

DOI: 10.26730/1999-4125-2019-4-17-22

УДК 622.83

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ГОРНОГО МАССИВА И РАСЧЕТ СМЕЩЕНИЙ В ВЫРАБОТКЕ

STRESS CONDITION OF ROCK MASS AND FAULTING CALCULATION IN THE MINE WORKING

Клыков Александр Ефимович¹,

канд. техн. наук, доцент, e-mail: alex_klykov@mail.ru

Alexandr E. Klykov¹, C. Sc. in Engineering, Associate Professor,

Клыков Ефим Сергеевич²,

магистр, e-mail: klykoff@mail.ru

Efim S. Klykov², Undergraduate,

Широколов Георгий Валентинович³,

канд. техн. наук, доцент, e-mail: pobedonosec_47@mail.ru

Georgiy V. Shirokolobov³, C. Sc. in Engineering, Associate Professor

¹ Севастопольский Национальный Технический Университет., 299053, г. Севастополь, Университетская, 33, Россия

¹Sevastopol National Technical University, 299053, Sevastopol, University st., 33, the Russian Federation

²Севастопольский государственный университет (СевГУ), 299011, г. Севастополь, ул. адмирала Владимирского, 18, Россия,

²Sevastopol State University (SevSU), 299011 Sevastopol, Admiral Vladimirskiy st., 18, the Russian Federation

³Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

³T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, Vesennyaya St., Kemerovo, 650000, Russian Federation

Аннотация:

На основании анализа состояния окрестности сверхглубоких скважин, а также полученных при их бурении кернов делается вывод о том, что существовавшие во время окаменения гидростатическое поле напряжений и связи между частицами горных пород являются естественно застывшими. Образование свободных обнажений связано с «прикладываемыми» к ним напряжениями, равными составляющей массива. За контуром выработки круглого сечения на границе упругой зоны реализуется чистый сдвиг и переход в предельное состояние здесь происходит при напряжении, равном коэффициенту сцепления пород в массиве, который зависит от глубины расположения выработки. Предложена формула расчета смещения контура выработки, связанного с дилатансией на этой границе. Для больших глубин результаты существенно отличаются от рассчитанных по теории предельного равновесия.

Ключевые слова: нетронутый массив; напряжения; протяженная выработка; дилатансия; смещения.

Abstract:

The paper presents the conclusion made on the basis of the analysis of vicinity of ultra deep wells, as well as the analysis of core samples received at their drilling. The conclusions show that the hydrostatic stress field existed during fossilization and connections between rock particles are naturally consolidated. Formation of free barings is due to the "applied" stresses to them, which are equal to the constituent of the rock massif. Pure shear is realized behind the contour of a circular cross-section roadway at the boundary of the elastic zone and the transition to the limit state takes place at stress equal to the coefficient of rock adhesion in the massif, which depends on the

depth of the mine working. The proposed formula to calculate the mine working contour shear is associated with dilatancy on this boundary. The results for larger depths differ greatly from the results calculated according to the theory of limited balance.

Key words: *tight rock, stress, extended production, dilatancy, shear.*

Смещения и размеры зоны неупругих деформаций вокруг подземной выработки зависят от напряженного состояния горного массива. Вертикальная составляющая массива определяется весом столба вышележащих пород. При объемном весе γ этих пород и глубине расположения H эта составляющая равна γH .

В массиве реализуется объемное сжатие, поскольку деформации в горизонтальном направлении воспрещены. Если предположить, что массив является упругим, то вертикальная составляющая должна сопровождаться горизонтальной, равной из условия воспрещенной деформации $\gamma H \cdot \mu / (1 - \mu)$, где μ - коэффициент Пуассона породы.

Это соотношение должно соблюдаться в том случае, если предположить, что вертикальная составляющая появляется в уже сформировавшемся массиве.

В действительности горные породы, будь то осадочные, метаморфического или магматического происхождения, изначально находятся в жидком или пластическом состоянии, когда реализуется гидростатическое поле напряжений. Это состояние сохраняется и в период окаменения при формировании связей между частицами, а возникающая при действии тектонических сил неравнокомпонентность напряжений выравнивается временем, исчисляемым сотнями тысяч лет. С этой точки зрения гидростатическое напряженное состояние следует считать естественным, нулевым состоянием горных пород с застывшими при окаменении связями между частицами.

Тогда становятся понятными многие явления, кажущиеся парадоксальными, которые возникли при бурении Кольской сверхглубокой скважины СГ-3, длительное время являвшейся подземной лабораторией по изучению свойств горных пород. Результаты этих исследований подробно изложены в [1,2].

Предполагалось, что после релаксации напряжений в околоствольном массиве должен формироваться ствол с круглой формой сечения диаметром, близким к номинальному [1], однако этого не произошло: ствол скважины оказался устойчивым на протяжении более 10 000 м до глубины 12 262 м без крепления обсадной колонной при плотности бурового раствора 1,1 г/см³. Отсюда следует, что массив не является активным, а внутренние связи в нем следует считать застывшими при окаменении. Это обуславливает инерцию сложившегося состояния пород в отношении возмущений, вносимых выработками в массив.

Проведение выработки связано с выемкой пород из ее контура и образованием обнаженных

поверхностей. По отношению к естественному состоянию такая поверхность оказывается нагруженной растягивающим напряжением, равным гидростатической составляющей массива. На контуре протяженной выработки круглого сечения это напряжение действует в радиальном направлении и является активной составляющей, приводящей к смещениям в окрестности выработки.

При отборе части породы (например, керна) из массива ее поверхность оказывается подверженной действию таких же растягивающих напряжений. Это подтверждается поведением кернов, извлеченных с большой глубины скважины СГ-3. В течение нескольких суток после подъема на поверхность образцы самопроизвольно расширились, наблюдалась ползучесть, вызванная этими напряжениями. Зафиксированные при этом сигналы акустической эмиссии свидетельствуют о том, что происходило образование микротрещин, что также может быть вызвано действием растягивающих напряжений.

Пористость образцов пород-аналогов, извлеченных из Кольской сверхглубокой, возрастает с глубиной более чем в два раза, а коэффициент Пуассона уменьшается от 0,27 на глубине 1 км до 0,15 на глубине 10 км. В этом заключается эффект воздействия напряжений, прикладываемых к поверхности кернов при их выемке, которые возрастают с увеличением глубины, поэтому увеличивается степень микротрещиноватости и пористость исследуемых образцов, в связи с чем уменьшается коэффициент Пуассона.

С увеличением глубины бурения размеры получаемых кернов уменьшались, а на максимальной глубине происходило их «дискование», т.е. керны имели форму дисков и не были достаточно представительными для полного изучения механических свойств горных пород.

В процессе обуривания керна растягивающие напряжения, равные разности составляющей массива и гидростатического давления бурового раствора, действуют на поверхность формируемого столбика и способствуют его отрыву. Усилие отрыва возрастает с увеличением площади этой поверхности. С продвижением забоя 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 саморазрушение керна на диски. С дальнейшим ростом глубины происходит отрыв породы непосредственно от забоя и разрушение ее до размеров буровой мелочи. Поэтому не оправдались прогнозы ухудшения буримости пород на больших глубинах, наоборот, в интервале 6000 – 11000 м коэффициент буримости

разработки можно аппроксимировать прямой с коэффициентом сцепления k_0 и углом внутреннего трения ρ . Эти характеристики определяют тем или иным способом при геолого-разведочных изысканиях. В этом случае связь между главными напряжениями в предельном состоянии выражается следующим образом: $\sigma_1 = c\sigma_3 + \sigma_c$; $c = (1 + \sin \rho) / (1 - \sin \rho)$.

Угол внутреннего трения осадочных горных пород является достаточно устойчивой характеристикой. Анализируя значения этого угла, Раенко А.Н. [6] приходит к выводу, что для горных пород крепостью от 1,5 до 6 в интервале глубин 400 – 1200 м он изменяется в незначительных пределах – от 24 до 28°.

Из геометрического представления на рис.1 следует выражение коэффициента сцепления породы в массиве в естественно застывшем состоянии:

$$K = \frac{\sigma_c}{2} \cdot \frac{1 - \sin \rho}{\cos \rho} + \gamma H \cdot \operatorname{tg} \rho.$$

Если в упругом нулевом поле напряжений на контуре в виде окружности действует радиальное растягивающее напряжение $\sigma_r = -p$, то из решения Ламе в окружном направлении действует равное ему сжимающее напряжение $\sigma_\theta = p$. При этом по закону Гука в направлении перпендикулярном плоскости контура напряжение $\sigma_z = 0$. Таким образом, на этом контуре реализуется чистый сдвиг, и если состояние здесь становится предельным, то это происходит при касательном напряжении, равном коэффициенту сцепления K породы в массиве. Именно при простом сдвиге О. Рейнольдс в опытах на песке впервые обнаружил явление увеличения объема, которое назвал дилатансией.

Поведение горных пород при таких условиях не исследовалось. Эквивалентным можно принять напряженное состояние, при котором $\sigma_r = \sigma_z = 0$, $\sigma_\theta = p$, реализуемое при одноосном сжатии.

В проведенных при «жестком» нагружении испытаниях на одноосное сжатие горных пород [7] также проявляется дилатансия, особенно характерная для осадочных горных пород. Эти испытания показывают, что переход из предельного состояния в запределное до уровня остаточной прочности сопровождается увеличением объема и падением сжимающего напряжения, которое происходит по крутой, почти вертикальной линии.

По мере продвижения забоя выработки круглого сечения напряжения в ее окрестности постепенно возрастают, возникает зона неупругих деформаций (ЗНД), образующая полый цилиндр с внутренним радиусом R выработки и наружным R_p , соответствующим границе ЗНД. На этой границе в упругой зоне переход в предельное состояние происходит при радиальном активном напряжении $\sigma'_r(R_p) = -K$. В тангенциальном направлении возникает пассивное сжимающее напряжение

$\sigma'_\theta(R_p) = K$. Примем составляющую массива равной q . Тогда полные напряжения в этих направлениях

$$\sigma_r(R_p) = q - K; \quad \sigma_\theta(R_p) = q + K. \quad (1)$$

Эти напряжения предшествуют переходу в предельное и запределное состояние с дилатансией.

Одной из деформационных характеристик горных пород является относительная объемная деформация ε_v^0 при одноосном сжатии в запределном состоянии. Лабораторные исследования [7, 8] и натурные наблюдения [9] показывают, что величина ε_v^0 равна приблизительно 0,1.

Переход в запределное состояние и дилатансия происходит на линии разграничения упругой и неупругой зон. Увеличение Δdv элементарного объема dv в виде кольца толщиной dr и радиусом r на этой линии

$$\Delta dv = \varepsilon_v^0 \cdot 2\pi r \cdot dr. \quad (2)$$

Это увеличение объема связано с перемещением du_d контура выработки радиусом R :

$$\Delta dv = 2\pi R \cdot du_d. \quad (3)$$

Приравнявая (2) и (3) и интегрируя по всей ЗНД радиусом R_p , получим смещение контура выработки, вызванное дилатансией, в долях от радиуса R :

$$u_d = \varepsilon_v^0 \cdot \frac{R_p^2 - 1}{2}. \quad (4)$$

На границе с упругой зоной точки ЗНД находятся в предельном состоянии. При прямолинейной огибающей кругов Мора

$$\sigma_\theta(R_p) = c\sigma_r(R_p) + \sigma_c. \quad (5)$$

Точки ЗНД между контуром выработки и границей с упругой зоной находятся в запределном состоянии. Если учесть непрерывность ЗНД, то здесь между главными напряжениями σ_r и σ_θ следует предположить существование определенной связи [10]. Примем ее линейной:

$$\sigma_\theta = k\sigma_r + \sigma_0, \quad (6)$$

где σ_0 – 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 (1), получим коэффициент, характеризующий состояние массива за контуром выработки:

$$k = c + \frac{\sigma_c - \sigma_0}{q - K} \quad (7)$$

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

$$\sigma_r = \frac{[(k-1)p + \sigma_0]r^{k-1} - \sigma_0}{k-1}; \quad \sigma_\theta = \frac{k[(k-1)p + \sigma_0]r^{k-1} - \sigma_0}{k-1} \quad (8)$$

где p – сопротивление крепи выработки.

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

$$R_p = \left[\frac{(k-1)(q-K) + \sigma_0}{(k-1)p + \sigma_0} \right]^{1/(k-1)} \quad (9)$$

На границе с упругой зоной напряжения в ЗНД $\sigma_r(R_p) = q - K$, $\sigma_\theta(R_p) = k(q - K) + \sigma_0$, а в упругой зоне $\sigma_r(R_p) = q - K$, $\sigma_\theta(R_p) = q + K$. Таким образом, тангенциальное напряжение здесь претерпевает скачок, что согласуется с лавинообразным падением напряжения, которое наблюдается в запредельном состоянии при лабораторных испытаниях пород на одноосное сжатие [7].

Радиальное смещение границы упругой зоны приводит к смещению контура выработки, которое запишется в долях от радиуса:

$$u_r = \frac{1+\mu}{E} (q - p) R_p^2 \quad (10)$$

где μ и E – коэффициент Пуассона и модуль упругости пород соответственно, q и p – составляющая окрестности выработки и сопротивление крепи в долях от γH .

Если решать эту задачу при общепринятом представлении напряженного состояния горного массива с использованием теории предельного равновесия, то радиус ЗНД и характеристика состояния массива запишутся следующим образом [10]:

$$R_{p\sigma} = \left[\frac{(2q - \sigma_0)(k_\sigma - 1)/(k_\sigma + 1) + \sigma_0}{(k_\sigma - 1)p + \sigma_0} \right]^{1/(k_\sigma - 1)}; \quad k_\sigma = \frac{2qc + \sigma_c - \sigma_0(c+1)}{2q - \sigma_c} \quad (11)$$

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

Соответственно, дилатансионная и упругая составляющие смещений

$$u_{d\sigma} = \varepsilon_v^0 \int_1^{R_{p\sigma}} \frac{\sigma_r(R_{p\sigma}) - \sigma_r}{\sigma(R_{p\sigma}) + \sigma_r} r dr; \quad u_{y\sigma} = \frac{1+\mu}{E} [2(1 -$$

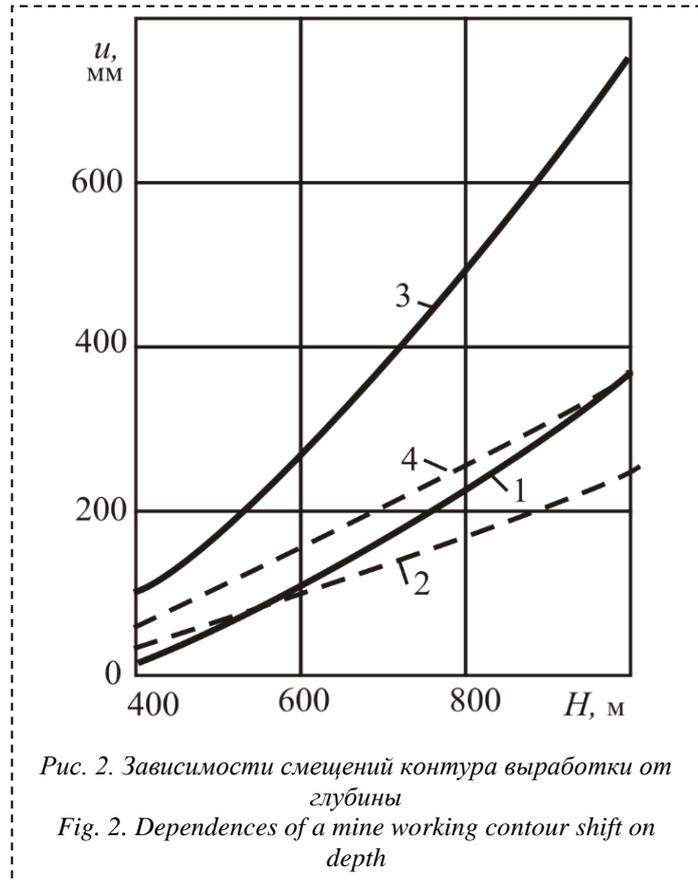


Рис. 2. Зависимости смещений контура выработки от глубины
 Fig. 2. Dependences of a mine working contour shift on depth

$$\mu)q - \sigma_r(R_{p\sigma})] R_{p\sigma}^2 \quad (12)$$

На рис. 2 приведены графики зависимости смещений в выработке от глубины расположения, построенные при следующих условиях: $R = 2$ м; $\sigma_c = 40$ МПа; $\sigma_0 = 0,1\sigma_c$; $\rho = 30^\circ$; $p = 70$ кПа; $\varepsilon_v^0 = 0,1$; коэффициент структурного ослабления массива $k_c = 0,33$.

Кривые 1 и 2 построены для одиночной выработки. Сплошные линии соответствуют расчету по касательным напряжениям (формулы (4), (10)), пунктирные – по теории предельного равновесия (формулы (12)). Результаты расчетов примерно одинаковы до глубины 800 м. Расхождение становится заметным на глубине 1000 м (около 30%) и далее возрастает.

Влияние опорного давления учитывается соответствующим коэффициентом k_{od} . Для этого в расчет вводится составляющая массива $q = \gamma H \cdot k_{od}$.

Кривые 3 и 4 построены при коэффициенте опорного давления $k_{od} = 1,2$. В этом случае расхождение в расчетах значительно: на глубине 1000 м результат расчета по касательным напряжениям более чем в два раза превышает результат по предельному состоянию.

Следует отметить значительное влияние опорного давления: по расчету по касательным напряжениям: на глубине 1000 м смещение при $k_{od} = 1,2$ более чем в два раза превышает смещение в одиночной выработке..

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Орлов В.П. Кольская сверхглубокая. Научные результаты и опыт исследований / В.П. Орлов, Н.П. Лаверов. – М.: МФ «ТЕХНОНЕФТЕГАЗ», 1998. – 260 с.
2. Козловский Е.А. Кольская сверхглубокая / Е.А. Козловский. – М.: Недра, 1984. – 492 с.
3. Васильев Н.И. Результаты и особенности бурения скважины 5Г и первого вскрытия озера Восток / Васильев Н.И., Липенков В.Я., Дмитриев А.Н., Подоляк А.В., Зубков В.М. // «Лед и снег» № 4 (120), 2012. С. 12-20.
4. Литвиненко В.С., Результаты и особенности бурения скважины 5Г и первого вскрытия озера Восток / Литвиненко В.С., Васильев Н.И., Дмитриев А.Н., Липенков В.Я. // Сб. трудов М-нар. науч.-техн. конф. им. Леонардо да Винчи. – Берлин: Wissenschaftliche Welte e.v., № 1, 2013, с. 137-146.
5. Родин И.В. Снимаемая нагрузка и горное давление. В кн.: Исследования горного давления. – М.: Госгортехиздат, 1960. С. 343-374.
6. Раенко А.Н. К установлению значения угла внутреннего трения горных пород. – Днепропетровск, 1993. – 8 с. – Деп. в ГНТБ Украины 16.11.93, № 2266 – Ук 93.
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. Карташов Ю.М. Прочность и деформируемость горных пород / Ю.М. Карташов, Б.В. Матвеев, Г.В. Михеев, А.Б. Фадеев – М.: Недра, 1979. – 269 с.
9. Заславский Ю.З. Новые виды крепи горных выработок / Ю.З. Заславский., Е.Б. Дружко – М.: Недра, 1989. – 256 с.
10. 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.

REFERENCES

1. Orlov V.P. [Kolskaia ultra deep. Scientific results and research experience] / V.P. Orlov, N.P. Laverov. - M.: MF "TEHNONEFTEGAZ", 1998. - 260 p. (In Russ.)
2. Kozlovskiy E.A. [Kolskaia ultra deep] / E.A. Kozlovskiy. - M.: Nedra, 1984. - 492 p. (In Russ.)
3. Vasiliev N.I. [Results and characteristics of drilling borehole 5G and the first opening of lake Vostok] / Vasiliev N.I., Lipenkov V.J., Dmitriev A.N., Podoliak A.V., Zubkov V.M. // "Ice and snow" № 4 (120), 2012. pp. 12-20. (In Russ.)
4. Litvinenko V.S. [Results and features of drilling a borehole 5G and the first opening of the lake East / Litvinenko V.S., Vasiliev, N.I., Dmitriev A.N., Lipenkov V.Y.] // Works of international scientific and engineering Conference by Leonardo da Vinci. - Berlin: Wissenschaftliche Welte e.v., № 1, 2013, p. 137-146.
5. Rodin I.V. [Removable load and mining pressure]. From the book.: Studies of rock pressure. - M.: Gosgortekhzdat, 1960. pp 343-374. (In Russ.)
6. Raenko A.N. [Determination of the angle of internal friction of rocks]. - Dnepropetrovsk, 1993. - 8 p. - Dep. of SSTL in the Ukraine 16.11.93, № 2266 – Uk. 93.
7. Stavrogin A.N. [The strength and stability of the mine workings at great depths] / A.N. Stavrogin, A.G.Protosenya - M.: Nedra, 1985 - 272 p. (In Russ.)
8. Kartashov Yu.M. [The strength and deformation of the rock] / Yu.M. Kartashov, B.V. Matveev, G.V. Mikheev, A.B. Fadeev - M.: Nedra, 1979. - 269 p. (In Russ.)
9. Zaslavsky Y.Z. [New types of mine support] / Y.Z. Zaslavsky., E.B. Druzhko - M.: Nedra, 1989. - 256 p. (In Russ.)
10. Egorov P.V. [Calculation of bolting and security pillars-enforcement preparatory workings] / P.V. Egorov, A.E. Klykov, O.S.Kurzantsev and others. -. M.: Nedra, 1995. - 126 p. (In Russ.)