

ДИЛАТАЦИОННАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ СМЕЩЕНИЙ КОНТУРА ПРОТЯЖЕННОЙ ВЫРАБОТКИ В ГОРНОМ МАССИВЕ

*А.Е. Клыков, Севастопольский национальный университет ядерной
энергии и промышленности*

Е.С. Клыков, Севастопольский национальный технический университет

Проанализирован характер изменения свойств массива горных пород с увеличением глубины залегания. В результате сделан вывод, что напряженное состояние нетронутого массива следует предполагать соответствующим застывшему гидростатическому полю. Предлагается решение задачи расчета смещений в таком массиве для выработки круглого сечения.

Введение. 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 γ и глубине H вертикальная составляющая равна γH . 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 $\lambda \gamma H$ определяется из условия воспрещенной деформации массива в горизонтальном направлении, при этом коэффициент бокового отпора $\lambda = \mu / (1 - \mu)$, где μ – 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 γH . Анализируя данные ряда исследователей (27 источников), проводивших замеры методом разгрузки для различных районов СССР, автор работы [5] заключает, что коэффициент бокового отпора массива практически не зависит от глубины и равен в среднем $0,75 \pm 0,25$. 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. Такое состояние не является активным и при расчете напряжений и перемещений в окрестности выработки тем или иным методом его следует считать условно нулевым, что связано с коррективами в постановке и решении различных задач.

Целью настоящей работы является обоснование предлагаемого представления о напряженном состоянии горного массива, базирующегося на анализе известных экспериментальных данных, и вытекающее из этого представления решение задачи о смещениях в окрестности подготовительной выработки.

Анализ экспериментальных данных и постановка задачи. Обширная информация о состоянии горного массива получена при бурении Кольской сверхглубокой скважины СГ-3 [6, 7].

Предполагалось, что после релаксации напряжений в околоствольном массиве должен формироваться ствол с круглой формой сечения диаметром, близким к номинальному, однако этого не произошло. Более того, ствол СГ-3 оказался устойчивым на протяжении более 10 000 м до глубины 12 262 м без крепления обсадной колонной при плотности бурового раствора $1,1 \text{ г/см}^3$. Отсюда следует, что массив не является активным 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 части породы из этого массива её поверхность оказывается подверженной действию таких же растягивающих напряжений.

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

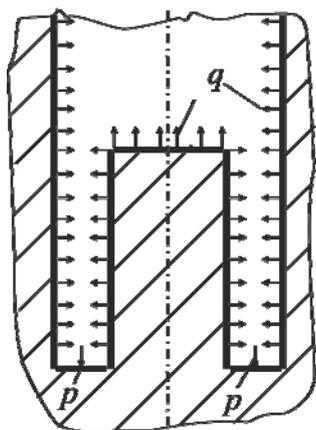


Рис. 1. Действие усилий в скважине

Пористость аналогичных пород образцов, извлеченных из Кольской сверхглубокой, возрастает с глубиной более чем в два раза [6], а коэффициент Пуассона для нижней части скважины почти в два раза меньше, чем для верхней [7], что также может быть объяснено увеличением степени микротрещиноватости под действием дополнительных к естественному состоянию растягивающих напряжений, приложенных к поверхности керна при его выемке и возрастающих с глубиной.

В процессе обуривания керна дополнительные растягивающие напряжения, равные разности составляющей массива и гидростатического давления бурового раствора, действуют на поверхность формируемого столбика и способствуют его отрыву (рис. 1). Усилие отрыва возрастает с увеличением площади этой поверхности. С продвижением породоразрушающего инструмента столбик растет и при определенной его высоте происходит отрыв. Кроме того, при бурении забой скважины испытывает давление p со стороны этого инструмента, что способствует сдвигу на сопряжении столбика с забоем. С глубиной напряжения увеличиваются, поэтому необходимая для отрыва высота керна уменьшается, а на больших глубинах происходит саморазрушение керна на диски (так называемое «дискование» керна) и далее отрыв породы непосредственно от забоя и разрушение её до размеров буровой мелочи. В связи с этим не оправдались прогнозы ухудшения буримости пород на больших глубинах, наоборот, в интервале 6000 – 11 000 м коэффициент буримости пород возрос по сравнению с интервалом 0 – 6000 м в 1,5 – 2 раза [6].

О действии растягивающих напряжений свидетельствует также зафиксированное при проведении СГ-3 [6] 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 нетронутым 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 λ бокового распора массива является определение напряжений через смещение u контура вертикальной скважины.

В этом случае в упруго нагруженном массиве напряжения на поверхности скважины из решения задачи Лямэ $\sigma_\theta = 2\lambda\gamma H$, $\sigma_r = 0$, $\sigma_z = \gamma H$, где σ_θ , σ_r и σ_z - окружное, радиальное и параллельное продольной оси выработки напряжения.

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

Для осесимметричной задачи уравнение совместности, выражающее связь между радиальным смещением u и относительной деформацией ε_θ в точке с координатой r , имеет вид: $u = \varepsilon_\theta r$. Тогда при радиусе R скважины смещение контура $u = \varepsilon_\theta R = (2\lambda - \mu)\gamma HR/E$. Если известно значение u , то коэффициент бокового распора

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

В гидростатическом застывшем поле на образуемую свободную поверхность скважины действует растягивающее радиальное напряжение $\sigma_r = -\gamma H$. Тогда окружное напряжение из решения Ламе $\sigma_\theta = \gamma H$, а осевое напряжение в этом состоянии $\sigma_z = 0$ и по закону Гука $\varepsilon_\theta = (1 + \mu)\gamma H/E$. Если предположить такое состояние реальным, то смещение контура, которое может получиться при замере, $u = (1 + \mu)\gamma HR/E$. Для такого смещения из (1) получим $\lambda = (1 + 2\mu)/2$. Для коэффициента Пуассона, изменяющегося в пределах 0,2-0,35, отношения горизонтальных напряжений к вертикальным в массиве составят 0,7 – 0,85, что соответствует результатам, полученным большинством упомянутых исследователей.

При испытании горных пород на объёмное сжатие в предельном и запредельном состояниях наблюдается увеличение объёма (дилатансия), которая может достигать 10% и более, что подтверждается многочисленными экспериментами [8] 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 объёма.

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.

Решение задачи. Примем застывшее поле напряжений соответствующим началу координат 0_1 в осях σ - τ построений Мора (рис. 2). 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 γH . Вынутая часть (например, керн) оказывается под действием всестороннего растягивающего напряжения интенсивностью γH , а описывающий это напряженное состояние круг Мора, вырожденный в точку, смещается влево на γH , если считать сжимающие напряжения положительными.

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

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

Если в результате испытаний образца, подверженного при выемке из массива всестороннему растяжению интенсивностью γH , получена его прочность на растяжение σ_p (рис. 3), то разрушающее растягивающее напряжение породы в массиве $\sigma_p^0 = \gamma H + \sigma_p$.

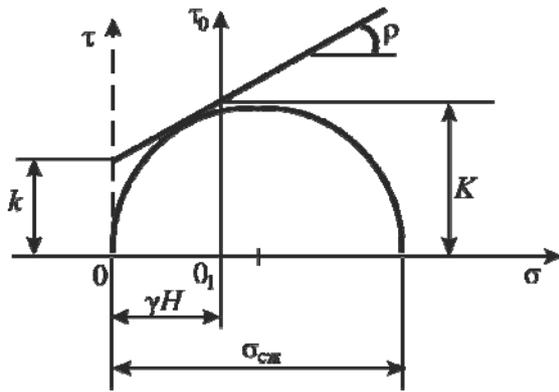


Рис. 2. Связь между коэффициентами сцепления в образце и массиве

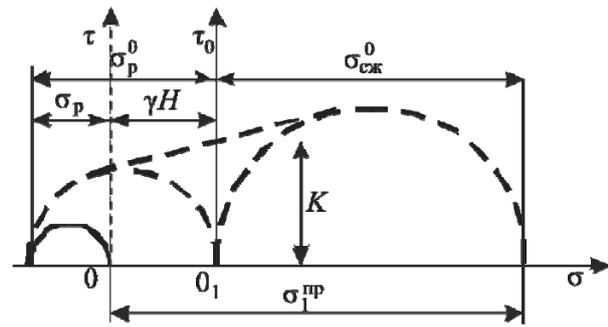


Рис. 3. Связь коэффициента сцепления в массиве с огибающей кругов Мора

Прикладывая вначале к образцу всестороннее сжатие с составляющей γH и увеличивая затем напряжение в одном из направлений до разрушающего σ_1^{np} при прямолинейной огибающей, получим

$$\sigma_1^{np} = c \cdot \gamma H + \sigma_{сж},$$

где $c = (1 + \sin \rho) / (1 - \sin \rho)$.

Напряжение σ_1^{np} включает в себя компенсирующую составляющую γH и прочность на одноосное сжатие в массиве:

$$\sigma_1^{np} = \gamma H + \sigma_{сж}^0.$$

Отсюда

$$\sigma_{сж}^0 = (c - 1) \gamma H + \sigma_{сж}.$$

Касательная к кругам, построенным на напряжениях σ_p^0 и $\sigma_{сж}^0$, в пересечении с осью τ_0 соответствует коэффициенту сцепления породы в массиве:

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

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). Определение параметров этой зоны наиболее просто решается для протяженной выработки круглого сечения радиусом R в гидростатическом поле. При этом полученные результаты можно применить к сечениям, распространенным на практике. Как показали расчеты Колоколова С.Б. [9], неупругая область вокруг выработки по форме и размеру одинакова для трапецевидной, квадратной, арочной или равновеликой круглой. Это подтверждается и более поздними исследованиями, проведенными численным моделированием [10].

Вследствие осевой симметрии ЗНД вокруг круглой выработки представляет собой цилиндр радиусом R_p . В радиальном направлении на этой поверхности снимаемое с массива напряжение $\sigma'_r(R_p)$ соответствует растяжению. Из решения Ламе в окружном направлении $\sigma'_\theta(R_p) = -\sigma'_r(R_p)$. При этом в осевом направлении по обобщенному закону Гука $\sigma'_z = 0$, то есть здесь в снимаемых напряжениях реализуется чистый сдвиг при плоском напряженном состоянии. При этой простейшей деформации предельное состояние наблюдается при снимаемых напряжениях $\sigma'_r(R_p) = -K$, $\sigma'_\theta(R_p) = K$. Тогда полные напряжения на границе упругой зоны

$$\sigma_r(R_p) = q - K; \sigma_\theta(R_p) = q + K. \quad (4)$$

В предельном состоянии нарушаются связи, сформировавшиеся при окаменении, и породы приобретают прочностные характеристики, которые определяются при испытании образцов. Эксперименты показывают [8], что при объемном сжатии с переходом в предельное и запредельное состояния при постоянном минимальном напряжении происходит резкое уменьшение максимального и проявляется характерное для горных пород увеличение объема – дилатансия. Радиальные напряжения σ_r вследствие непрерывности массива на границе упругой и неупругой зон равны, но напряжение σ_θ может претерпевать скачок.

Таким образом, на границе с упругой зоной точки ЗНД находятся в предельном состоянии и при прямолинейной огибающей кругов Мора

$$\sigma_\theta(R_p) = c\sigma_r(R_p) + \sigma_{сж}. \quad (5)$$

Точки ЗНД между контуром выработки и границей с упругой зоной находятся в запредельном состоянии. Если учесть непрерывность ЗНД, то между главными напряжениями σ_r и σ_θ следует предположить существование определенной связи. Примем ее линейной:

$$\sigma_\theta = k\sigma_r + \sigma_o, \quad (6)$$

где σ_o – остаточная прочность горных пород при одноосном сжатии.

Эта связь соблюдается и при $r = R_p$. Приравняв в этом случае выражения (5) и (6) и приняв во внимание, что на этой границе $\sigma_r(R_p)$ соответствует выражению (4), получим коэффициент, характеризующий состояние массива за контуром выработки:

$$k = c + \frac{\sigma_{сж} - \sigma_o}{q - K}. \quad (7)$$

Используя уравнение (6) при решении дифференциального уравнения равновесия для осесимметричной задачи, получим формулы напряжений в ЗНД:

$$\sigma_r = \frac{[(k-1)p + \sigma_o]r^{k-1} - \sigma_o}{k-1}; \sigma_\theta = \frac{k[(k-1)p + \sigma_o]r^{k-1} - \sigma_o}{k-1}, \quad (8)$$

где p – сопротивление крепи выработки.

Если учесть, что на границе ЗНД $\sigma_r(R_p) = q - K$, из формулы (8) для σ_r можно получить формулу радиуса ЗНД в долях от радиуса выработки:

$$R_p = \left[\frac{(k-1)(q-K) + \sigma_o}{(k-1)p + \sigma_o} \right]^{1/(k-1)}, \quad (9)$$

На границе с упругой зоной напряжения 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.

Если решать аналогичную задачу теории предельного равновесия при общепринятом представлении напряженного состояния горного массива, то радиус ЗНД и характеристика состояния массива запишутся следующим образом [11]:

$$R_{p\sigma} = \left[\frac{(2q - \sigma_o)(k_\sigma - 1)/(k_\sigma + 1) + \sigma_o}{(k_\sigma - 1)p + \sigma_o} \right]^{1/(k_\sigma - 1)} ; k_\sigma = \frac{2qc + \sigma_{сж} - \sigma_o(c + 1)}{2q - \sigma_{сж}} . (10)$$

Наряженное состояние ЗНД в этом случае описывается теми же формулами (8).

С переходом в запредельное состояние происходит увеличение объёма пород (дилатансия), которое сопровождается перемещением их в выработку и смещением u_∂ её контура. Если принять во внимание, что относительная объёмная деформация ε_v изменяется по гиперболическому закону в зависимости от минимального напряжения σ_r , с учетом граничных условий можно принять

$$\varepsilon_v = \varepsilon_v^0 \frac{\sigma_r(R_\partial) - \sigma_r}{\sigma_r(R_\partial) + \sigma_r} , (11)$$

где ε_v^0 – объёмная деформация в запредельном состоянии при одноосном сжатии, величина которой может достигать 0,1 и более.

Тогда дилатансионная составляющая смещений контура выработки

$$u_\partial = \varepsilon_v^0 \int_1^{R_p} \frac{\sigma_r(R_\partial) - \sigma_r}{\sigma_r(R_p) + \sigma_r} r dr , (12)$$

Рассмотрим применение приведенных формул для расчета смещений контура выработки с сопротивлением крепи $p = 25$ кПа, пройденной на глубине $H = 1000$ м при следующих характеристиках пород: $\sigma_{сж} = 30$ МПа; $\sigma_p = 3$ МПа; $\rho = 21^\circ$; $\sigma_o = 0$; $\gamma = 2,5$ г/см³.

Составляющая нетронутого массива $\gamma H = 25$ МПа. Выразим характеристики прочности в долях от γH : $\sigma_{сж} = 1,2$; $\sigma_p = 0,12$; $p = 0,001$. Расчет осуществлен в Mathcad.

На рис. 4 приведены графики дилатансионной составляющей смещений u_∂ контура выработки, построенные в зависимости от действия соседней выработки при различных значениях коэффициента опорного давления $k_{o\partial}$. В этом случае необходимая для расчетов активная составляющая массива $q = k_{o\partial} \gamma H$.

Кривая 1 построена из представления массива застывшим, а кривая 2 – из общепринятого. Значения u_∂ отложены в долях от радиуса выработки.

При отсутствии влияния соседних выработок дилатансионная составляющая, полученная по формулам для застывшего массива, в 1,5 раза меньше, чем полученная по формулам для активного массива.

При значениях $k_{o\partial} < 1,15$ в расчет следует принимать результаты по теории предельного равновесия, при бóльших значениях – по снимаемым напряжениям.

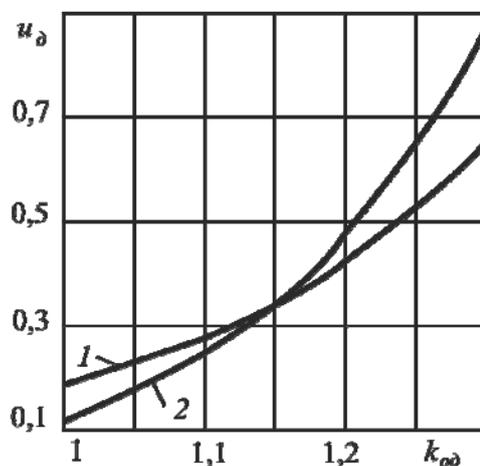


Рис. 4. Смещения контура выработки

Следует отметить большое влияние этого коэффициента: увеличение составляющей массива на 20 % приводит к увеличению смещений более чем в два раза.

Выводы. Анализ поведения обнаженных горных пород показывает, что поле напряжений нетронутого массива является гидростатическим с застывшими при окаменении связями. Образующиеся при проведении выработок свободные поверхности подвергаются относительно своего состояния в массиве действию растягивающих напряжений, которые определяют напряженное состояние окрестности этих выработок. Под таким же действием находятся извлекаемые из массива образцы горных пород.

Предложены формулы для определения коэффициента сцепления породы в массиве и его использования при расчете размера зоны неупругих деформаций вокруг выработки и дилатационной составляющей смещений её контура.

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. Булин Н.К. Современные напряжения в горных породах по данным измерений в подземных выработках СССР // Геология и геофизика – 1972. - № 8. С. 23-30.
6. Орлов В.П. Кольская сверхглубокая. Научные результаты и опыт исследований / В.П. Орлов, Н.П. Лаверов. – М.: МФ «ТЕХНОНЕФТЕГАЗ», 1998. – 260 с.
7. Козловский Е.А. Кольская сверхглубокая / Е.А. Козловский. – М.: Недра, 1984. – 492 с.
8. Ставрогин А.Н. Прочность горных пород и устойчивость выработок на больших глубинах / А.Н. Ставрогин, А.Г.Протосеня – М.: Недра, 1985, - 272 с.
9. Колоколов С.Б. Определение границы неупругой области вокруг горной выработки / С.Б. Колоколов // Изв. вузов. Горный журнал. – 1988. – № 9. – С. 39 - 41.
10. Мартовицкий А.В. О размерах зоны неупругих деформаций вокруг выработки различной формы поперечного сечения / А.В. Мартовицкий, Р.Н. Терещук, С.Н. Гапеев // Научный вестник Национального горного университета: науч.-технич. журнал. – Днепропетровск, 2011. – № 1. – С. 29 - 32.
11. Егоров П.В. Расчет крепи и охранных целиков подготовительных выработок / П.В. Егоров, А.Е.Клыков, О.С.Курзанцев и др. – М.: Недра, 1995. – 126 с.