УДК 556.3+624.131

Ю.А.НОРВАТОВ
Научно-исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела (*ОАО ВНИМИ*), *Санкт-Петербург*, *Россия*

ГИДРОГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ЗАТОПЛЕНИИ УГОЛЬНЫХ ШАХТ

Рассмотрено напряженное состояние породных массивов при повышении гидростатического давления в затапливаемых выработках ликвидируемых шахт. Получены критерии для оценки возможности перемещения массивов в выработанное пространство. Предложена принципиально новая схема для оценки поднятия земной поверхности при декомпрессии пород трещиноватого массива.

Consideration is given to the stress state of rock mass under higher hydrostatic pressure in the flooded workings of the abandoned mines. One has obtained the criteria for assessment of potential movement of rock mass into the mined-out space. The basically new scheme has been suggested to form an estimate of raising the earth surface upon decompression of the fractured rock mass.

При ведении очистных работ на шахтах в слоистом породном массиве над выработанным пространством формируются трещины, нормальные напластованию, и трещины расслоения. При развитии процесса сдвижения подработанный массив перемещается в выработанное пространство, которое заполняется дезинтегрированными породами. Однако на локальных участках, примыкающих к целикам угля, возможно зависание основной кровли над выработанным пространством (рис.1).

При эксплуатации шахты подземные воды практически не влияют на напряженное состояние породного массива, зависшего над выработанным пространством, поскольку этот массив сдренирован в пределах зоны развития техногенных трещин, нормальных напластованию (водопроводящих трещин). В процессе затопления шахт напряженное состояние породных массивов изменяется под влиянием сил гидростатического взвешивания и при достижении некоторого «критического» значения гидростатического давления зависший массив перемещается в затопленное пространство, в котором давление может резко повышаться. Если подобные явления происходят вблизи горных выработок, в которых установлены водонепроницаемые перемычки, изолирующие затапливаемую шахту от соседней действующей, то возможно разрушение перемычек, сопровождаемое прорывом шахтных вод в эксплуатируемые выработки. Не исключено, что разрушение многих глиноцементных перемычек при затоплении шахт в Восточном Донбассе связано с циклическими обрушениями породных массивов по мере затопления горных выработок.

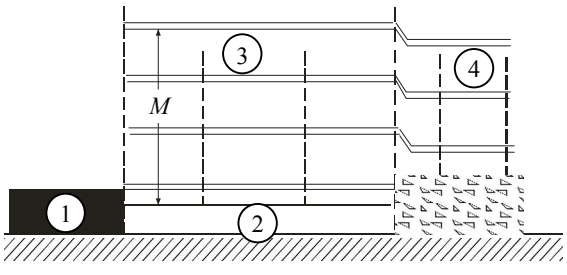

Рис.1. Схема зависания основной кровли над выработанным пространством

1 – целик угля; 2 – выработанное пространство; 3 – зависшая породная пачка; 4 – обрушенный породный массив

Для прогноза условий обрушения породных массивов при затоплении шахт необходимо определить минимальное значение гидростатического давления, при котором

достигается предельное напряженное состояние этих массивов. Допустим, что зависший участок кровли очистной выработки характеризуется размерами в плане $a \times b$. В соответствии с [2], мощность зависшего массива M может быть принята равной $40\,m$ (где m – мощность вынутого угольного пласта).

Поскольку верхняя граница зависшей породной пачки представлена трещиной расслоения, эта пачка не пригружена залегающими над ней отложениями (геостатическое давление снято). Зависающий над выработанным пространством массив не подбучен обрушенными породами, поэтому имеется потенциальная возможность перемещения массива в выработанное пространство.

Для формального упрощения дальнейших выкладок зависшее тело произвольной формы в плане целесообразно представить цилиндром высотой M и радиусом $r_0 = \sqrt{ab/\pi}$, где a и b – средняя длина и ширина участка зависшей над выработанным пространством основной кровли (рис.2).

Вес зависшего массива, в соответствии с принятой схемой,

$$P_{\text{â}} = \gamma_{\text{â}} \pi r_0^2 M,$$

где $\gamma_{\text{в}}$ – объемный вес пород с учетом архимедова взвешивания, $\gamma_{\text{в}} = (\Delta - \gamma_0)(1 - n)$; Δ – удельный вес скелета пород; γ_0 – объемный вес воды; n – пористость.

При повышении гидростатических давлений в подработанном массиве снижаются эффективные напряжения (напряжения между частицами пород), что приводит к снижению сил трения, определявших ранее устойчивость зависающего массива (наряду с силами сцепления). Эффективные напряжения, нормальные боковой поверхности цилиндра и определяющие силы трения с учетом гидростатического давления [3]

$$\sigma_{\acute{y},N} = 0{,}5\gamma_{\text{ï, â}} M\lambda - p_{\text{ãc}},$$

где $\gamma_{\text{ï, â}} = \Delta(1-n) + \gamma_0 n$ – вес породного скелета вместе с заключенной в порах водой в единице объема водонасыщенного массива; $p_{\text{гс}}$ – гидростатическое давление (нейтральное напряжение).

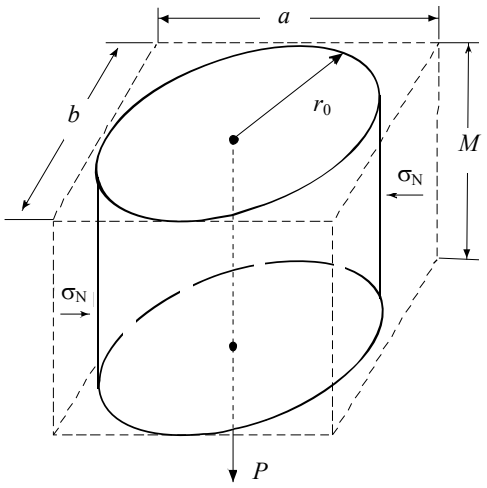

Рис.2. Схема к расчету устойчивости зависшего участка основной кровли

Условие устойчивости водонасыщенного цилиндрического тела при повышении гидростатического давления можно записать в виде

$$\frac{CF + \sigma_{\acute{y},N} \operatorname{tg}\varphi F}{P_{\text{â}}} > 1, \qquad (1)$$

где C – сцепление пород; F – площадь боковой поверхности цилиндра, $F = 2\pi r_0$; φ – угол внутреннего трения пород.

После несложных преобразований условие (1) можно представить в виде

$$\frac{2C + \left(\gamma_{\text{ï, â}} \lambda M - 2p_{\text{ãñ}}\right)\operatorname{tg}\varphi}{\gamma_{\text{â}} r_0} > 1. \qquad (2)$$

Из зависимости (2) следует, что нарушение устойчивости породного массива, зависшего над выработанным пространством, может произойти при повышении гидростатического давления в средней части массива до «критического» значения, соответствующего условию

$$p_{\text{ãc}} > \frac{2C + \gamma_{\text{ï, â}} \lambda M \operatorname{tg}\varphi - \gamma_{\text{â}} r_0}{2\operatorname{tg}\varphi}. \qquad (5)$$

Можно отметить, что при реальных размерах участков зависания кровли (50-100 м), углах внутреннего трения пород равных, 30°, и сцеплении 0,5-1,0 МПа «критическое» гидростатическое давление составляет 0,5-1,0 МПа.

Для упрощения критериальных оценок можно исключить трудно определяемую характеристику сцепления горных пород. С этой целью напряженное состояние массива, зависшего над выработанным пространством, до затопления шахты априори должно рассматриваться как предельное.

Состояние неустойчивого равновесия зависшей пачки пород в этом случае можно охарактеризовать зависимостью

$$CF + \sigma_N \operatorname{tg}\varphi F = \gamma_{\text{п}} V, \qquad (3)$$

где σ_N – средняя величина напряжения, нормального к боковой поверхности тела; $\gamma_{\text{п}}$ – объемный вес осушенных пород; V – объем зависшего тела, $V = \pi r_0^2 M$.

В соответствии с формулой (3) напряжение, нормальное к боковой поверхности,

$$\sigma_N = \frac{\gamma_{\text{п}} V - CF}{F \operatorname{tg}\varphi}.$$

При затоплении шахт полное напряжение, нормальное боковой поверхности зависшего тела, изменится только за счет добавочного веса воды в породном массиве, поэтому условие устойчивости массива можно записать в виде

$$CF + \left(\frac{\gamma_{\text{п. в}} V - CF}{F \operatorname{tg}\varphi} - p_{\text{вп}} \right) \operatorname{tg}\varphi F > \gamma_{\text{в}} V. \qquad (4)$$

С учетом формулы (4) условие нарушения устойчивости зависшего массива может быть представлено в простой форме:

$$p_{\text{вс}} > \frac{\left(\gamma_{\text{п. в}} - \gamma_{\text{в}}\right) r_0}{2 \operatorname{tg}\varphi}.$$

Наряду с рассмотренными гидрогеомеханическими процессами динамического характера при затоплении шахт и снижении эффективных напряжений в водонасыщенных породных массивах развиваются процессы их разуплотнения, сопровождаемые повышением отметок земной поверхности. Параметром, характеризующим разуплотнение (декомпрессию) водонасыщенных массивов при повышении в них гидростатического давления, может служить коэффициент упругоемкости β. Натурными наблюдениями за режимом затопления горных выработок установлено [1], что при глубине затапливаемых шахт 500-1000 м значения коэффициентов упругоемкости составляют 10^{-5}-10^{-6} м$^{-1}$ [3].

Вертикальные деформации (воздымания) земной поверхности теоретически можно оценить по зависимости

$$\eta = 0{,}5\beta\Delta H^2, \qquad (5)$$

где ΔH – максимальное повышение напоров до земной поверхности при полном затоплении шахты.

Согласно формуле (5), при затоплении шахт глубиной 1000 м в Восточном Донбассе деформации земной поверхности должны составлять 0,5-5,0 м. Однако натурными наблюдениями устанавливаются существенно меньшие деформации, что вынуждает подвергнуть сомнению правомерность формулы (5), основанной на схеме – модели сплошной среды. В реальных условиях подработанный породный массив характеризуется техногенной трещиноватостью, поэтому при декомпрессии породных блоков происходит частичное или полное сокращение раскрытости трещин напластования, что отражается на деформациях земной поверхности.

Известно [2], что суммарная раскрытость сформированных при подработке массива трещин напластования составляет (0,15-0,30) m. В соответствии со схемой – моделью структурированного (трещиноватого) массива деформации земной поверхности необходимо оценивать по зависимости

$$\eta = 0{,}5\beta\Delta H^2 - (0{,}15\text{-}0{,}30)m. \qquad (6)$$

Формула (6) может быть использована при выполнении условия $0{,}5\beta\Delta H^2 > (0{,}15\text{-}0{,}30)m$; если $0{,}5\beta\Delta H^2 \le (0{,}15\text{-}0{,}30)m$, то существенных деформаций земной поверхности при затоплении шахт ожидать не следует.

Необходимо отметить, что оценка деформаций земной поверхности на числен-

ных гидрогеомеханических моделях, основанных на представлении породных массивов в рамках традиционной схемы сплошной среды, не отражает фактических закономерностей анализируемого процесса.

При затоплении шахт происходит некоторая активизация процесса сдвижения горных пород, однако особая сложность этого процесса и незначительный объем натурных наблюдений не позволяют предложить рекомендации по прогнозным оценкам.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Норватов Ю.А.* Численное моделирование и аналитическая оценка условий затопления ликвидируемых шахт / Ю.А.Норватов, И.Б.Петрова // Перспективы использования геоинформационных технологий для безопасной отработки месторождений полезных ископаемых / Науч.-исслед. ин-т горной геомех. и маркш. дела. СПб, 2001.

2. Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях. М.: Недра, 1981.

3. *Шестаков В.М.* Гидрогеомеханика. М.: Изд-во МГУ, 1998.