

УДК 622. 831

А.Е. Клыков, Е.С. Клыков, Г.В. Широколобов

## НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПРОЧНОСТЬ ГОРНЫХ ПОРОД В МАССИВЕ

Одним из основных исходных данных для расчета напряжений и деформаций вокруг выработки является глубина её расположения, поскольку начальные напряжения в массиве определяются весом пород над выработкой. При объёмном весе  $\gamma$  и глубине  $H$  вертикальная составляющая равна  $\gamma H$ . Горизонтальное напряжение, определяемое упругой моделью А. Н. Динника, не соответствует действительному значению этой составляющей в массиве. Согласно этой гипотезе гравитационные силы должны были появиться в массиве в то время, когда породы представляли собой сформировавшиеся твердые и упругие тела. В этом случае горизонтальная составляющая определяется из условия воспрещенной деформации массива в горизонтальном направлении и равна  $\gamma H \mu / (1 - \mu)$ , где  $\mu$  – коэффициент Пуассона горных пород.

Однако силы гравитации имели место и во время формирования горных пород. Породы осадочные, магматического и метаморфического происхождения находились в жидкой фазе или были весьма пластичными, и в это время в них существовало гидростатическое поле напряжений. Это наиболее стабильное напряженное состояние и при отсутствии процессов горообразования в отвердевших горных породах оно сохраняется. Тектонические силы могут привести к изменению этого состояния, но продолжительность их действия исчисляется миллионами лет и реология пород приводит к выравниванию напряжений.

Измерение напряженного состояния массива горных пород дает самые различные результаты. Одни авторы [1,2] приводят данные, согласно которым горизонтальная составляющая равна 0,4-1,0 вертикальной. Другие [3, 4], анализируя результаты измерения напряжений нетронутого массива, полученные рядом исследователей, приходят к выводу, что в большинстве случаев горизонтальные напряжения значительно превышают  $\gamma H$ . Столь противоречивые результаты могут быть объяснены различным действием современных тектонических сил.

При определении напряжений в массиве не учитывается, что напряженное состояние, существующее в массиве во время окаменения, сохраняется, и при этом сформировавшиеся связи между частицами горных пород остаются естественно застывшими. При определении напряжений в массиве такое состояние следует считать нулевым, что приведет к другим результатам.

Обширная информация о состоянии горного массива получена при бурении Кольской сверх-

глубокой скважины СГ-3 [5].

Предполагалось, что после релаксации напряжений в массиве должен формироваться ствол с круглой формой сечения, однако этого не произошло. Более того, ствол СГ-3 оказался устойчивым на протяжении более 10000 м до глубины 12262 м без крепления обсадной колонной. Поскольку реология не проявилась, то массив и внутренние связи в нем следует считать застывшими при окаменении.

Образование выработки в этом поле сопряжено с появлением свободных поверхностей. Относительно застывшего состояния массива такая поверхность оказывается нагруженной растягивающим напряжением, равным составляющей массива. На контуре протяженной выработки круглого сечения это напряжение действует в радиальном направлении, а при выемке образца породы из массива его поверхность подвергается действию растягивающих напряжений, равных составляющей массива, зависящей от глубины расположения выемки.

Существование этих напряжений подтверждается поведением кернов, извлеченных с большой глубины. В течение нескольких суток после подъема на поверхность образцы самопроизвольно расширялись. Зафиксированные при этом сигналы акустической эмиссии свидетельствуют о том, что происходило образование микротрещин, что может быть вызвано действием растягивающих напряжений.

Пористость аналогичных пород образцов, извлеченных из Кольской сверхглубокой, возрастает с глубиной более чем в два раза [5], а коэффициент Пуассона для нижней части скважины почти в два раза меньше, чем для верхней [6], что также может быть объяснено увеличением степени микротрешиноватости под действием дополнительных к естественному состоянию растягивающих напряжений, приложенных к поверхности керна при его выемке и возрастающих с глубиной.

В процессе бурения керна дополнительные растягивающие напряжения, равные разности составляющей массива и гидростатического давления бурового раствора, действуют на торец и боковую поверхность формируемого столбика и способствуют его отрыву. Усилие отрыва зависит от площади этой поверхности. С продвижением породоразрушающего инструмента столбик растет и при определенной его высоте происходит отрыв. С глубиной напряжения увеличиваются, поэтому необходимая для отрыва высота керна уменьшается, а на больших глубинах происходит самораз-

рушение керна на диски (так называемое «дискование» керна) и далее отрыв породы непосредственно от забоя и разрушение её до размеров буро-вой мелочи. В связи с этим не оправдались прогнозы ухудшения буримости пород на больших глубинах, наоборот, в интервале 6000 – 11000 м коэффициент буримости возрос по сравнению с интервалом 0 – 6000 м в 1,5 – 2 раза [5].

О действии растягивающих напряжений свидетельствует также зафиксированное при проведении СГ-З [5] снижение прочности горных пород в образцах, поднятых на поверхность с глубины 10 км и в связи с этим подвергающихся всестороннему растяжению, по сравнению с прочностью аналогичных образцов, отобранных вблизи поверхности.

Определение напряжений в нетронутом массиве каким-либо методом производится через деформации упругого восстановления образуемых в массиве поверхностей. При этом предполагается, что эти напряжения возникли в сформировавшихся горных породах. Если предположить, что поле напряжений является застывшим и при расчетах нагружать свободные поверхности составляющими массива, то результат будет другим.

Возможным способом определения коэффициента  $\lambda$  бокового распора массива является определение напряжений через деформацию вертикальной скважины.

В этом случае в упруго нагруженном массиве напряжения в скважине из задачи Лямзे

$$\sigma_\theta = 2\lambda\gamma H, \sigma_r = 0, \sigma_z = \gamma H$$

По закону Гука

$$\epsilon_\theta = [\sigma_\theta - \mu(\sigma_r + \sigma_z)]/E = (2\lambda - \mu)\gamma H/E.$$

При радиусе  $R$  скважины смещение контура

$$u = \epsilon_\theta \cdot R = (2\lambda - \mu)\gamma H R/E.$$

Если известно значение  $u$ , то коэффициент бокового распора

$$\lambda = \frac{1}{2} \left( \frac{Eu}{\gamma H R} + \mu \right). \quad (1)$$

В гидростатическом застывшем поле на образуемую свободную поверхность скважины действует растягивающее радиальное напряжение  $\sigma_r = -\gamma H$ . Тогда  $\sigma_\theta = \gamma H$ ,  $\sigma_z = 0$  и по закону Гука  $\epsilon_\theta = (1 + \mu)\gamma H/E$ . Смещение контура, который может получиться при замере,  $u = (1 + \mu)\gamma H R/E$ . С учетом этого смещения из (1) получим  $\lambda = (1 + 2\mu)/2$ .

Результат соответствует выводам, полученным в [2], согласно которым среднее значение отношения горизонтальных напряжений к вертикальным в массиве составляет 0,777 и не зависит от глубины. Если учесть, что значение коэффициента Пуассона горных пород Кольской сверхглубокой изменяется в пределах 0,2-0,3, то предположение о застывшем массиве можно считать реальным.

При испытании горных пород на объемное

сжатие в предельном состоянии наблюдается дилатансия, которая может достигать 10% и более, что подтверждается многочисленными экспериментами [7] и в особенности проявляется в осадочных горных породах. Это может быть объяснено нарушением связей окаменения при переходе в предельное состояние и связанным с этим увеличением объема.

Таким образом, все перечисленные проявления объясняются тем, что в естественном состоянии поле напряжений горного массива является застывшим и образование свободных поверхностей в нем связано с растягивающими напряжениями, приложенными к этим поверхностям, равными составляющей массива. Это должно быть учтено при определении показателей прочности горных пород в массиве и их использовании для расчета параметров зоны неупругих деформаций (ЗНД) вокруг выработок.

В естественном состоянии массив представляет собой застывшее поле напряжений, которое на рисунке соответствует точке  $O_1$  в осях  $\sigma$ - $\tau$  построений Мора (рис. 1). При выемке из такого массива какой-либо его части образующиеся при этом свободные поверхности подвергаются действию активного по отношению к застывшему полю напряжения, равного составляющей массива  $\gamma H$ . Вынутая часть (например, керн), оказывается под действием всестороннего растягивающего напряжения интенсивностью  $\gamma H$ , а описывающий это напряженное состояние круг Мора, вырожденный в точку, смещается влево на  $\gamma H$ , если считать сжимающие напряжения положительными.

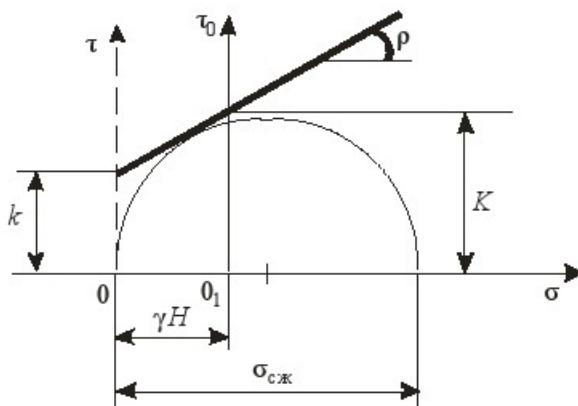


Рис. 1. Связь коэффициента сцепления породы в массиве с огибающей предельных кругов Мора

В результате испытаний на объемное сжатие образцов, полученных из этой части, можно определить прочность на сжатие  $\sigma_{ск}$  и построить огибающую предельных кругов Мора, а при её аппроксимации в области сжимающих напряжений прямой линией определить коэффициент сцепления  $k$  и угол внутреннего трения  $\rho$ . Тогда коэффициент сцепления породы в естественно застывшем состоянии

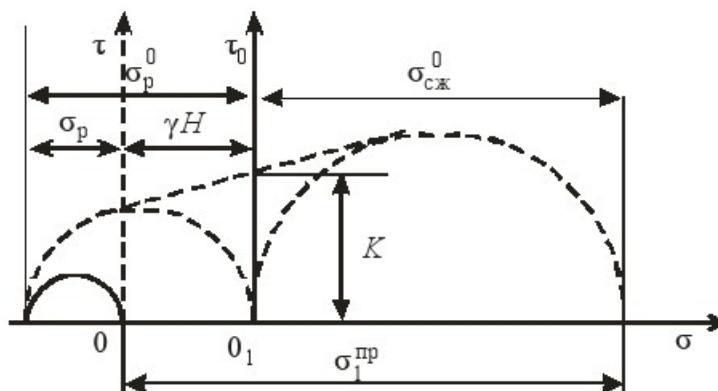


Рис.2. Связь коэффициента сцепления породы в массиве с прочностью на растяжение

$$K = \frac{\sigma_{cж}}{2} \cdot \frac{1 - \sin \rho}{\cos \rho} + \gamma H \cdot \operatorname{tg} \rho . \quad (2)$$

Если при испытании образца, подверженного при выемке из массива всестороннему растяжению интенсивностью  $\gamma H$ , получена его прочность на растяжение  $\sigma_p$  (рис. 2), то разрушающее растягивающее напряжение породы в массиве  $\sigma_p^0 = \gamma H + \sigma_p$ .

Прикладывая вначале к образцу всестороннее сжатие с составляющей  $\gamma H$  и увеличивая затем напряжение в одном из направлений до разрушающего  $\sigma_1^пр$  при прямолинейной огибающей получим  $\sigma_1^пр = c \cdot \gamma H + \sigma_{cж}$ , где  $c = (1 + \sin \rho) / (1 - \sin \rho)$ . Напряжение  $\sigma_1^пр$  включает в себя компенсирующую составляющую  $\gamma H$  и прочность на одностороннее сжатие в массиве:  $\sigma_1^пр = \gamma H + \sigma_{cж}^0$ . Отсюда  $\sigma_{cж}^0 = (c - 1) \gamma H + \sigma_{cж}$ .

Касательная к кругам, построенным на напряжениях  $\sigma_p^0$  и  $\sigma_{cж}^0$ , в пересечении с осью  $\tau_0$  соответствует коэффициенту сцепления породы в массиве:

$$K = \frac{1}{2} \sqrt{(\gamma H + \sigma_p)[(c - 1)\gamma H + \sigma_{cж}]} . \quad (3)$$

Из двух значений, полученных по формулам (2) и (3), в расчет принимается меньшее.

Вокруг подземной выработки в массиве с составляющей  $q$  может сформироваться зона неупругих деформаций (ЗНД). Связывая переход в предельное состояние на границе упругой зоны с ЗНД с наложенным на застывшее поле чистым сдвигом можно получить формулу радиуса  $R_p$  ЗНД и характеристику  $k$  состояния массива [8]:

$$R_p = \left[ \frac{(k-1)(q-K)+\sigma_o}{(k-1)p+\sigma_o} \right]^{1/(k-1)} \quad (4)$$

$$k = c + \frac{\sigma_{cж} - \sigma_o}{q - K},$$

где  $\sigma_o$  – остаточная прочность пород в запредельном состоянии,  $p$  – сопротивление крепи выработки.

Из решения дифференциального уравнения равновесия для осесимметричной задачи получены формулы напряжений в ЗНД [8]:

$$\sigma_r = \frac{[(k-1)p + \sigma_o]r^{k-1} - \sigma_o}{k-1},$$

$$\sigma_\theta = \frac{k[(k-1)p + \sigma_o]r^{k-1} - \sigma_o}{k-1}. \quad (5)$$

На границе с упругой зоной в ЗНД  $\sigma_r(R_p) = q - K$ ,  $\sigma_\theta(R_p) = k(q - K) + \sigma_o$ , а в упругой зоне  $\sigma_r(R_p) = q - K$ ,  $\sigma_\theta(R_p) = q + K$ . Тангенциальные напряжения здесь претерпевают скачок, что объясняется нарушением связей окаменения при переходе пород в предельное состояние.

Рассмотрим применение приведенных формул для расчета напряженного состояния окрестности одиночной неподкрепленной ( $p = 0$ ) выработки, пройденной на глубине  $H = 800$  м при следующих характеристиках пород:  $\sigma_{cж} = 20$  МПа;  $\sigma_p = 2,5$  МПа;  $\rho = 20^\circ$ ;  $\sigma_o = 2$  МПа;  $\gamma = 2,5$  г/см<sup>3</sup>.

Составляющая массива  $\gamma H = q = 20$  МПа. Выразим характеристики прочности в долях от  $q$ :  $\sigma_{cж} = 1$ ;  $\sigma_p = 0,125$ ;  $\sigma_o = 0,1$ ;  $\gamma H = 1$ .

По формулам (2) и (3) находим значения коэффициента сцепления. Меньшее из них определяется формулой (2):  $K = 0,7141 \gamma H = 14,28$  МПа.

Характеристика состояния массива по формуле (4):  $k = 73,186$ . Тогда радиус ЗНД в долях от радиуса  $R$  выработки:  $R_p = 1,844$ .

Определим радиус ЗНД для тех же условий, но с дополнительным давлением от действия очистной выработки при коэффициенте опорного давления  $k_{од} = 1,2$ . Приняв для формул (4) составляющую  $q = 1,2 \gamma H = 24$  МПа, выразим необходимые характеристики в долях от этой составляющей:  $\sigma_{cж} = 0,8333$ ;  $\sigma_p = 0,1042$ ;  $\sigma_o = 0,08333$ ;  $q = 1$ ;  $K = 0,595$ . Тогда, согласно (4),  $k = 3,892$ ;  $R_p = 2,55$ .

### Выводы

1. Анализ поведения обнаженных горных пород показывает, что поле напряжений нетронутого массива является гидростатическим с застывшими при окаменении связями.

2. Образуемые при проведении выработок свободные поверхности подвергаются действию

растягивающих напряжений, которые определяют напряженное состояние окрестности этих выработок. Под таким же действием находятся извлекаемые из массива образцы горных пород.

3. Предложены формулы для определения коэффициента сцепления породы в массиве и его использования при расчете размера зоны неупругих деформаций вокруг выработки.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ильштейн А.М. Методы расчета целиков и потолочин камер рудных месторождений. / А.М. Ильштейн, Ю.М. Либерман, Е.А. Мельников, В. Рахимов, В.М. Рыжик. - М.: Наука, 1964. – 112 с.
2. Савченко С.Н. Оценка напряженного состояния горных пород в районе бурения Кольской сверхглубокой скважины // ФТПРПИ. – 2004. - № 1. С. 27-34.
3. Батугин С.А. Напряженное состояние массива горных пород и возможности его изучения / С.А. Батугин. // Совершенствование технологии сооружения горных выработок: науч.-техн. сб. - Кемерово: КузПИ, 1968. С. 110-134.
4. Васильев Л.М. Расчет горизонтальных напряжений в горном массиве // ФТПРПИ. – 1993. - № 4. С. 9-13.
5. Орлов В.П. Кольская сверхглубокая. Научные результаты и опыт исследований / В.П. Орлов, Н.П. Лаверов. – М.: МФ «ТЕХНОНЕФТЕГАЗ», 1998. – 260 с.
6. Козловский Е.А. Кольская сверхглубокая / Е.А. Козловский. – М.: Недра, 1984. – 492 с.
7. Ставрогин А.Н. Прочность горных пород и устойчивость выработок на больших глубинах / А.Н. Ставрогин, А.Г. Протосеня – М.: Недра, 1985, - 272 с.
8. Клыков А.Е. Напряженное состояние окрестности протяженной выработки круглого сечения / А.Е. Клыков // Зб. наук. пр. СНУЯЭтаП. – Севастополь: СНУЯЭиП, 2011. – Вып.1 (37). – С. 138 – 143.

□Авторы статьи:

Клыков  
Александр Ефимович,  
канд. техн. наук, доцент каф. механики Севастопольского национального университета ядерной энергетики и промышленности (СНУЯЭиП).  
Email: [alex\\_klykov@mail.ru](mailto:alex_klykov@mail.ru)

Клыков  
Ефим Сергеевич,  
магистр, каф. энергоуста-  
новок морских судов и сооружений  
Севастопольского национального  
университета (СевНТУ).  
Email: [alex\\_klykov@mail.ru](mailto:alex_klykov@mail.ru)

Широколов  
Георгий Валентинович,  
канд. техн. наук, доцент каф. сопро-  
тивления материалов КузГТУ.  
Email: [pobedonosec\\_47@mail.ru](mailto:pobedonosec_47@mail.ru)