

УДК 622. 831

К РАСЧЕТУ ПУЧЕНИЯ ПОЧВЫ ПРОТЯЖЕННОЙ ВЫРАБОТКИ

CALCULATIONS OF SOIL SPRING OF THE EXTENSIVE MINE WORKING

Клыков Александр Ефимович¹,

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

Klykov Alexandr E.,¹

C. Sc. (Engineering), associate professor

Широколов Георгий Валентинович²,

канд.техн.наук, доцент, e-mail: pobedonossec_47@mail.ru

Shirokolobov Georgiy V.,²

C. Sc. (Engineering), associate professor

¹Севастопольский государственный университет, 299053, Россия, г. Севастополь, Университетская, 33

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

²Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

²T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University; 28, Vesennaya St., 650000, Kemerovo, Russian Federation

Аннотация: Рассматривается напряженное состояние почвы протяженной выработки. В уравнение статики для вертикальной оси симметрии вводится объёмный вес пород. Предложенная линейная связь между главными напряжениями на этой оси позволяет получить уравнение для расчета координаты крайней точки зоны неупругой деформации в почве выработки и далее определить смещение почвы.

Abstract: Stress condition of the soil spring of mine working is considered. Unit specific gravity of rocks is introduced into the static equation for the vertical axis of symmetry. The proposed linear relationship between the principal stresses on this axis allows to obtain the equation for calculating the coordinates of the edge point of the inelastic deformation zone in soil working and then to define the earth motion.

Ключевые слова: дилатансия, протяженная выработка, пучение почвы.

Keywords: dilatancy, extended working, earth spring

Пучение почвы в протяженных подземных выработках является распространенным явлением. В особенности оно проявляется на больших глубинах при слабых вмещающих породах, требуя больших ремонтно-восстановительных работ. Поскольку эти работы низко механизированы, то это связано с привлечением большого количества рабочих и с большими затратами.

Снижение этих затрат возможно при прогнозировании смещений почвы и проведении мероприятий по их уменьшению. Эти прогнозы должны опираться на аналитические решения. Такие решения на настоящий момент существуют, но они не отражают некоторых свойств «пучащих» пород.

При эксплуатации выработки зачастую не возникает необходимости крепления почвы. При этом она остается свободной и находится под действием воздуха и влаги и разного рода механиче-

ских воздействий. С течением времени прочность верхних слоёв почвы снижается и приходит в ruinное состояние, когда остаточная прочность близка к нулю. Согласно существующим решениям перемещение при такой почве стремится к бесконечности. Это объясняется тем, что в этих решениях не учитывается сила тяжести пород почвы. В действительности, если поднятие почвы происходит, то имеет конечную величину.

Вокруг подземной выработки формируется зона неупругих деформаций (ЗНД). Определение параметров этой зоны наиболее просто решается для протяженной выработки круглого сечения радиусом R в гидростатическом поле с составляющей q . Сечения выработок в большинстве случаев не являются круглыми, однако полученные результаты можно применить к сечениям, распространенным на практике. Как показали расчеты Колоколова С.Б. [1], неупругая область вокруг

выработки по форме и размеру одинакова для трапециевидной, квадратной, арочной или равновеликой круглой. Это подтверждается и более поздними исследованиями, проведенными численным моделированием [2].

В почве на вертикальной оси симметрии выработки на элементарный объём действуют радиальное σ_r и тангенциальное σ_θ главные напряжения. Кроме того, на этот объём действует собственный вес. В этом случае с учетом объемного веса γ уравнение статики для точек этой оси запишется:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} - \gamma = 0. \quad (1)$$

На границе ЗНД радиусом R_p с упругой зоной напряжения соответствуют предельному состоянию. Для осадочных горных пород это состояние может быть описано по теории прочности Мора при прямолинейной огибающей предельных кругов. В этом случае связь между главными напряжениями имеет вид:

$$\sigma_\theta(R_p) = c\sigma_r(R_p) + \sigma_{сж}, \quad (2)$$

где $\sigma_{сж}$ – прочность пород на одноосное сжатие, а c выражается через угол внутреннего трения ρ : $c = (1 + \sin\rho)/(1 - \sin\rho)$.

В промежуточных точках ЗНД напряжения изменяются от наименьших на контуре выработки до предельных на границе с упругой зоной. При этом максимальное напряжение σ_θ функционально связано с минимальным σ_r . Для незакрепленной выработки максимальное напряжение возрастает от остаточной прочности при одноосном сжатии σ_0 на контуре выработки до $\sigma_\theta(R_p)$ на границе ЗНД, а минимальное – от 0 до $\sigma_r(R_p)$. Примем линейную связь между этими напряжениями:

$$\sigma_\theta = k\sigma_r + \sigma_0, \quad (3)$$

где k – коэффициент, характеризующий состояние массива.

Решая дифференциальное уравнение (1) с учетом (3) и принимая на контуре выработки радиусом R радиальное напряжение равным сопротивлению крепи p , получим:

$$\sigma_r = \left(\frac{\sigma_0}{k-1} + p + \frac{\gamma R}{k-2} \right) \cdot r^{k-1} - \frac{\gamma R}{k-2} \cdot r - \frac{\sigma_0}{k-1}. \quad (4)$$

В упругой зоне напряжения

$$\sigma_{r,\theta} = q \pm B/r^2, \quad (5)$$

где q – составляющая нетронутого массива окрестности выработки.

На границе ЗНД с упругой зоной при $r = R_p$ напряжения отвечают условиям (2), (3) и (5). Отсюда определим

$$k = [\sigma_{сж} + 2qc - \sigma_0(c + 1)] / (2q - \sigma_{сж}), \quad (6)$$

а также для радиального напряжения на границе с упругой зоной получим

$$\begin{aligned} \sigma_r(R_p) &= (2q - \sigma_{сж}) / (c + 1); \\ \sigma_r(R_p) &= (2q - \sigma_0) / (k + 1). \end{aligned} \quad (7)$$

Определим $\sigma_r = \sigma_r(R_p)$ из формулы (4), приняв $r = R_p$. После замены $\sigma_r(R_p)$ соответствующим выражением из (7) получим уравнение для определения расстояния R_p граничной точки ЗНД от центра выработки:

$$\begin{aligned} R_p^{k-1} \left(\frac{\sigma_0}{k-1} + p + \frac{\gamma R}{k-2} \right) - \frac{\gamma R}{k-2} \cdot R_p - \\ - \frac{2q(k-1) + 2\sigma_0}{k^2 - 1} = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

При заданных параметрах уравнение решается относительно R_p в Mathcad с обращением к функции root.

Переход пород ЗНД в запредельное состояние сопровождается увеличением объема, дилатансией. В упругой зоне деформации связаны с напряжениями законом Гука, поэтому увеличение объема здесь не связано с дилатансией. В связи с этим дилатансия в ЗНД не является одинаковой во всех точках и изменяется от максимального значения на контуре выработки до нуля на границе ЗНД. Это подтверждается данными натурных измерений [3,4], показавших, что относительное разрыхление с удалением от контура выработки монотонно убывает по кривой. При известной закономерности изменения разрыхления породы в окрестности выработки можно определить смещение её контура.

Согласно экспериментальным данным коэффициент разрыхления уменьшается с ростом минимального напряжения. Г. Л.Фисенко [5] рекомендует принимать убывание этого коэффициента подобно коэффициенту пористости при компрессионных испытаниях, т.е по гиперболе. В подготовительных и капитальных выработках максимальное разрыхление наблюдается на поверхности незакрепленной выработки и по его же рекомендациям здесь для ориентировочных расчетов следует принимать коэффициент разрыхления $k_p = 1,1 \div 1,15$. Максимальная же величина этого коэффициента достигает 1,18.

Коэффициент разрыхления k_p горных пород связан с относительной объемной деформацией ε_v соотношением: $k_p = \varepsilon_v + 1$. Относительная объемная деформация ε_v^0 в запредельном состоянии при одноосном сжатии является характеристикой горных пород и может быть определена при испытании в установках на объемное сжатие. Результаты таких испытаний содержатся в работе [6] для различных горных пород, согласно которым в запредельном состоянии у горных пород происходит увеличение объема (дилатансия). При этом для осадочных пород характерна тенденция

уменьшения дилатансии с увеличением минимального напряжения по гиперболе.

На основании этих данных с учетом граничных условий объёмную деформацию в ЗНД можно принять в виде следующей зависимости

$$\varepsilon_v = \varepsilon_v^0 \frac{\sigma_r(R_p) - \sigma_r}{\sigma_r(R_p) + \sigma_r}, \quad (9)$$

Увеличение объёма пород в ЗНД сопровождается перемещением их в выработку и связано со смещением u_∂ контура выработки, которое определится интегрированием:

$$u_\partial = \varepsilon_v^0 \int_1^{R_p} \frac{\sigma_r(R_p) - \sigma_r}{\sigma_r(R_p) + \sigma_r} r dr \quad (10)$$

Перемещение $u(R_p)$ границы упругой зоны с ЗНД радиусом R_p вызывает перемещение u_y точек контура выработки радиусом R :

$$u_y \cdot R = u(R_p) \cdot R_p \quad (11)$$

Это перемещение определится из решения задачи Лямэ и геометрического уравнения $\varepsilon_\theta = u/r$:

$$u_y = \frac{1 + \mu}{E} [2(1 - \mu)q - \sigma_r(R_p)] R_p^2, \quad (12)$$

где E и μ – соответственно модуль упругости и коэффициент Пуассона пород, а перемещение и радиус ЗНД выражаются в долях от радиуса выработки.

Для определения смещений в выработке помимо давления q в её окрестности и сопротивления p крепи необходимо знать характеристики предельного и запредельного состояний окружающих пород.

Определение этих характеристик связано с необходимостью привлечения сложного оборудования. Однако по отношению к осадочным горным породам эта задача может быть упрощена, поскольку для них значения некоторых характеристик вследствие их незначительного колебания могут быть приняты известными априори.

При анализе значений угла внутреннего трения проведенный Раенко А.Н. [7], приводит к выводу, что для горных пород крепостью от 1,5 до 6 в интервале глубин 400 – 1200 м этот угол изменяется в незначительных пределах – от 24 до 28°.

Лабораторные испытания [6] показывают, что для многих горных пород остаточная прочность σ_0 при одноосном сжатии близка к нулю, а если породы находятся на контуре горных выработок, то их прочность становится ещё ниже от влияния воздуха и влаги. Натурные наблюдения [5, 8] свидетельствуют о том, что в условиях развившихся деформаций горные породы на контуре выработки, где реализуется плоское напряженное состояние, адекватное согласно условию Кулона-Мора линейному, находятся в руинном состоянии. Поэтому при расчете смещений обнаженной почвы

следует принимать $\sigma_0 = 0$.

Горные породы пронизаны поверхностями ослабления, поэтому их прочность в массиве ниже прочности в образце и для определения этой прочности необходимо учитывать коэффициент структурного ослабления k_c . Его величина изменяется от 0,9 для монолитных горных пород до 0,0005 для пород с густой сетью трещин по всем направлениям, разделяющих породы на отдельные куски. На основании анализа экспериментальных данных, проведенных различными исследователями, в [9] рекомендуется принимать для расчетов $k_c = 0,33$.

Определим смещение почвы на конкретном примере при следующих исходных данных: глубина расположения выработки $H = 800$ м; объёмный вес покрывающих пород $\gamma = 25$ кН/м³; коэффициент опорного давления $k_{од} = 1$; прочность на одноосное сжатие породы почвы $\sigma_{сж} = 50$ МПа; коэффициент структурного ослабления $k_c = 0,33$; угол внутреннего трения $\rho = 24^\circ$; остаточная прочность $\sigma_0 = 0$; почва не закреплена, поэтому сопротивление крепи $p = 0$; площадь сечения выработки $S = 13,85$ м²; объёмная деформация при одноосном сжатии в запредельном состоянии $\varepsilon_v^0 = 0,1$; модуль упругости породы $E = 1,5 \cdot 10^4$ МПа; коэффициент Пуассона $\mu = 0,25$.

Для решения применим Mathcad, выражая в формулах напряжение и давление в долях от q :

$$\begin{aligned} H &:= 700 \quad \gamma := 0.025 \quad kod := 1 \\ q &:= \gamma \cdot H \cdot kod \quad \sigma c1 := 50 \quad k_c := 0.33 \\ \sigma c &:= \sigma c1 \cdot k_c \cdot q^{-1} \quad \sigma c = 0.943 \quad \rho := 24 \cdot \pi \cdot 180^{-1} \\ c &:= (1 + \sin(\rho)) \cdot (1 - \sin(\rho))^{-1} \quad c = 2.371 \\ \sigma_0 &:= 0 \cdot \sigma c \quad \sigma_0 = 0 \\ k &:= [\sigma c + 2 \cdot c - \sigma_0 \cdot (c + 1)] \cdot (2 - \sigma c)^{-1} \quad k = 5.378 \\ \sigma r R &:= (2 - \sigma_0) \cdot (k + 1)^{-1} \quad \sigma r R = 0.314 \\ S &:= 13.85 \quad R := \sqrt{\frac{S}{\pi}} \quad R = 2.1 \quad p := 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F(r) &:= r^{k-1} [\sigma_0 \cdot (k-1)^{-1} + p \cdot q^{-1} + \gamma \cdot R \cdot (k-2)^{-1} \cdot q^{-1}] - \gamma \cdot R \cdot (k-2)^{-1} \cdot q^{-1} \cdot r - [2(k-1) + 2\sigma_0] \cdot (k^2 - 1)^{-1} \\ r &:= 2 \quad r0 := \text{root}(F(r), r) \quad r0 = 3.829 \quad \varepsilon := 0.1 \\ \sigma r(r) &:= [\sigma_0 \cdot (k-1)^{-1} + p \cdot q^{-1}] \cdot r^{k-1} - \gamma \cdot R \cdot (r - r^{k-1}) \cdot (k-2)^{-1} \cdot q^{-1} - \sigma_0 \cdot (k-1)^{-1} \end{aligned}$$

$$ud := \varepsilon \cdot \int_1^{r0} (\sigma r R - \sigma r(r)) \cdot (\sigma r R + \sigma r(r))^{-1} \cdot r dr$$

$$ud = 0.389 \quad Ud := ud \cdot R \quad Ud = 0.818$$

$$E := 1.5 \cdot 10^4 \quad E1 := E \cdot q^{-1} \quad \mu := 0.25$$

$$ue := [(1 - \mu^2) \cdot 2 - (1 + \mu) \sigma r R] \cdot r0^2 \cdot E1^{-1}$$

$$ue = 0.025 \quad Ue := ue \cdot R \quad Ue = 0.053$$

$$u := ud + ue \quad u = 0.415$$

$$U := Ud + Ue \quad U = 0.871$$

Расчеты показывают, что упругая составляющая перемещений Ue на порядок меньше дилатансионной Ud и может быть опущена при расче-

тах.

Смещение незакрепленной почвы составляет 0,871 м и потребует большого объема ремонтно-восстановительных работ.

Изоляция почвы выработки от рудничной атмосферы способствует сохранению остаточной прочности пород на контуре выработки, которую при расчетах можно принять равной $0,1\sigma_{сжкс}$. Заменяв в расчете $\sigma_0 := 0 \cdot \sigma_с$ выражением $\sigma_0 := 0,1 \cdot \sigma_с$ получим $U = 0,15$ м. Такое смещение почвы может быть допустимым, однако её изоляция не всегда реализуема.

Одним из возможных вариантов укрепления почвы является применение анкерной крепи. В этом случае необходимо, чтобы концы анкеров располагались за крайней точкой ЗНД, т.е. закреплялись в упругой зоне окрестности выработки, поэтому длина анкера должна превышать размер ЗНД.

Примем длину анкера $l = 1,8$ м. В этом случае размер ЗНД можно допустить равным 1,7 м. Тогда радиус ЗНД $R_p = 2,1 + 1,7 = 3,8$ м, а в долях от радиуса выработки $R_p = 1,81$.

Согласно уравнению (8) значению $R_p = 1,7$ соответствует определенное давление p на почву со стороны крепи. Для его вычисления применим Mathcad в продолжении предыдущей задачи:

$$r := 1.7$$

$$p := \gamma \cdot R \cdot (k - 2)^{-1} \cdot q^{-1} \cdot r^{2-k} + \left[\frac{2 \cdot (k - 1) + 2 \cdot \sigma_0}{k^2 - 1} \right] \cdot r^{1-k} - \sigma_0 \cdot (k - 1)^{-1} - \gamma \cdot R \cdot (k - 2)^{-1} \cdot q^{-1}$$

$$p = 0.03 \quad p1 := p \cdot q \quad p1 = 0.525$$

Сопротивление крепи, соответствующее принятому $R_p = 1,7$, равно 0,525 МПа. Подставив это значение в приведенное выше решение, получим $U = 0,092$ м. Такое поднятие почвы допустимо.

Таким образом, смещение почвы при креплении анкерами длиной 1,8 м уменьшается почти в 10 раз.

Для анкеров с сопротивлением 150 кН плотность установки составит $0,525 \cdot 10^3 / 150 = 3,5$ анк/м².

В случае, если анкеры фиксируются до начала смещений, их податливость исходя из смещения 0,092 м должна быть не менее 5,1 %. При меньшей податливости их необходимо фиксировать после некоторого смещения почвы. Последующий за этим подъём почвы до максимальной величины будет сопровождаться ростом нагрузки на анкер до 150 кН.

При длине анкеров 2 м для тех же условий сопротивление крепи составит 0,317 МПа, плотность установки – 2,1 анк/м², а смещение почвы – 0,138 м.

Увеличение составляющей массива в окрестности выработки может произойти под влиянием очистных работ, что связано с ростом напряжений и смещений. Приводимый расчет позволяет оценить это влияние через коэффициент опорного давления. Приняв, например, в приведенном выше расчете для незакрепленной почвы $kod := 1,2$ получим $U = 1,618$ м. Для $kod := 1$, рассмотренного ранее, $U = 0,871$ м. Таким образом, увеличение опорного давления на 20 % приводит к росту смещения почвы почти в два раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колоколов С.Б. Определение границы неупругой области вокруг горной выработки / С.Б. Колоколов // Изв. вузов. Горный журнал. – 1988. – № 9. – С. 39 - 41.
2. 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.
3. Заславский Ю.З. Новые виды крепи горных выработок / Ю.З. Заславский, Е.Б. Дружко – М.: Недра, 1989, - 255 с.
4. Шашенко А.Н. Особенности управления геомеханическими процессами вокруг протяженной выработки / А.Н. Шашенко, А.В. Солодянкин // Проблемы гирьского тиску. – 2008. – Вып 16. – С. 26-51.
5. Фисенко Г.Л. Предельные состояния горных пород вокруг выработок. – М.: Недра, 1976, - 272 с.
6. Ставрогин А.Н. Прочность горных пород и устойчивость выработок на больших глубинах / А.Н. Ставрогин, А.Г. Протосеня – М.: Недра, 1985. – 271 с.
7. 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.
8. Черняк И.Л. Влияние сопротивления крепи на устойчивость присечных выработок / И.Л.Черняк, С.П.Грищенко // Изв. вузов. Горный журнал. – 1988. - № 9. - С. 34-38.
9. Шашенко А.Н. Управление устойчивостью протяженных выработок глубоких шахт / А.Н. Шашенко, А.В. Солодянкин, А.В. Мартовицкий – Днепропетровск, 2012. – 384 с.

REFERENCES

1. Kolokolov S.B. Determination of inelastic zone edges around the mine working / S.B. Kolokolov // Uni-

versities Publishing House. Mining Journal. - 1988. - № 9. - P. 39 - 41.

2. *Martovitskiy A.V.* About the size of inelastic deformation zone around the mine working of different cross-sectional shapes / A.V. Martovitskiy, R.N. Tereshchuk, S.N. Gapeev // Scientific Bulletin of National Mining University: Scientific-tech. Journal. - Dnepropetrovsk, 2011. - № 1. - p 29 - 32.

3. *Zaslavskiy U.Z.* New types of mine support / U.Z. Zaslavskiy, E.B. Druzhko - M.: Nedra, 1989 - 255 p.

4. *Shashenko A.N.* Peculiarities of geomechanical processes management around extensive mine working / A.N. Shashenko, A.V. Solodyankin // Problems of mining pressure. - 2008. – № 16. - P. 26-51.

5. *Fissenko G.L.* Limit state of mine rocks around workings. - M.: Nedra, 1976 - 272 p.

6. *Stavrogin A.N.* The strength of the rocks and stability of workings at great depths / A.N. Stavrogin, A.G. Protosenya - M.: Nedra, 1985. - 271 p.

7. *Raenko A.N.* The angle determination of internal friction of rocks. - Dnepropetrovsk, 1993. - 8 p. - Dep. SNTL in the Ukraine 16.11.93, № 2266 – the Uk. 93.

8. *Chernyak I.L.* The impact of resistance of the support on the stability of coal cutting workings / I.L.Chernyak, S.P.Grischenko // Universities Publishing House. Mining Journal. - 1988. - № 9. - P. 34-38.

9. *Shashenko A.N.* The resistance management of extended workings in deep mines / A.N. Shashenko, A.V. Solodyankin, A.V. Martovitskiy - Dnepropetrovsk, 2012. - 384 p.

Поступило в редакцию 24.07.2016

Received 24 July 2016