m , м	Коэффициент Пуассона μ	№ варианта	№ пород
1. Известняк	2,7	26	0,20	1	9-2-6-16
2. Известняк	2,2	19	0,19	2	2-7-5-12
3. Известняк	1,7	25	0,22	3	5-1-14-16
4. Аргиллит	2,1	20	0,30	4	4-8-11-13
5. Мергель	2,3	42	0,25	5	1-4-9-15
6. Песчаник	2,6	18	0,20	6	10-3-12-16
7. Песчаник кварцитовый	2,7	22	0,09	7	4-5-10-12
8. Сланец кварцево-серицитовый	2,5	51	0,16	8	2-11-6-13
9. Сланец мягкий	1,8	21	0,14	9	3-9-4-14
10. Сланец полосчатый	1,6	27	0,20	10	5-8-11-14
11. Мрамор	2,7	30	0,40	11	7-3-9-15
12. Кварцит	2,6	40	0,15	12	9-1-7-13
13. Кварцит	2,8	35	0,009	13	6-5-10-12
14. Гранит	2,6	55	0,30	14	8-2-4-12
15. Гранит	2,7	46	0,10	15	5-6-10-16
16. Порфир	2,8	23	0,09	16	7-11-12-14
				17	5-2-8-12
				18	1-8-4-15
				19	4-5-11-14
				20	2-7-10-13
				21	3-8-13-16
				22	6-9-11-15

2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ МЕЖДУКАМЕРНЫХ ЦЕЛИКОВ ПРИ ОТРАБОТКЕ РУДНЫХ ТЕЛ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО И СЛАБОНАКЛОННОГО ЗАЛЕГАНИЯ

2.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

При камерных системах разработки (этажно-камерная, камерно-столбовая и др.) в процессе проведения очистных работ формируются рудные целики различного назначения: междуканерные, межпанельные, потолочные и пр. Общее назначение их — создание подземной пространственной конструкции, обеспечивающей сохранение системы очистных пространств. Целики представляют собой несущие элементы указанной пространственной конструкции и, следовательно, должны отвечать определенным прочностным требованиям.

Наиболее ответственными в указанной системе являются междуканерные целики.

При этажно-камерной системе разработки междуканерные целики имеют форму параллелепипедов и известны под названием *ленточные*. При эксплуатации важен наименьший их размер, называемый *шириной*, которая и определяется расчетом.

При камерно-столбовой системе разработки междуканерные целики имеют форму прямоугольного или круглого поперечного сечения и называются *столбчатыми*. Размеры поперечного сечения такого целика определяются расчетами.

При выборе мест расположения, ориентировки осей междуканерных целиков в пространстве и методов расчета их размеров прежде всего учитывают условия залегания рудной залежи, особенно угол наклона ее к горизонту.

По этому признаку с точки зрения решения рассматриваемой задачи выделяют методы расчета междуканерных целиков для

условий рудных тел *горизонтального* и *пологого залегания* и для *наклонного залегания* и *крутопадающих*.

В настоящем разделе рассматриваются условия первой группы залежей.

2.2. ФОРМИРОВАНИЕ НАГРУЗКИ НА ЦЕЛИКИ

2.2.1. Нагрузки в условиях полной подработки

При решении задачи исходим из предположения, что участок массива горных пород находится в гравитационном силовом поле.

При расчете размеров опорных межукамерных целиков важное значение имеет правильное определение нагрузки на них.

В зависимости от горно-геологических условий нагрузка на опорные целики формируется по-разному. Принципиальное значение имеет соотношение проекции залежи на горизонтальную плоскость L и глубины разработки H . Статистически установлено, что при $L/H \geq 1$ на опорные целики формируется нагрузка от полной массы налегающих пород до земной поверхности. В этом случае при отработке горизонтальных и пологозалегающих месторождений согласно гипотезе Турнера–Шевякова¹ должно соблюдаться условие прочности:

$$SH\gamma_M + S_{\text{ц}}h\gamma_{\text{ц}} \leq S_{\text{к}}\sigma_{\text{сж}}, \quad (2.1)$$

где S — площадь выработанного пространства, приходящаяся на один целик, м²; H — глубина от земной поверхности до кровли камеры, м; γ_M — плотность (средняя) пород вышележащего массива, т/м³; $S_{\text{ц}}$ — площадь горизонтального сечения опорного целика, м²; $\gamma_{\text{ц}}$ — плотность пород целика, т/м³; $\sigma_{\text{сж}}$ — предел прочности пород целика при сжатии, т/м².

Для ленточных целиков шириной b нагрузку P , приходящуюся на 1 м длины целика (т.е. для плоской задачи), определяют по формуле (рис. 2.1, А)

$$P = \gamma_1 H_1 (a + b) \cdot 1. \quad (2.2)$$

¹ Метод определения нагрузок на целики из условия давления полного столба вышележащих пород был предложен в 1841 г. А. Турнером и усовершенствован в 1941 г. акад. Л.Д. Шевяковым.